



EDAFOLOGIA



Vol. 8 Nº 3, Diciembre 2001

**REVISTA DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE
LA CIENCIA DEL SUELO**

Vol. 8

Periodicidad Cuatrimestral

Dep. Legal: C-748/2000

ISSN 1135-6863

EDAFOLOGÍA



Publicada por la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo

Impreso en: Grafisant, S.L. - Santiago de Compostela

EDAFOLOGÍA

Revista de la Sociedad Española de Ciencia del Suelo
Dpto. de Edafología y Química Agrícola. Facultad de Biología
Universidad de Santiago de Compostela

Director: Felipe Macías Vázquez
Secretaria: M. Carmen Monterroso Martínez

Comité de Redacción

Gonzalo Almendros Martín. Centro de Ciencias Medioambientales. Madrid
María Arias Delgado. Centro de Ciencias Medioambientales. CSIC. Madrid
Antonio Bello Pérez. Centro de Ciencias Medioambientales. CSIC. Madrid
Rosa Calvo de Anta. Universidad de Santiago de Compostela.
Tarsy Carballas Fernández. CSIC. Santiago de Compostela.
Norma E. Cruz Calderón. Universidad Nacional Autónoma de Méjico.
Francisco Díaz-Fierros Viqueira. Universidad de Santiago
José A. Díaz López. Centro de Ciencias Medioambientales. Madrid.
Carlos Dorronsoro Fernández. Universidad de Granada.
Rafael Espejo Serrano. Universidad Politécnica de Madrid.
M^a Teresa Felipó Oriol. Universidad de Barcelona.
Cármen Fernández Bermejo. Univ. Politécnica de Madrid.
José M^a Gascó Montes. Univ. Complutense de Madrid.
Pedro González Fernández. Centro de Invest. y Desarr. Agrario. Córdoba.
Juana González Parra. Univ. Complutense de Madrid.
José M. Hernández Moreno. Universidad de la Laguna.
M^a Isabel Hernando Massanet. Univ. Complutense de Madrid.
Florencio Ingelmo Sánchez. Instituto Valenciano de Invest. Agrarias. Valencia.
Jaime Iñiguez Herrero. Universidad de Navarra.
Raimundo Jiménez Ballesta. Universidad Autónoma de Madrid.
Felipe Macías Vázquez. Universidad de Santiago.
M. Carmen Monterroso Martínez. Universidad de Santiago.
José M. Murillo Carpio. Instituto de Recursos Naturales. Sevilla.
Alfonso G. Navas Sánchez. Centro de Ciencias Medioambientales. Madrid.
Roque Ortíz Silla. Universidad de Murcia.
Jesús Pastor Piñeiro. Centro de Ciencias Medioambientales. Madrid.
Jaime Porta Casanellas. Universidad de Lérida.
Diego de la Rosa Acosta. CSIC. Sevilla.
Juan Sánchez Díaz. Univ. de Valencia.
Juan Carlos Simón Benito. Univ. de Alcalá de Henares.
José Torrent Castellet. Univ. de Córdoba.
Arfred Zinck. International Institute for Aerospace Survey. Wageningen.
George Stoops. Geologisch Institute. Ghent. Belgium.
Peter Burman. Dept of Soil Science and Geology. Wageningen.
Pablo Vidal Torrado. Dpto. de Solos. Escola Superior Agricultura. Piracicaba. Brazil

Foto Portada: Imagen derivada del sensor ETM+ del satélite Landsat-7, sureste de la Comunidad de Madrid. M. P. García Rodríguez y M. E. Pérez González.

INDICE

J. C. TAPIAS PANTEBRE, M. SALGOT DE MARÇAY, A. CASAS PONSATI. Utilidad de la técnica TDR para la medida de la variación espacial y temporal de la humedad del suelo en campos de golf	1
E. ACUÑA, R. M. POCH. Variabilidad de propiedades físicas de suelos forestales. Aplicación a la Cuenca Rasa de Cogulers (El Solsonès, prepirineo catalán).	11
M. P. GARCÍA RODRÍGUEZ, M. E. PÉREZ GONZÁLEZ. Discriminación de gypsi- soles mediante el sensor ETM+ del satélite Lansat-7	25
X. L. OTERO PÉREZ, F. MACÍAS. Caracterización y clasificación de los suelos de las marismas de la Ría de Ortigueira en relación con su posición fisiográfica y vegetación (Galicia-NO de la Península Ibérica)	37
A. HERETER, A. M. C. VERDÚ, R. BALLESTEROS, R. JOSA. Fertilización en la revegetación de áreas degradadas en el pre-Pirineo catalán	63
O. ORTIZ PERPIÑÁ, J. M. ALCAÑIZ BALDELLOU. Aplicación del flujo de CO ₂ como indicador de la calidad de la restauración en actividades extractivas a cielo abierto	71
Instrucciones a los autores	83

UTILIDAD DE LA TÉCNICA TDR PARA LA MEDIDA DE LA VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN CAMPOS DE GOLF

J. C. TAPIAS PANTEBRE*, M. SALGOT DE MARÇAY* y A. CASAS PONSATI**

* Laboratorio de Edafología. Departamento de Productos Naturales Biología Vegetal y Edafología. Facultad de Farmacia, Universidad de Barcelona. Avda. Joan XXIII s/n. 08028 Barcelona

** Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica. Facultad de Geología, Universidad de Barcelona. Martí i Franquès s/n. 08028 Barcelona

Abstract. Golf courses are often blamed to consume water in excess for the irrigation of the grass cover. To amend this image golf course managers should reduce water consumption using all the available technical improvements. The best way to establish soil water needs is by controlling systematically the soil moisture variations at different zones of the course. Among the methods available, the time domain reflectometry (TDR) technique is that offers the best perspectives because the relationship existing between the dielectric permittivity and the soil moisture content. In this paper we present the results obtained from the calibration of the TDR method to sands having a texture and composition as recommended by the USGA, as well as the application of this technique to measure both spatial and temporal variability of soil water content at different zones in two golf courses and their incidence in scheduling the irrigation needs. The results obtained show that TDR method provides accurate and fast measurements with the possibility to get automate and continuous digital readings as required in golf courses management.

Key words: Time domain reflectometry (TDR), soil moisture, volumetric humidity, dielectric permittivity, soil-water relationship, golf courses.

Resumen. Los campos de golf son a menudo criticados por un consumo excesivo de agua para regar el césped. Para corregir esta imagen, los gestores de los campos de golf deben procurar reducir al máximo este consumo utilizando todos los medios técnicos a su alcance. La mejor forma de fijar las necesidades mínimas de agua en el suelo, manteniendo una cubierta vegetal adecuada, es mediante el control sistemático de las variaciones de humedad de las distintas zonas del campo. En la actualidad, entre los métodos disponibles, la técnica de la reflectometría en el dominio de tiempos (TDR) es la que ofrece mejores perspectivas debido a la relación existente entre la permitividad dieléctrica de los suelos y su contenido de humedad. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de la calibración del método TDR para arenas de textura y composición igual a los sustratos utilizados para la construcción de los campos de golf, así como de la aplicación de la técnica en la medida de la variabilidad espacial y temporal del contenido volumétrico de agua del suelo de distintas zonas en dos campos de golf.

Palabras clave: Reflectometría en el dominio temporal (TDR), humedad del suelo, humedad volumétrica, permitividad dieléctrica del suelo, relación suelo-agua, campos de golf.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de optimizar el riego de los campos de golf se justifica por su gran proliferación durante los últimos años. En 1990 existían en Cataluña sólo 16 campos de golf, en 1992 eran 21 los que estaban en funcionamiento y en 1993 se había llegado a los 25. Actualmente hay 38, cuatro más en construcción y varios en proyecto.

La cantidad de agua que debe aportarse por medio de riego a un campo de golf se realiza a menudo sobre la base de la experiencia del cuidador o greenkeeper. No es razonable, que un aspecto tan importante, no sólo desde el punto de vista ambiental sino también económico, pueda gestionarse mediante una simple valoración empírica.

Entre los métodos no destructivos que suelen emplearse para determinar la humedad del suelo (sonda de neutrones, resistividad eléctrica, bloques de yeso, etc.), la reflectometría en el dominio temporal (TDR) está siendo considerada actualmente como la más adecuada. El método, aunque desarrollado inicialmente para localizar roturas en cables conductores, permite calcular de forma sencilla la permitividad dieléctrica.

La permitividad dieléctrica puede definirse como la polarización eléctrica adquirida por una substancia como consecuencia de la inducción generada por un campo electromagnético. La permitividad dieléctrica se expresa en faradios/m, pero generalmente se utiliza la permitividad dieléctrica relativa respecto a la del vacío, también denominada constante dieléctrica, que es adimensional.

La permitividad dieléctrica relativa de un suelo compuesto por tres componentes (aire, agua y partículas minerales) es igual a:

$$k = k_w^\alpha \theta + k_m^\alpha (1-n) + k_a^\alpha (n-\theta)$$

donde,

k_w es la permitividad dieléctrica relativa del agua

k_a es la permitividad dieléctrica del aire

k_m es la permitividad dieléctrica de las partículas minerales

n es la porosidad del suelo

θ es el contenido volumétrico en agua del suelo

α es un factor estructural, cuyo valor para suelos isótropos es 0,5

La permitividad dieléctrica relativa del agua es aproximadamente igual a 80, la de las partículas minerales constituyentes de suelo oscila entre 3 y 5, y la del aire es igual a 1. Por tanto, dado el elevado contraste entre k_w y los demás componentes del suelo, el contenido en agua es el factor dominante del valor de esta propiedad en los suelos.

La TDR mide el tiempo de ida y vuelta de un impulso electromagnético de alta frecuencia (del orden del GHz). La velocidad de propagación del impulso es función de la permitividad dieléctrica del medio, que a su vez está muy condicionada por el contenido en agua del mismo. De ahí que el método pueda aplicarse para la medida indirecta del contenido de humedad del suelo.

Cuando el impulso electromagnético encuentra un cambio de impedancia en la línea sufre una reflexión que es captada por el receptor. Para caracterizar una sonda es necesario conocer la longitud y el diámetro de las varillas, además de la separación entre ellas. A partir de estos parámetros se puede determinar la impedancia de la sonda (Krauss, 1984) mediante la ecuación siguiente:

$$Z_o = 60 \ln \left[\frac{2s}{d} \right]$$

donde,

Z_o es la impedancia de la sonda

s es la distancia máxima entre las varillas

d es el diámetro de la varilla

Las sondas pueden ser de varios tipos: de dos varillas, de tres o más varillas o bien coaxiales. Teóricamente son preferibles las sondas coaxiales debido a la distribución más homogénea de las líneas equipotenciales; sin

embargo, por la mayor facilidad de implantación en el suelo, para las medidas de campo se utilizan preferentemente las sondas constituidas por dos o más varillas paralelas. Zegelin y White (1989) han demostrado la mejor respuesta de las sondas provistas de 3 ó más varillas.

Numéricamente, para los materiales no magnéticos, la permitividad dieléctrica relativa es equivalente al cuadrado del cociente entre la velocidad de la luz en el vacío (c_o) y la velocidad de una onda de retorno (v):

$$k = \left(\frac{c_o}{v} \right)^2$$

Esta relación de velocidades es igual al cociente entre el tiempo de retorno de la onda electromagnética y la longitud de las varillas, por tanto, la permitividad dieléctrica relativa puede medirse de forma relativamente sim-

ple. La figura 1 muestra la clara diferencia entre los tiempos de llegada para suelos con contenido de humedad del 20%, 25% y 30%.

El tiempo de tránsito de ida y vuelta del impulso electromagnético viene dado por:

$$t = \frac{2l}{c_o} \sqrt{k}$$

donde:

- t es el tiempo doble de reflexión
- l es la longitud de la varilla
- k es la permitividad dieléctrica relativa del medio
- c_o es la velocidad de la luz

Para calcular la humedad volumétrica a partir de la k medida con la técnica de la TDR pueden utilizarse dos tipos de relaciones matemáticas, las empíricas y las de base física:

Relaciones empíricas	Relaciones basadas en modelos físicos
Topp <i>et al.</i> (1980)	Dobson <i>et al.</i> (1985)
Nadler (1991)	Roth <i>et al.</i> (1990)
Jakobsen y Schjonning (1993)	Whalley (1993)
Heimovaara (1993)	Van Loon <i>et al.</i> (1991)
Timlin y Pachepsky (1996)	

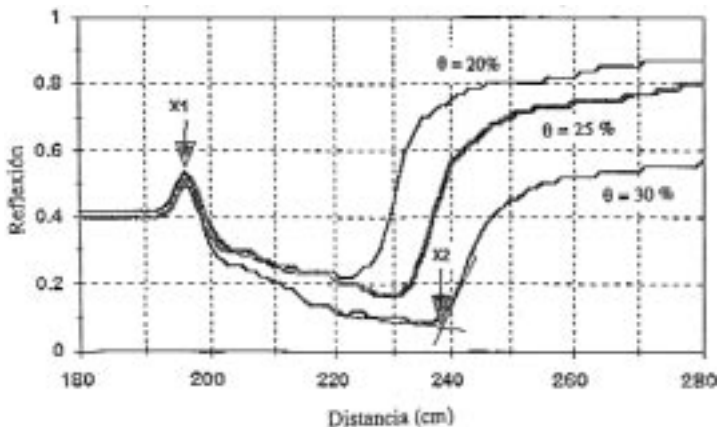


FIGURA 1: Curvas de TDR medidas en suelos con distinto contenido volumétrico de agua. Nótese el retardo en la llegada de la señal desde x1 a x2, a medida que aumenta la humedad del suelo desde 20% a 25% y 30%.

MATERIAL Y MÉTODOS

Los ensayos para determinar la utilidad de la técnica TDR para medir la humedad en el suelo se han llevado a cabo en dos campos de golf: El Real Club de Golf de El Prat, situado en el término municipal de El Prat del Llobregat, a 15 km al SW de Barcelona y junto al aeropuerto de esta ciudad y Club de Golf de Sant Cugat, situado en el término municipal de Sant Cugat del Vallés, 20 km al norte de Barcelona.

El instrumento utilizado ha sido un TRIME[®]-System fabricado por Imko GmbH, dotado de tres sondas diferentes: una de medida de la permitividad dieléctrica relativa y dos calibradas para medir directamente la humedad volumétrica en tanto por ciento. El equipo opera a una frecuencia de 2 GHz y la resolución en la medida del tiempo de tránsito de la onda electromagnética es de 3 picosegundos. Se ha dispuesto también del programa SMCAL de calibración y del TDR-SCAN de visualización gráfica de la señal de la onda en el monitor de un ordenador portátil.

Como han puesto de manifiesto Hook y Livingston (1995), la técnica de la TDR, como cualquier otra técnica instrumental de medida, está sujeta a diferentes fuentes de errores e interferencias. En nuestro caso, a pesar de que el equipo disponía de una sonda de medida que proporcionaba directamente la humedad volumétrica del suelo a partir del método de calibración de Topp *et al.* (1980),

hemos preferido utilizar una sonda que midiese la variable primaria, es decir la permitividad dieléctrica relativa del suelo.

Para determinar la humedad volumétrica se efectuó una calibración propia con diez muestras de arena de granulometría y composición análoga a la que recomienda la USGA (Powell, 1993) para la construcción de los *greens* de los campos de golf. Para ello se tomaron porciones de arena seca de 2 litros y se humedecieron en diferentes proporciones, con el fin que tuviesen una humedad volumétrica variable en un amplio espectro. El agua se añadió con jeringuilla, procurando que la distribución de agua en el substrato fuese homogénea. Posteriormente, se midió la permitividad dieléctrica de cada una de las muestras con la técnica de la TDR, en el mismo recipiente de 2 litros, ya que, según Topp y Davis (1985) el volumen involucrado por la medida de humedad es el correspondiente a un cilindro de altura igual a la longitud de las varillas de la sonda y cuyo diámetro es 1,4 veces la distancia entre ellas. Por tanto, en el caso de la sonda P3 del instrumento Trime utilizado en este estudio, el volumen de muestra medido con la sonda es de 616 cm³, dado que la longitud de las varillas es de 16 cm y su distancia de 5 cm.

A partir del ajuste por mínimos cuadrados se ha obtenido una función de calibración cúbica muy similar a la de Topp *et al.* (1980), cuya expresión es la siguiente:

$$\theta = -4,2 \times 10^{-2} + 3,15 \times 10^{-2} k - 7,94 \times 10^{-4} k^2 + 9,7 \times 10^{-6} k^3$$

Los valores experimentales de la calibración se han representado en la figura 2, conjuntamente con las principales funciones de calibración propuestas en la bibliografía. Como puede observarse, para valores de permitividad inferiores a 15 todas las funciones siguen una traza análoga, pero a partir de este valor se produce una amplia dispersión.

Para efectuar una comparación entre las diferentes funciones de calibración preexistentes, y determinar cual de ellas se ajustaba mejor a nuestras determinaciones experimentales, se llevó a cabo el tratamiento estadístico multivariable conocido como análisis de agrupación (cluster analysis). El resultado de este análisis estadístico se muestra gráficamente en

el dendrograma de la figura 3, donde puede apreciarse que las menores distancias euclídeas con nuestros datos experimentales corresponden a las funciones de van Loon *et al.*

(1991) y Topp *et al.* (1980), mientras que la expresión que menos se ajusta a nuestros datos experimentales es la de Nadler *et al.* (1991).

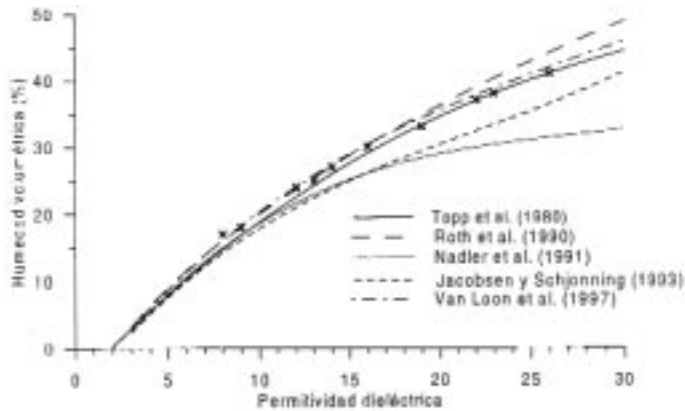


FIGURA 2: Representación gráfica de la función calibración obtenida en este estudio a partir de los valores experimentales en los substratos de los campos de golf, identificados por una (x). Se incluyen también las principales curvas de calibración calculadas por otros autores en distintos tipos de suelos.

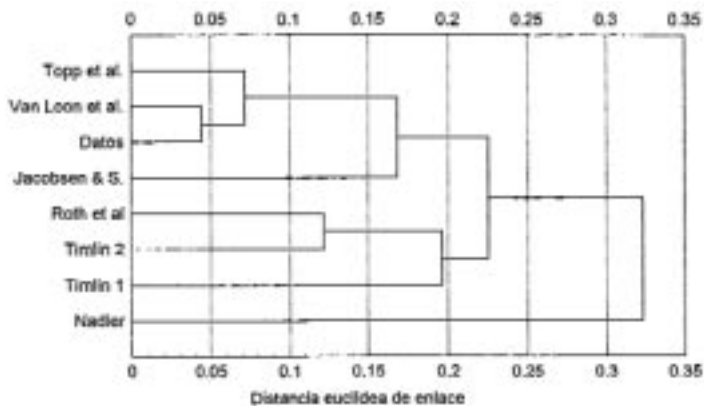


FIGURA 3: Examen de la similitud entre las diferentes funciones de calibración deducida a partir del *Cluster Analysis*. Nótese que las menores distancias euclídeas de los datos experimentales de los campos de golf considerados corresponden a las funciones de calibración propuestas por Topp *et al.* (1980) y Van Loon *et al.* (1991).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Previamente a la toma de datos en campo se llevó a cabo un análisis para averiguar la sensibilidad de la técnica de la TDR frente a las variaciones de constituyentes distintos al contenido en agua, como la textura y compo-

sición de las partículas sólidas del suelo.

En la fórmula de Roth *et al.* (1990), la humedad volumétrica se calcula según la expresión:

$$\theta = \frac{k^\alpha - n - (1 - n) k_s^\alpha}{k_w^\alpha - 1}$$

donde,

k es la permitividad dieléctrica relativa aparente del suelo

k_w es la permitividad dieléctrica relativa del agua

k_s es la permitividad eléctrica relativa de los componentes sólidos del suelo

n es la porosidad del suelo

α es el factor estructural, igual a 0,5 para suelos isótropos

La influencia de la temperatura en la permitividad dieléctrica relativa del agua se ha estudiado a partir de la fórmula de Weast (1986):

$$k_w = 78,54 \left[1 - 4,579 \times 10^{-3}(t - 25) - 1,19 \times 10^{-5}(t - 25)^2 - 2,8 \times 10^{-8}(t - 25)^3 \right]$$

donde, t es la temperatura expresada en °C

Por tanto, la permitividad dieléctrica aparente del agua disminuye de 82.2 a 78.5 cuando la temperatura pasa de 15°C a 25°C y en consecuencia influye en la determinación de la humedad volumétrica del suelo.

En la fórmula de Jacobsen y Schjonning (1993) las variables independientes, aparte de la permitividad dieléctrica relativa, son la densidad aparente y los contenidos en arcilla y materia orgánica.

$$\theta = -3,41 \times 10^{-2} + 3,45 \times 10^{-2} k - 11,4 \times 10^{-4} k^2 + 17,1 \times 10^{-6} k^3 - 3,7 \times 10^{-2} \rho_a + 7,36 \times 10^{-4} \% \text{ arcilla} + 47,7 \times 10^{-4} \% \text{ mat org}$$

donde,

k es la permitividad dieléctrica relativa aparente del suelo

ρ_a es la densidad aparente del suelo

$\% \text{ arcilla}$ es el porcentaje de arcilla del suelo

$\% \text{ mat org}$ es el porcentaje en materia orgánica del suelo

En los campos de golf la variación de estos parámetros es relativamente pequeña (Tapias, 1997): la densidad aparente del suelo oscila entre 1,1 y 1,6 g cm⁻³; el contenido en arcilla raramente llega al 5%; el contenido en materia orgánica alcanza como máximo un 8%.

El análisis de sensibilidad de estos parámetros ha demostrado que influyen muy poco en el resultado final cuando las características del suelo son relativamente homogéneas. Así, por ejemplo, si la permitividad dieléctrica relativa de un suelo es igual a 12, el contenido de humedad del suelo disminuye del 25% al 23,1% cuando la densidad aparente aumenta de 1 a 1,5 g/cm³. En cambio, como puede apre-

ciarse en la figura 4, el contenido de humedad varía sólo de 24,7% a 25% cuando el contenido de arcilla aumenta desde un 1% a un 5%.

Variaciones espaciales

En los campos de golf es muy importante poder determinar la variación espacial de la humedad volumétrica del suelo, para así poder diseñar un buen sistema de riego que distribuya el agua allí donde sea necesaria. La técnica de la TDR es ideal debido a la rapidez de ejecución de las medidas, su elevada sensibilidad y su carácter no destructivo. Estudios de este tipo han sido realizados previamente por Hokett *et al.* (1992) a nivel de laboratorio y por Rajkai y Rydén (1992) en parcelas experimentales.

Para determinar la distribución lateral de la humedad del suelo se midieron perfiles longitudinales de unos 20 metros de longitud y un espaciado entre puntos de medida de 2,5 metros, siendo la distancia entre perfiles de 2,5 metros. Estos ensayos se realizaron en ambos

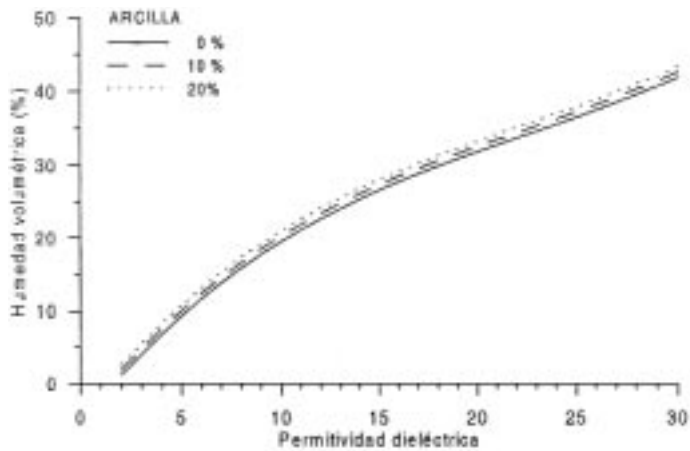


FIGURA 4: Influencia del contenido en arcilla sobre la determinación de la humedad volumétrica a partir de la permitividad dieléctrica relativa según la expresión de Jacobsen y Schjonning (1983).

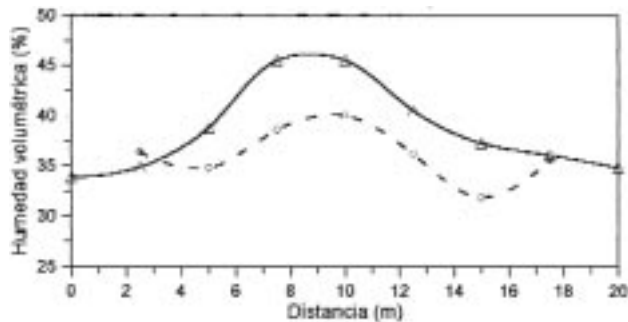


FIGURA 5: Variación espacial de la humedad volumétrica en dos perfiles del *green* Largo del campo de golf de Sant Cugat. Los máximos contenidos de humedad corresponden a la zona central del *green*.

campos de golf, sobre todo en los greens, que son las zonas más sensibles y cuidadas.

En la figura 5 se muestran los resultados de dos perfiles paralelos medidos transversalmente, el mismo día, en el *green* Largo del campo de golf de Sant Cugat. Se aprecia que en ambos perfiles se produjo un aumento de la humedad volumétrica en la zona central, donde prácticamente se alcanza el nivel de saturación. Las zonas más húmedas de los perfiles correspondían a muy ligeras depresiones en la topografía de la superficie del *green*.

Para tener una mejor representación de la distribución de humedad del suelo en todo el *green* se completaron las observaciones hasta disponer de una red regular de 64 medidas,

distribuidas sobre toda la superficie según una malla de 2,5 metros de espaciado. Las determinaciones se efectuaron sobre los mismos puntos en tres momentos diferentes del día, a las 10 de la mañana, a las 12 del mediodía y a las 4 de la tarde. Con el conjunto de las medidas se trazaron los tres mapas seriales de isóneas de humedad representados en la figura 6, donde se aprecia la irregular distribución de valores, aunque de forma general varían desde mínimos inferiores a un 20% en las zonas laterales del *green* a casi el 45% en la zona central. Estos resultados indican la importancia del drenaje, ya sea superficial o hipodérmico en la distribución del agua del suelo en los campos de golf.

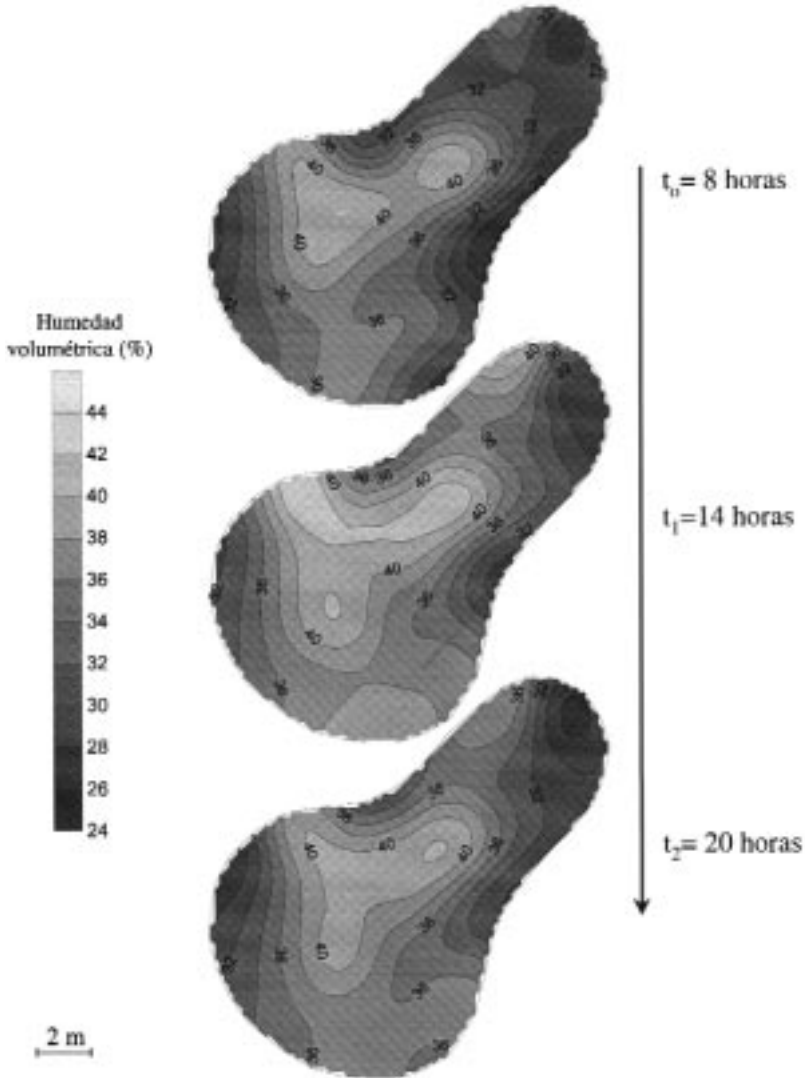


FIGURA 6: Cartografía de la variación del contenido volumétrico de agua en el *green* Largo del campo de golf de Sant Cugat en tres momentos diferentes del día.

Variaciones temporales

Aparte de las variaciones espaciales de humedad volumétrica que hemos discutido en el apartado anterior, durante las diferentes observaciones efectuadas se puso de manifiesto que la humedad del suelo variaba a lo largo del tiempo, pero no de igual forma en todos los puntos.

Generalmente, después del riego efectuado a primera hora de la mañana, el contenido de humedad tendía a disminuir con el tiempo a causa de las pérdidas por evapotranspiración y drenaje, pero en algunos casos las medidas de TDR detectaron un apreciable aumento, sin razón aparente. Para interpretar este efecto se realizaron medidas

de evolución temporal a lo largo del día en los períodos secos del año, que son los que requieren una aportación de riego prácticamente diaria.

Un ejemplo de estas determinaciones es el obtenido en el green 17, del recorrido verde, del campo de golf de El Prat, en el que se controlaron las variaciones temporales en quince puntos de medida distribuidos por toda la superficie del green durante todo un día. Las mediciones se realizaron desde las diez de la mañana hasta las nueve de la noche, en intervalos de dos horas y media.

Las variaciones en cuatro de estos puntos se muestran en la figura 7, donde puede verse

que hay dos tipos de tendencias en la evolución del contenido de humedad, según la topografía del green:

- En las zonas más altas del green, la humedad del suelo disminuye progresivamente a lo largo del tiempo.
- En las zonas bajas e intermedias, hay un ligero aumento como consecuencia del drenaje hipodérmico desde las zonas altas, para posteriormente disminuir paulatinamente.

Efectos similares de influencia de la topografía en la distribución de la humedad del suelo han sido descritos por Burt y Butcher (1985).

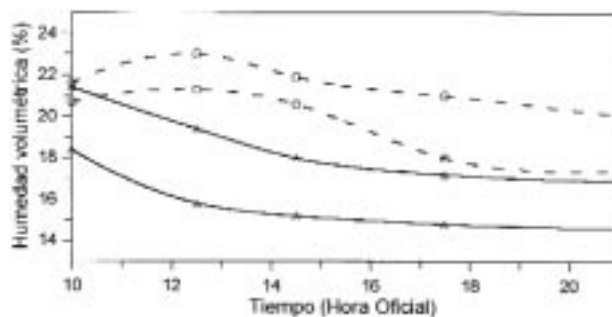


FIGURA 7: Evolución temporal del contenido de humedad en varios puntos del green 17 (recorrido verde) del campo de golf de El Prat, después de haberse efectuado el riego a las 7 de la mañana. Los valores de los puntos situados en la parte elevada se representan con el símbolo (Δ), mientras que los situados en las zonas bajas están referenciados con un círculo (O).

CONCLUSIONES

La técnica de la reflectometría en el dominio de tiempos (TDR) se ha mostrado como un método muy eficaz para la determinación de la humedad volumétrica de los campos de golf debido a su sencillez, rapidez y elevada precisión. Al mismo tiempo, cuenta con la posibilidad de automatización del registro para obtener lecturas continuas en forma digital.

Por otra parte, esta técnica ha mostrado una gran versatilidad de aplicaciones, tanto para medir la variabilidad espacial y tempo-

ral de los substratos de los campos de golf.

Finalmente, es un método que no plantea problemas ambientales como el peligro de exposición a las radiaciones de la sonda de neutrones, permite instalar un elevado número de sondas permanentes a bajo coste y no requiere complejas calibraciones como sucede con otros métodos.

REFERENCIAS

- Burt T.P. y Butcher D.P. (1985): Topography controls on soil moisture distributions. *J. Soil Sci.*, 36, 469-486.

- Hokett S.L., Chapman J.B. y Cloud S.D. (1992): Time domain reflectometry response to lateral soil water content heterogeneities. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 313-316.
- Hook W.R. y Livingston N.J. (1995): Errors in converting Time Domain Reflectometry measurements of propagation velocity to estimates of soil water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59, 35-41.
- Jacobsen O.H. y Schjonning P. (1993): Field evaluation of time domain reflectometry for soil water measurements. *J. Hydrology* 151, 159-172
- Krauss J.D. (1984): Electromagnetics. 3ª edición. Mc Graw-Hill, 775 págs.
- Nadler A., Dasberg S. y Lapid I. (1991) Time Domain Reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 938-943.
- Powell T. (1993): Investigating the options in the new USGA green construction recommendations. USGA Green Section Record, November December, pp: 7-10.
- Rajkai K. y Rydén B.E. (1992): Measuring areal soil moisture distribution with the TDR method. *Geoderma* 52, 73-85
- Roth K., Schulin R., Flühler H. y Attinger W. (1990): Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resources Research* 26, 2267-2273.
- Tapias J.C. (1997): *Estrategias de gestión hídrica en los campos de golf*. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona. 529 págs.
- Topp G.G., Davis J.L. y Annan A.P. (1980) Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Research* 16, 574-582.
- Topp G.G. y Davis J.L. (1985) Measurement of soil water content using Time Domain Reflectometry (TDR). A field evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, 19-24.
- Van Loon K.W.P., Perfect E., Groenevelt P.H. y Kay B.D. (1991) Application of dispersion theory to time domain reflectometry in soils. *Transport in porous media* 6, 391-406.
- Weast R.C. (ed.) (1986) *Handbook of Physics and Chemistry*. 67th edition. CRC Press, Boca Raton.
- Zegelin S.J. y White I. (1989): Improved field techniques for soil water content and electrical conductivity measurement using Time Domain Reflectometry. *Water Resources Research*, 25, 2367-2376.

VARIABILIDAD DE PROPIEDADES FÍSICAS DE SUELOS FORESTALES. APLICACIÓN A LA CUENCA RASA DE COGULERS (EL SOLSONÈS, PREPIRINEO CATALÁN)

E. ACUÑA y R. M. POCH

Departament de Medi Ambient y Ciències del Sòl. Universitat de Lleida. Av. Rovira Roure 177, 25198 Lleida

e-mail: eacuna@macs.udl.es

Abstract. The objectives of this work are: to know the spatial variability of soil physical properties, through the evaluation of the conventional soil map validity for discriminating soil cartographic units with different hydrological behaviour and to characterise their structure or variation model by geostatistical methods. A nested sampling of forty-eight points from two cartographic units mapped at scale 1:50.000 were done. Physical properties were determined at each point. The soils are Entisols and their main use is forestry. The results showed that the principal components are referred to the soil water retention capacity in function of the bulk density, and the porosity and the internal stoniness. The saturated hydraulic conductivity was one of the properties that discriminated the soil units. The experimental semivariograms were fitted to theoretical models. The fitting of the theoretical semivariograms was better at shorter h distances, and more disperse as h increases. The obtained semivariograms suggest that physical properties have less variability at distances shorter than 300 m.

Keys words: variability, physical properties, principal components, discriminant analysis, semivariograms

Resumen. Los objetivos del trabajo son conocer el modelo de variación espacial de las propiedades físicas del suelo, mediante la evaluación de los mapas de suelos convencionales como discriminantes de unidades cartográficas con comportamiento hidrológico distinto y caracterizar su estructura o modelo de variación mediante geoestadística. Se realizó un muestreo anidado de 48 puntos en un mapa de suelos a escala 1:50.000 en los que se determinaron propiedades físicas. Los suelos son Entisoles y su principal uso es forestal. Los resultados muestran que las componentes principales están referidas a la capacidad de retención de agua en función de la densidad aparente, volumen poroso y contenido de elementos gruesos dentro del suelo. La conductividad hidráulica saturada es una de las propiedades que discriminan las unidades de suelos. Los semivariogramas muestrales fueron ajustados a modelos teóricos. El ajuste de los semivariogramas es más claro a las distancias de h más cortas, apareciendo mayor dispersión de éstos con el incremento de h. Los semivariogramas obtenidos sugieren que las propiedades tienen menor variabilidad a distancias menores de 300 m.

Palabras clave: variabilidad, propiedades físicas, componentes principales, análisis discriminante, semivariogramas

INTRODUCCIÓN

La relación de las propiedades del suelo con el movimiento y almacenamiento de agua es muy compleja, y no única. La estimación de la variabilidad espacial de las propiedades físicas de una unidad cartográfica de suelos es muchas veces inferida cualitativamente a partir de la textura, estructura, materia orgánica o densidad aparente. De todas maneras las medidas directas de las propiedades físicas son necesarias para estimar su variabilidad. Esta información podría ser usada con los modelos físicos para predecir la infiltración y el movimiento del agua a través del suelo mediante funciones de edafotransferencia (Naney *et al.*, 1983).

La conductividad hidráulica es una característica espacialmente variable, pero es constante bajo condiciones de saturación para alguna posición determinada en el campo en un tiempo dado (Moosegar y Warrick, 1986). La alta variabilidad espacial exhibida por las medidas de la conductividad hidráulica saturada está asociada con la heterogeneidad de las propiedades del suelo (Giménez *et al.*, 1999). En particular los suelos con muchos elementos gruesos dentro del perfil y sobre la superficie presentan grandes variaciones en sus propiedades (hidrológicas principalmente) de carácter anisotrópico que se manifiestan a cortas distancias (Pla, 1999). El conocimiento de la variabilidad de las propiedades de los suelos es esencial para hacer una interpretación y una predicción correcta del funcionamiento de éstas ya sea en una unidad cartográfica de suelos o de paisaje. Hoy en día se utilizan las técnicas geoestadísticas para caracterizar la variabilidad y la estructura de variación de las propiedades físicas, químicas y morfológicas de los suelos, ya sea su variabilidad isotrópica o anisotrópica (Trangmar *et al.*, 1985).

Por otro lado, pocos estudios de campo relatan la relación de las propiedades físicas del suelo asociadas a suelos superficiales bajo

bosque, con la variabilidad espacial de dichas propiedades en el ámbito de unidades cartográficas. Generalmente éstos suelos contienen elevados porcentajes de elementos gruesos y existe poco conocimiento sobre la influencia que éstos tienen sobre procesos edafológicos e hidrológicos relativo a los suelos donde no están presentes (van Wesemael *et al.*, 1996; López, 1999; Pla, 1999). La presencia de piedras aumenta la tasa de infiltración del agua en el suelo a causa de la expansión y contracción entre las piedras y el suelo, dando como resultado la formación de canales y macroporos. Sin embargo, las piedras reducen la capacidad de almacenamiento y retención del agua de los suelos las cuales disminuyen con el aumento de éstas de manera significativa (Pritchett, 1991; Poesen y Lavee, 1994).

Los datos que aquí se analizarán son el resultado de un muestreo anidado realizado por Bodet, (1999) en la cuenca Rasa de Cogulers (El Solsonès) en el prepirineo catalán, cuyo principal uso es forestal, con suelos superficiales y alto contenido de elementos gruesos. En los puntos muestreados se determinaron varias propiedades físicas. Las cuestiones planteadas en el presente trabajo son en primer lugar cual de todos los parámetros analizados es más importante en las unidades cartográficas de suelos y si éstas variables pueden ser utilizadas para discriminar unidades cartográficas en un levantamiento de suelos convencional. En segundo lugar, se cuestiona si es posible que a partir de variables simples como las obtenidas en un levantamiento sistemático, poder inferir variables más complejas de medir en el campo como la permeabilidad o infiltración.

Los objetivos del estudio son, determinar qué variable o conjunto de variables explica(n) mejor la variabilidad de las propiedades hidrológicas del suelo en las zonas estudiadas, correspondientes a suelos superficiales y pedregosos bajo uso forestal, evaluar la validez de los mapas convencionales como discrimi-

nantes de unidades con comportamiento hidrológico distinto, determinar los semivariogramas de las distintas variables estimadas para analizar su comportamiento (variabilidad) en el espacio y, finalmente, determinar si es posible utilizar muestreos anidados para construir semivariogramas de variables edáficas que permita caracterizar su modelo de variación.

MATERIAL Y MÉTODOS

Los suelos predominantes de la cuenca en estudio son una asociación de Ustorthent lítico, franca, mezclada (calcárea), méstica y Ustorthent típico, franca, mezclada (calcá-

rea), méstica, poco profundos (Estruch, 1998). El uso de la cuenca es forestal en más del 70% (*Pinus sylvestris* y *Pinus nigra*), agrícola y en menor cuantía ganadero.

El levantamiento de los datos se realizó seleccionando dos unidades cartográficas de los suelos de 19 y 43 hectáreas respectivamente de la cuenca Rasa de Cogulers (fig. 1). Dentro de ellas se determinaron las propiedades físicas e hidrológicas del suelo con el muestreo anidado (nested sampling) a distancias mayores de 200 m entre sitios y 200, 50, 12, 3 m en las distintas etapas para tener un diseño de muestreo de 2x3x2x2x2 para un total de 48 puntos (Bodet, 1999).

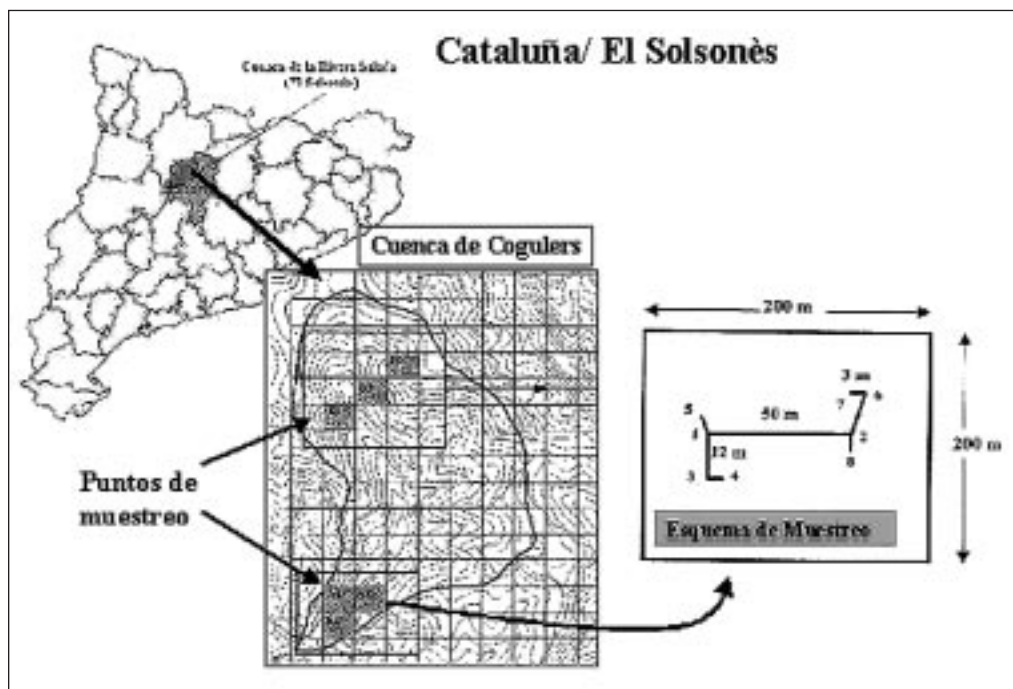


FIGURA 1. Ubicación de la cuenca de Cogulers y esquema de muestreo

Por cada sitio de muestreo se determinó, la profundidad efectiva del suelo (Psuel), profundidad del horizonte orgánico (Pho), densidad aparente (método del orificio, Daf, método del cilindro, Dac), la porosidad derivada de la de la densidad aparente (Pf de Daf

y Pc de Dac, respectivamente), conductividad hidráulica saturada (Ks) con el permeámetro de Guelph, agua retenida a capacidad de campo (Ag33) y retenida al punto de marchitez permanente (Ag1500) por el método de las placas de Richard, la capacidad de reten-

ción de agua disponible (CRAD) y la sorptividad (S) de los datos obtenidos con el permeámetro de Guelph.

La elaboración de los datos consiste en un análisis estadístico convencional, basado en el análisis de componentes principales y discriminante, y otro análisis geoestadístico de las propiedades físicas determinadas en ambas unidades cartográficas.

La determinación de los componentes principales se realizó con el programa SAS/STAT®, versión 6.06, (SAS Institute Inc., 1994) y se utilizó para caracterizar la población estudiada. El análisis discriminante se realizó mediante el STEPDISC procedure (SAS Institute Inc., 1994), el cual ejecuta el análisis discriminante *stepwise* (paso a paso) a variables cuantitativas que pueden ser útiles para discriminar entre clases (Klecka, 1980). Este análisis permite clasificar las observaciones en grupos que en este caso son las unidades cartográficas.

El instrumento geoestadístico que caracteriza el modelo de variación de una variable regionalizada es el semivariograma (Sparks y Englund, 1988). Éste contiene toda la información referente a la variable analizada, tales

como zona de influencia, anisotropía, y continuidad de la variable en el espacio. Teóricamente el semivariograma pasa por el origen, y cuando no es así, se dice que hay un efecto *nugget* o pepita, el cual es función de la escala (Ovalles, 1999) y es indicativo de un fenómeno puramente aleatorio sin ninguna correlación espacial (Samper y Carrera, 1996).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de componentes principales.

La tabla 1 muestra las correlaciones encontradas entre las propiedades de suelos determinadas en la cuenca Rasa de Cogulers (El Solsonès), provenientes del análisis del muestreo anidado. De manera general se pueden apreciar los bajos valores de correlación entre las distintas propiedades, lo cual puede estar en correspondencia con la alta variabilidad (alto coeficiente de variación) de los valores obtenidos en los sitios de muestreo, de acuerdo a los resultados de Bodet (1999). En ellos la mayoría de las propiedades analizadas muestran mayor variabilidad a distancias cortas no incluidas en el diseño empleado para el levantamiento de datos.

TABLA 1. Matriz de correlación de las propiedades físicas donde se aplicó el muestreo anidado, Rasa de Cogulers (El Solsonès).

Variable	Psucl	Pho	Pvol	Dac	Daf	Pc	Pf	CRAD	Ag33	Ag1500	Ks	S
Pesuel	1.00											
Pho	0.13	1.00										
Pvol	-0.02	-0.04	1.00									
Dac	0.01	-0.26	0.24	1.00								
Daf	-0.33	-0.52	0.28	0.41	1.00							
Pc	-0.01	0.13	-0.27	-0.98	-0.36	1.00						
Pf	0.33	0.53	-0.29	-0.41	-0.99	0.37	1.00					
CRAD	-0.39	-0.16	0.12	0.26	0.31	-0.24	-0.32	1.00				
Ag33	-0.001	-0.10	0.18	0.18	0.25	-0.18	-0.26	0.67	1.00			
Ag1500	0.37	0.06	0.18	0.04	0.05	-0.04	-0.06	0.06	0.76	1.00		
Ks	0.09	0.69	0.22	-0.21	-0.25	0.08	0.25	-0.18	-0.10	0.09	1.00	
S	-0.07	0.05	0.08	0.07	0.02	-0.07	-0.02	0.04	-0.01	-0.03	0.18	1.00

Psucl (profundidad efectiva del suelo, cm); Pho (profundidad del horizonte orgánico, cm); Daf (densidad aparente por el método del hoyo, Mg/m³); Dac (densidad aparente por el método del cilindro Mg/m³); Ks (conductividad hidráulica mm/h); Pvol (pedregosidad en volumen, %); Ag33 (agua retenida a capacidad de campo, %); Ag1500 (agua retenida al punto de marchitez permanente, %); Pc (porosidad total derivada de Dac %); Pf (porosidad total derivada de Daf, %); CRAD (capacidad de retención de agua disponible, %); S (sorptividad, cms-1/2).

Ambas densidades aparentes (método del cilindro y orificio) presentan altos valores de correlación negativos con la porosidad total derivada de sí mismas. Entre sí (la porosidad total) presentan un valor de correlación de 0.37. Este bajo valor puede deberse a que el segundo método tiene en cuenta los elementos gruesos, y el primero no.

La profundidad del horizonte orgánico muestra correlaciones positivas con la porosidad total (0.53) derivada del método del hoyo y también con la conductividad hidráulica saturada (0.69). La presencia de elementos gruesos (pedregosidad en volumen) presenta una correlación casi uniforme con todas las propiedades pero a un nivel bajo.

La variable profundidad efectiva del suelo muestra un mayor grado de correlación positiva con las propiedades como la retención de agua a 1500 kPa (0.37), así como también con porosidad total (0.33) derivada del método del orificio.

Los parámetros de capacidad de retención de agua en el suelo presentan correlaciones altas entre sí: la CRAD presenta correlaciones con la capacidad de retención de agua a 33 kPa y con la capacidad de retención de agua a 1500 kPa de 0.68 y 0.76 respectivamente.

Por otro lado, para la elección del número de componentes principales se tomaron aquellos componentes cuyos valores son mayores de 1 (Tabla 2). Como podemos apreciar la evaluación nos sugiere retener un total de cinco componentes principales que explican entre ellos más del 82.6% de la variabilidad total. El primer componente explica 31.22 % de la varianza total y se compone principalmente por los vectores positivos (Tabla 3) de la densidad aparente (Daf 0.43 y Dac 0.36), capacidad de retención de agua disponible (0.29) y agua retenida a 33 kPa (0.26), y por el vector negativo de la porosidad total derivada de la Daf (-0.44). Esta primera componente puede interpretarse como de compacidad, relacionada con la capacidad de retención de agua disponible del suelo.

TABLA 2. Evaluación de las componentes principales del muestreo anidado en la Rasa de Cogulers (El Solsonès)

Evaluación de Componentes Principales				
	Nº Componentes principales	Autovalores	Proporción	% de la variabilidad explicada
PRIN1	1	3,74	0.3122	31.22
PRIN2	2	2,0	0.1674	16.74
PRIN3	3	1,6	0.1336	13,36
PRIN4	4	1,4	0.1178	11.78
PRIN5	5	1,1	0.0927	9.27

La segunda componente explica un 17% de la varianza total y está representada principalmente por la retención de agua a 1500 kPa y a 33 kPa con valores de 0.57 y 0.47, respectivamente, así como también la profundidad del horizonte orgánico (0.33). Esta componente podría ser interpretada como de

capacidad de retención de agua del suelo y se correlaciona positivamente con la gran mayoría de variables de manera discreta dado los bajos valores de los autovalores.

La tercera componente explica un 13.3% de la varianza total y podría ser interpretada como una componente relacionada negativa-

mente con el volumen poroso del suelo, representada por la densidad aparente derivada del cilindro (0.42), por los vectores negativos de la porosidad total derivada de la densidad aparente del cilindro (-0.48) y del agua retenida a 33 kPa (-0.41). La cuarta componente explica un 12% y está referida principalmente a la variable conductividad hidráulica (0.41), a la sorptividad (0.33) y con un

vector negativo de la profundidad efectiva del suelo de (-0.57). Es difícil interpretar esta componente ya que el espesor del suelo podría influir negativamente en la conductividad hidráulica y la sorptividad. Sin embargo, podríamos referirnos a la drenabilidad o a la capacidad de infiltración del agua en suelo como importantes para esta componente.

TABLA 3. Vectores principales de las variables medidas en la Rasa de Cogulers (El Solsonès)

/Variables	PRIN1	PRIN2	PRIN3	PRIN4	PRIN5
Pesuel	-0.16	0.31	0.08	-0.57	0.20
Pho	-0.31	0.33	0.21	0.27	-0.17
Pvol	0.18	0.25	0.25	0.20	0.41
Dac	0.36	0.09	0.42	-0.27	-0.27
Daf	0.44	-0.13	-0.01	0.13	0.35
Pc	-0.33	-0.14	-0.47	0.22	0.28
Pf	-0.44	0.12	0.01	-0.13	-0.35
CRAD	0.29	0.12	-0.25	0.31	-0.50
Ag33	0.26	0.47	-0.41	0.05	-0.16
Ag1500	0.09	0.57	-0.29	-0.17	0.21
Ks	-0.22	0.34	0.32	0.41	0.18
S	0.02	0.07	0.25	0.33	-0.06

Pesuel (profundidad efectiva del suelo, cm); Pho (profundidad del horizonte orgánico, cm); Daf (densidad aparente por el método del hoyo, Mg/m³); Dac (densidad aparente por el método del cilindro Mg/m³); Ks (conductividad hidráulica mm/h); Pvol (pedregosidad en volumen, %); Ag33 (agua retenida a capacidad de campo, %); Ag1500 (agua retenida al punto de marchitez permanente, %); Pc (porosidad total derivada de Dac %); Pf (porosidad total derivada de Daf, %); CRAD (capacidad de retención de agua disponible, %); S (sorptividad, cms-1/2).

La quinta componente está referida principalmente a la pedregosidad dentro del perfil del suelo y la densidad aparente determinada por el método del hoyo con valores de autovectores de 0.41 y 0.35. Se destaca también el vector negativo de la capacidad de retención de agua disponible (-0.50). Esta componente está referida a la capacidad de almacenamiento de agua en función del contenido elementos gruesos dentro del perfil del suelo. Pritchett, (1991), argumenta que el incremento de contenido de piedras en el perfil de los suelos forestales aumenta el drenaje (o la infiltración del agua en el suelo), a su vez incrementa el volumen de los macroporos y disminuye la capacidad de almacena-

miento del agua.

Análisis Discriminante

El análisis discriminante ha partido de la hipótesis de que las unidades cartográficas estudiadas pertenecen a dos poblaciones distintas.

Los resultados de éste análisis nos muestran que la distancia general al cuadrado entre las unidades cartográficas muestreadas fue de $D^2_{12}=4.84$. Ello significa que los puntos muestreados en la unidad cartográfica uno serán clasificados desde un centroide con valor cero hasta el límite de 4.84 y todas aquellas observaciones que estén por encima de este rango serán clasificadas en la segun-

da unidad cartográfica y viceversa. Es decir, este valor se toma como umbral para clasificar una observación en uno u otro grupo o unidad cartográfica como es el caso.

El modelo realiza una restitución de los valores para comenzar a seleccionar las variables de mayor poder discriminante en la función discriminante. Calcula también la eficacia de dicha función para clasificar todas las observaciones en sus respectivos grupos o unidades cartográficas como este caso.

Se aprecia en la tabla 4 que, 19 de las 24 observaciones tomadas en la unidad cartográfica uno fueron clasificadas en ese grupo y 5 observaciones fueron clasificadas en la unidad cartográfica dos, mostrando así el modelo una eficiencia alrededor del 80%. En la unidad cartográfica dos el modelo actuó con mayor eficiencia (87%), es decir de las 24 observaciones, clasificó 21 para esa unidad y 3 para la uno. Esto puede significar que hay mayor homogeneidad en la unidad cartográfica dos sin precisar aún que variable o variables contribuyen a este comportamiento.

TABLA 4. Número de observaciones y porcentaje clasificado dentro de cada unidad cartográfica

Unidad Cartográfica	1	2	Total
1	19 79.17	5 20.83	24 100
2	3 12.50	21 87.50	24 100
Total	22	26	48
Porcentaje	45.83	54.17	100
Previo	0.50	0.50	

La selección de las variables que mejor discriminan en las unidades cartográficas se realizó en nueve pasos. El modelo clasificó cuatro variables, profundidad efectiva del suelo, seguida de la porosidad total derivada del método del hoyo, la porosidad derivada del método del cilindro, la densidad aparente por el método del hoyo, profundidad del horizonte orgánico y la conductividad hidráulica considerando su R^2 . Después de ser introducida la última variable, el modelo removió las variables densidad aparente y la porosidad derivada de la misma. Esto puede ser debido al grado de correlación entre ellas y a su bajo poder discriminante respecto de K_s .

Las propiedades que más definen, en este caso, las unidades cartográficas del mapa de suelos son profundidad efectiva del suelo, porosidad derivada de la densidad aparente

(método cilindro), profundidad del horizonte orgánico y la conductividad hidráulica (Tabla 5). Propiedades que tienen la ventaja de ser de fácil determinación (las tres primeras) y al estar relacionadas con la conductividad hidráulica saturada, podrían permitir inferirla para cada una de las unidades.

Análisis geoestadístico

Para el análisis de las variables a través de los semivariogramas se optó por el *modelo esférico*, se caracteriza por alcanzar la meseta a una distancia finita ($h=a$). Es indicativo de fenómenos continuos con un conjunto a lo sumo numerable de discontinuidades, es decir, fenómenos cuya representación puede presentar quiebros. Estos quiebros se pueden producir a distintas escalas con fluctuaciones de pequeña amplitud pero gran fre-

TABLA 5. Resumen del análisis discriminante para las variables medidas en la Rasa de Cogulers (El Solsonès)

Paso	Variable		R ² Parcial	F Estadístico	Prob>F	Wilks' Lambda	Prob<Lambda
	Retenida	Removida					
1	Pf		0.28	18.23	0.0001	0.716	0.0001
2	Pesuel		0.12	6.24	0.0161	0.628	0.0001
3	Pc		0.07	3.61	0.0638	0.581	0.0001
4	Daf		0.06	3.03	0.0884	0.542	0.0001
5	Pho		0.05	2.30	0.1367	0.514	0.0001
6	Ks		0.08	3.79	0.0584	0.470	0.0001
7		Daf	0.04	2.12	0.1530	0.495	0.0001
8		Pf	0.01	0.84	0.3630	0.505	0.0001

Psuel (profundidad efectiva del suelo, cm); Pho (profundidad del horizonte orgánico, cm); Daf (densidad aparente por el método del hoyo, Mg/m³); Dac (densidad aparente por el método del cilindro Mg/m³); Ks (conductividad hidráulica mm/h); Pc (porosidad total derivada de Dac %); Pf (porosidad total derivada de Daf, %).

uencia, como de amplitud grande y frecuencia baja lo cual se corresponde con las propiedades cartográficas en un mapa de suelos (Samper y Carrera, 1996; Ribes, 1996; Ovalles, 1999).

Dada la gran dispersión de los datos de conductividad hidráulica y la sorptividad se elaboraron los semivariogramas muestrales y el semivariograma teórico con el logaritmo natural de los datos de campo.

El ajuste del modelo teórico al semivariograma muestral se realizó con el método de

mínimos cuadrados (Samper y Carrera, 1996).

En las figuras 2 y 3 se presentan los semivariogramas para la conductividad hidráulica saturada. A pesar de elaborar el semivariograma muestral con el logaritmo natural de los datos y lograr un mejor ajuste del modelo teórico, persiste la dispersión de los puntos a medida que aumenta la distancia (h), existiendo muchas fluctuaciones de los valores (poca correlación entre los puntos), aunque presenta un ajuste bastante significativo a menor distancia (h).

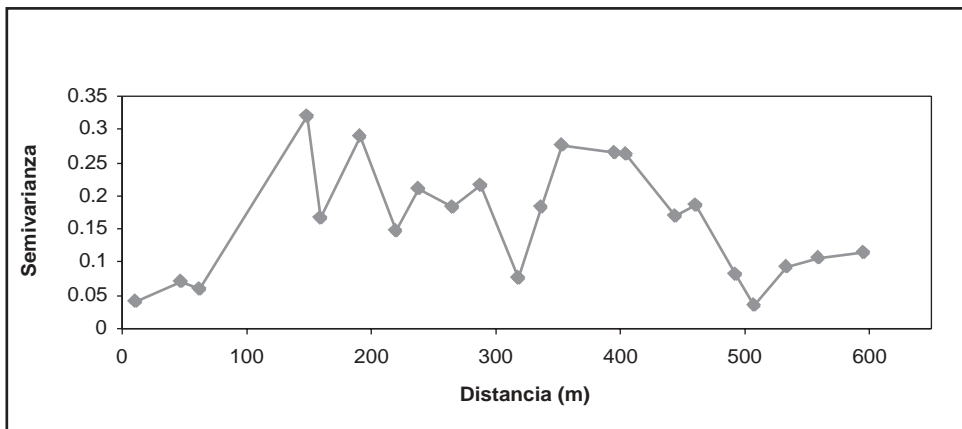


FIGURA 2. Semivariograma muestral para Ks

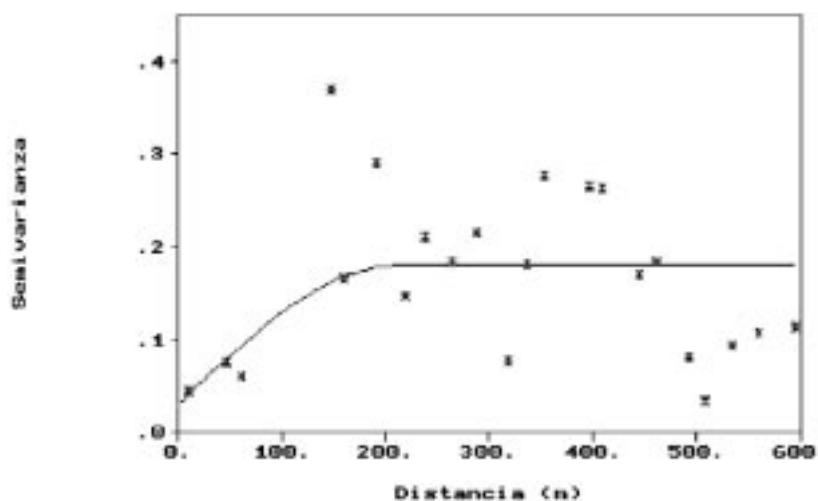


FIGURA 3. Semivariograma para Ks (modelo esférico, pepita=0.03, meseta=0.15 y alcance =230).

Puede interpretarse entonces que para tener una mejor idea de la variabilidad de Ks se debió realizar un muestreo más intenso a menor distancia del planteado en el muestreo anidado. A pesar de ello Bodet (1999) encontró que la mejor distancia de muestreo fue de 12 metros, aunque también sus cálculos estadísticos mostraron un alto coeficiente de variación. Un comportamiento similar muestra el resto de las variables mostrando diver-

sos valores de pepita (fig. 4 y 5), como la densidad aparente determinada por el método del hoyo, a excepción de la sorptividad (fig. 6 y 7) el semivariograma teórico que más ajustó los datos fue un “pepita puro”, lo que significa que la variable tiene un comportamiento irregular y quizás discontinuo, y parte de su estructura de variabilidad espacial se concentra a distancias más cortas que las observadas.

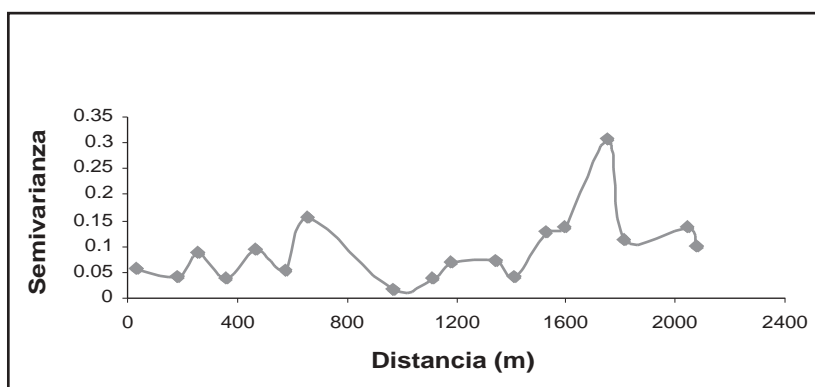


FIGURA 4. Semivariograma muestral para la densidad aparente determinada por el método del hoyo

En este sentido Oliver y Webster (1986) indican que, de los resultados de un muestreo anidado y lineal (en transecto), toda la variabilidad espacial de las propiedades físicas ocurre a distancias cortas y que a mayores intervalos de muestreo la variabilidad espa-

cial de dichas propiedades era más compleja, sin correlación. En nuestro caso la distancia entre los dos sitios de muestreo se encuentra mas allá de los 1000 metros, por lo que la escala de variación se hace mayor y no es detectada por los semivariogramas.

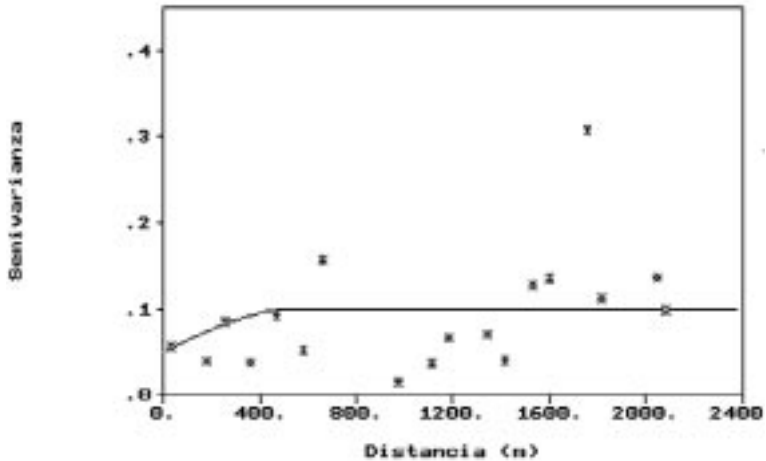


FIGURA 5. Semivariograma teórico para densidad aparente método hoyo (modelo esférico; pepita = 0.05; meseta = 0.05; alcance = 550)

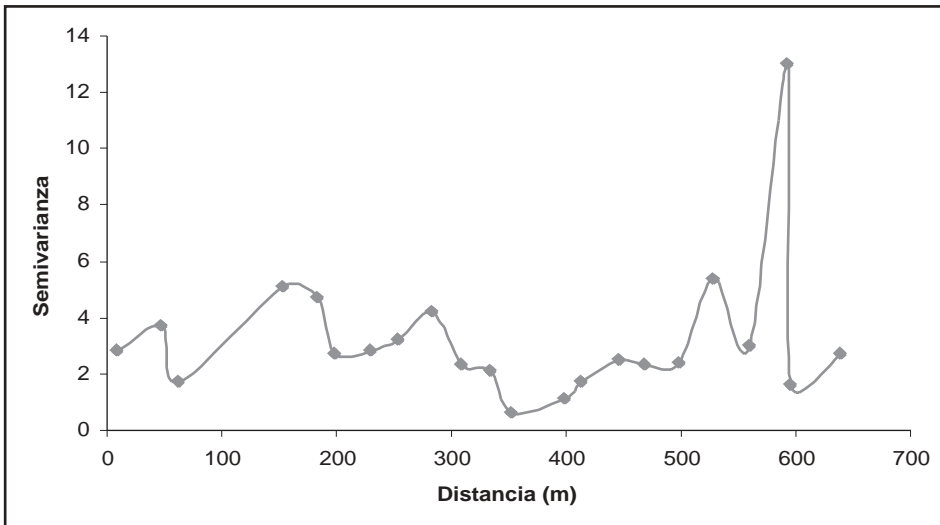


FIGURA 6. Semivariograma muestral para la Sorptividad

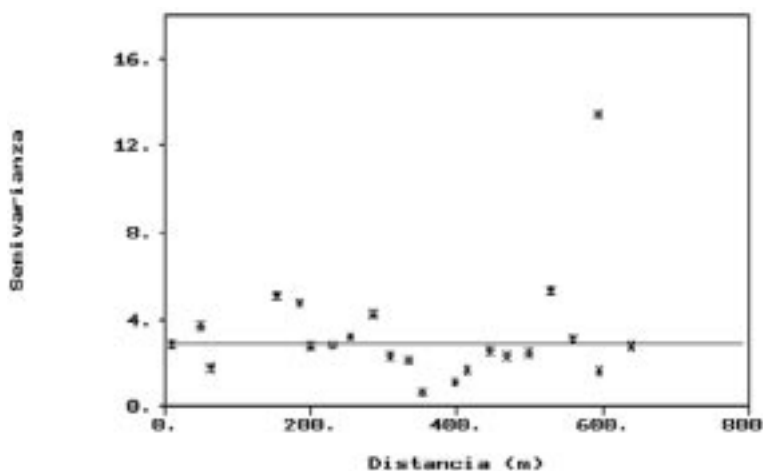


FIGURA 7. Semivariograma teórico para la sorptividad (modelo pepita puro)

La tabla 6 muestra un resumen de las partes de los semivariogramas teóricos calculados para las diferentes variables estudiadas, donde se pueden observar los diferentes valo-

res de pepita, meseta y alcances. Es importante decir aquí que el alcance promedio de todas las variables es aproximadamente 300 metros.

TABLA 6. Resumen de los valores de los semivariogramas teóricos para todas las variables estudiadas en la Rasa de Cogulers (El Solsonès)

Variable	Pepita	Meseta	Alcance (m)
Profundidad efectiva del suelo (cm)	22	26	350
Profundidad del horizonte orgánica (cm)	8	3	90
Pedregosidad en volumen (%)	22	30	80
Densidad aparente (método del hoyo, Mg/m ³)	0.08	0.085	650
Densidad aparente (método del cilindro, Mg/m ³)	0.01	0.114	750
Porosidad total (derivada Da del cilindro, %)	100	210	300
Porosidad total (derivada Da del hoyo, %)	240	17	300
Agua retenida a 33 kPa (%)	0	100	320
Agua retenida a 1500 kPa (%)	47	8	180
Capacidad de retención de agua disponible (CRAD, %)	20	8	180
Conductividad hidráulica saturada (mm/h)	0.03	0.15	230
Sorptividad (cms ^{-1/2})	3	0.00	190

CONCLUSIONES

Partiendo de la base de unidades cartográficas homogéneas, los bajos valores de correlación obtenidos entre las propiedades físicas medidas muestran que no hay una sola

propiedad que tipifique las dos unidades de suelo estudiadas.

El análisis de las componentes principales indica que son necesarias cinco componentes para explicar la variabilidad en dichas unidades. Ellas están referidas principalmen-

te a la relación de la capacidad de almacenamiento de agua disponible en el suelo en función de la densidad aparente y el volumen poroso del suelo.

De acuerdo al análisis discriminante se ha encontrado una relación entre las propiedades medidas, destacándose profundidad efectiva del suelo, la porosidad total derivada de la densidad aparente método del cilindro, la profundidad del horizonte orgánico y, por último, la conductividad hidráulica saturada. Éstas pueden ser utilizadas para la separación de unidades cartográficas homogéneas con comportamiento hidrológico diferente en los suelos del área mediante distancias de 30 y < 12 metros respectivamente.

Los semivariogramas obtenidos ajustados al modelo esférico sugieren que existe una menor variabilidad a distancias cortas, que corresponden a menos de 300 m en el conjunto de datos de las dos unidades.

A pesar de que el muestreo anidado con 48 muestras ha permitido construir e interpretar los semivariogramas, para mejorar la explicación del comportamiento de las propiedades estudiadas, determinar con certeza su variabilidad espacial y lograr semivariogramas estables sería necesario, probablemente, aumentar el número de muestras.

REFERENCIAS

- Bodet, A. (1999). Aplicació del mètode de mostreig en etapes i anàlisi geoestadística a les propietats físiques del sòls de la Rasa de Cogulers (El Solsonès). Universitat de Lleida. España.
- Estruch, J. (1999): Informació del territori i càlcul de l'escolament superficial mitjançant el model HEC-1. Aplicació al mapa de sòls 1:50.000 de la Conca de Canalda (El Solsonès). Universitat de Lleida. España
- Giménez, D., Rawls, W.J., Lauren, J.G. (1999): Scaling properties of saturated hydraulic conductivity in soil, *Geoderma* 88, 205-220.
- Klecka, W.R. (1980): Discriminant analysis, Sage Paper Series on Quantitative Application in the Social Sciences. Series. No 07-019 Beverly Hills, Sage Publications.
- López, F.R. (1999): Suelos pedregosos. Características que afectan la calidad edáfica. Importancia y conocimiento en Venezuela. En: Suelos Pedregosos, R. López Falcon y F. Delgado Espinoza (eds). Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo. Venezuela, 1-18.
- Moosegar A., Warrick A.W. (1986): Hydraulic conductivity of saturated soil: field method. En: Methods of soil analysis, Part 1, Physical and mineralogical methods, Agronomy Monograph, No 9, 735-768. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, 677.
- Naney, J.W., Ahuja, L. R., Barnes, B.B, (1983): Variability and interrelation of soil-water and some related soil properties in a small watershed. Agricultural Research Service, Durant, Oklahoma. USA.
- Oliver M.A., Webster R. (1986): Combining nested and linear sampling for determining the scale and form of spatial variation of regionalized variables, *Geographic analysis* 18, 3.
- Ovalles, V.F. (1999): Evaluación de tierras en zonas tropicales. Uso de la geoestadística. II curso de Posgrado de Manejo de suelos tropicales. Centre Tecnològic Forestal de Catalunya, Universitat de Lleida. España.
- Pla, I. (1999): Características y propiedades de los suelos pedregosos. En: Suelos Pedregosos, R. López Falcon y F. Delgado Espinoza (eds). Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo, Venezuela, 33-39.
- Poesen, J., Lavee, H. (1994): Rock fragments in topsoil: Significance and processes. *Catena*, 23: 1-28.

- Pritchett, W.L. (1991): Suelos Forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento. Editorial LIMUSA. Grupo Noriega Editores, Mexico, D.F, Mexico.
- Ribes, M. (1996): Estudio de la compactación de suelos sometidos a un proceso de nivelación laser. Tesis doctoral. Universitat de Lleida. España.
- Samper C.F., Carrera R.M. (1996): Geostatística. Aplicaciones a la hidrología subterránea. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Universidad Politécnica de Catalunya.
- SAS Institute Inc., (1994): SAS/STAT® User's guide, Version 6, Volumen 1 y 2, Fourth Edition. Cary, NC: SAS institute Inc., USA.
- Soil Survey Staff, (1975): Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. USDA, Agriculture handbook No. 436. USA.
- Sparks, A., Englund, E. (1988): GEO-EAS (Geostatistical environmental assessment software) User's guide. Environmental Monitoring Systems Laboratory Office of Research and Development. Las Vegas, Nevada. U.S.A.
- Trangmar, B.B., Yost, R.S., Uehara, G. (1985): Spatial dependence and interpolation of soil properties in West Sumatra, Indonesia: Anisotropic variation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, 1391-1395.
- Van Wesemael, B., Poesen, J., Kosmas, C.S., Danalatos N.G., Nachtergaele J. (1996): Evaporation from cultivated soils containing rock fragments. *J. Hydrology* 182, 65-82.

DISCRIMINACIÓN DE GYPSISOLES MEDIANTE EL SENSOR ETM+ DEL SATÉLITE LANDSAT-7

M. P. GARCÍA RODRÍGUEZ y M. E. PÉREZ GONZÁLEZ

Dep. Análisis Geográfico Regional y Geografía Física. Fac. Geografía e Historia Univer. Complutense de Madrid. Ciudad Universitaria. 28040 Madrid, Proyecto PR- 48/01-9852, Mpilarg@eucmax.sim.ucm.es

Abstract. In this paper the ETM+ sensor of Landsat-7 is used to discriminate soils developed on materials with marls and gypsums in the Southeast of the Community of Madrid (Spain). The gypsisol distribution, their bright colours, the scarce vegetal coverland and the high level of erosion let both a visual and a digital discrimination as opposed to other covers and materials. In this respect the ETM+ images are useful to study soil variability in semi-arid environments, although is very difficult discriminate soil units. To accomplish the present research work, a visual analysis has been carried out (through various spectral band combinations, spectral and radiometric enhancements), together with a digital analysis and a supervised classification through minimum distance criteria.

Key words: Remote sensing, Landsat-7 ETM+, gypsisols.

Resumen. En este trabajo se utiliza el sensor ETM+ del satélite Landsat-7 con el objetivo de diferenciar los suelos desarrollados sobre materiales margo-yesíferos en el sudeste de la Comunidad de Madrid. La distribución de los gypsisoles, sus colores claros, su escaso recubrimiento vegetal y el alto grado de erosión, permiten su discriminación, tanto visual como digitalmente, frente a otras cubiertas y materiales. Así, las imágenes del sensor ETM+ resultan útiles para estudiar la variabilidad de los suelos en zonas semiáridas, aunque resulta difícil llegar a precisar más allá del nivel de asociación. Para efectuar el presente estudio se ha realizado un análisis visual (mediante composiciones en color de distintas bandas y mejoras radiométricas y espectrales), un análisis digital y se ha obtenido una clasificación supervisada utilizando el criterio de la mínima distancia.

Palabras clave: Teledetección, Landsat-7 ETM+, gypsisoles.

INTRODUCCIÓN

El sensor ETM+ del satélite Landsat 7 fue puesto en funcionamiento por la NASA en abril de 1999, empezándose a procesar sus imágenes en Europa a partir de junio de ese mismo año. Respecto a su precursor, el sensor TM del Landsat 5, tiene algunas mejoras, tanto espaciales como radiométricas. El sensor ETM+ tiene una mayor resolución espacial en los canales térmicos, ya que pasa de

los 120 m en el TM a los 60 m; además este sensor aunque mantiene los 30 m de resolución en las bandas del visible e infrarrojo próximo y medio, incluye una banda pancromática con 15 m de resolución. Las bandas térmicas se desdoblán en dos canales, el 6 y 8, con una longitud de onda de 11,5 a 12,5 y de 10,5 a 11,5 micrómetros respectivamente. Por estas razones supone una mejora para los estudios del medio físico.

El objetivo de este trabajo es tratar de discriminar la superficie dominada por gypsisoles en el sureste de la comunidad de Madrid, en el límite con las provincias de Toledo y Cuenca, y comparar los resultados con los obtenidos por otros investigadores con los sensores TM y MSS del Landsat-5.

Se ha escogido este tipo de suelos por ser representativo del sur de la Comunidad de Madrid, suficientemente extenso y fácilmente observable desde el espacio debido a sus colores claros y al escaso recubrimiento vegetal. Además están perfectamente delimitados en el mapa de suelos 1:200.000 realizado por Monturiol y Alcalá (1990a), así como en otras cartografías tradicionales (Gumuzio y Alvarez, 1984; Nieves y Gómez, 1992; Olmos, 1996) y mediante teledetección (Labrandero y de Lera, 1988). Asimismo, los gypsisoles españoles se han reconocido internacionalmente (Duchaufour, 1977) y en el centro de la península ibérica alcanzan una considerable extensión e importancia, siendo además muy susceptibles a la erosión.

Los suelos de zonas semiáridas han sido objeto de estudio, mediante técnicas de teledetección, por numerosos autores. Entre ellos destacamos los trabajos de Goossens *et al.* (1998, 1999), Koch (2000) y Schmid *et al.* (2000) en los que se exponen las dificultades para discriminar los diferentes materiales. Algunos de estos estudios se basan en datos obtenidos con sensores de gran resolución espectral transportados en aviones. Con estos sensores multiespectrales se obtienen imágenes de una mayor calidad, lo que unido a la mayor resolución espacial (próxima a los cinco metros) facilita la discriminación de las cubiertas.

En cuanto a la aplicación de la teledetección en la cartografía de suelos, García y Muñoz (1998) han revisado numerosos trabajos que muestran la complejidad de factores y propiedades del suelo que intervienen en la respuesta espectral.

A pesar de todas estas dificultades, el objetivo del presente estudio es comprobar, en un área bien conocida, si el sensor ETM+ tiene alguna ventaja respecto a otros sensores y si sirve de complemento a la cartografía tradicional, con el fin de extrapolar estos resultados a otras áreas donde aún no estén suficientemente bien cartografiadas estas unidades de suelos.

ÁREA DE ESTUDIO

En la Comunidad de Madrid los gypsisoles se localizan (Monturiol y Alcalá, 1990a) en el sudeste de la provincia, entre los ríos Tajo, Tajuña y Jarama, en el límite con las provincias de Cuenca y Toledo (Fig. 1). También aparece una pequeña mancha en el nordeste de la Comunidad, en las proximidades de Torrelaguna. Dada la mayor extensión de la primera área nos hemos centrado en ella para realizar el estudio.

Los materiales sobre los que se desarrollan estos suelos corresponden a sedimentos químicos y detríticos del Mioceno del relleno Terciario de la cuenca del Tajo, depositados en una cuenca endorreica, bajo condiciones áridas: margas, yesos, arcillas, etc. Estos materiales conforman escarpes que pueden alcanzar más de 100 metros, aunque se localizan también en los conos de deyección e incluso en los fondos de los valles. Los colores varían desde blancos a grisáceos. Se han datado (IGME 1968 y 1975a, b, c, d) como Burdigaliense-Vindoboniense, con una gran variedad litológica que incluye numerosos cambios laterales de facies. Las mayores extensiones corresponden a formaciones en las que alternan capas de yesos con cristales especulares, yesos masivos y margas grises, muchas de ellas yesíferas, dominando los tonos grises (concretamente en el área de Ontígola los colores varían desde 10YR 7/2 y 5Y 6/2), aunque también hay materiales más blancos (yesos sacaroideos) o verdosos. Estas facies ocupan la parte central de la cuenca del



Fuente: Mapa de Asociaciones de Suelos de la Comunidad de Madrid (Monturiol y Alcalá, 1990)

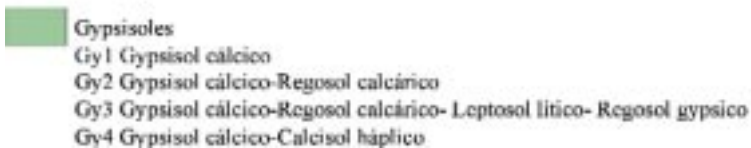


FIGURA 1. Área de estudio y localización de las asociaciones de los suelos del sureste de Madrid.

Tajo y tienen intercalaciones de sales magnésicas como glauberita, thenardita y mirabilita e incluso sal común. Hacia los bordes se intercalan con facies detríticas constituidas por arcillas pardo-rojizas. También existen intercalaciones con calizas, que constituyen facies intermedias entre las detríticas del borde y las evaporíticas del centro de la cuenca. Sobre estos materiales se depositaron, recubriéndolos en parte, las calizas lacustres del Pontense.

El área de estudio tiene un clima Mediterráneo templado, con una temperatura media anual entre 12 y 16° C, una precipitación media entre 400 y 600 mm y una E.T.P de 800 a 900 mm.

Biogeográficamente corresponde a la región Mediterránea, en la provincia castellano-maestrazgo-manchega, sector manchego (Peinado y Rivas, 1987). En cuanto al biocli-

ma, pertenece al piso mesomediterráneo. La vegetación es muy escasa, constituida fundamentalmente por plantas gipsícolas y calcícolas, adaptadas a climas xéricos, la mayoría correspondientes al estrato arbustivo.

Según Monturiol y Alcalá (1990 a), los suelos clasificados como gypsisoles (FAO, 1989), corresponden, la mayoría, a gypsisoles cálcicos, y se encuentran en asociación con regosoles gípsicos y calcáricos y con calcisoles háplicos y leptosoles líticos. A su vez, como suelo asociado aparece junto con fluvisoles calcáricos, regosoles calcáricos y leptosoles eútricos. Según estos autores son suelos muy calizos, con pH elevado, alta saturación en bases, textura franco arcillosa y con problemas de salinidad. Su extensión en la comunidad de Madrid es de aproximadamente 25.500 ha, ocupando un 3,2% de la misma. Según Soil Taxonomy (U.S.D.A., 1999) estos suelos

se clasificarían como Aridisoles (Gipsisorthids). Su régimen de humedad es xérico y el de temperatura méxico.

Actualmente, el área de estudio está fuertemente antropizada, localizándose, sobre ella o en sus alrededores, municipios con elevada densidad demográfica: Aranjuez, Ciempozuelos, Chinchón, Fuentidueña de Tajo, etc. Además se encuentra en el área de influencia de Madrid, por lo que la proliferación de residencias secundarias conduce a la desaparición de gran parte de estos suelos. En el Mapa de Capacidad de Potencial de Uso Agrícola de la Comunidad de Madrid (Monturiol y Alcalá, 1990 b), los gypsisoles aparecen en tres clases y cuatro subclases: Bs (limitados por un pequeño contenido salino), Ch (con problemas hidromórficos), Cs (con sales), y De (con problemas de erosión). La mayoría están cubiertos por matorral xerófito muy ralo y apenas están cultivados. La mayor parte de estos gypsisoles corresponden a la clase De, por lo que necesitarían medidas de protección y conservación, que impidieran su erosión.

MATERIAL Y MÉTODOS

Para efectuar este estudio se ha utilizado la imagen 201/032 del sensor ETM+ del satélite Landsat-7, con fecha de adquisición 20-8-1999. Esta escena tiene 185 x 185 km y comprende la provincia de Madrid y parte de las de Toledo, Guadalajara, Cuenca, Ávila y Segovia. El sensor pasa a las 10:48 horas (TMG), una hora más tarde que el sensor TM de Landsat-5. Se han procesado las ocho bandas del visible e infrarrojos, con resolución de 30 m para los canales 1, 2, 3, 4, 5 y 7, y 60 m para los canales térmicos 6 y 8. Asimismo se ha procesado la imagen pancromática con una resolución de 15 metros.

El tratamiento de la imagen se ha llevado a cabo con el programa ERDAS Imagine 8.3.1, efectuándose un análisis visual y un tratamiento digital. Se han hecho correccio-

nes geométricas, georreferenciándose la imagen al sistema UTM. Por motivos técnicos ha sido imposible efectuar correcciones atmosféricas. Sin embargo, sí se han realizado mejoras radiométricas y espectrales: ecualización del histograma, combinaciones entre bandas, índices de vegetación y minerales. El índice mineral utilizado se ha formado por la composición en color de tres nuevas bandas constituidas a partir de los cocientes entre los canales 5/7, 5/4 y 3/1 asignándole respectivamente los colores rojo, verde y azul. También se ha efectuado una composición hidrotermal (5/7, 3/1 y 4/3) y un análisis factorial en componentes principales, con el fin de obtener una mejora visual que permita resaltar mejor los gypsisoles. Los índices citados han sido utilizados en numerosos estudios (Drury, 1987; Mulders, 1987; García *et al.*, en prensa), dirigidos a discriminar distintas litologías. Se han realizado cortes espaciales y espectrales para comparar los valores digitales de los gypsisoles, frente a los de otros suelos próximos del área de estudio. Para ello se han tomado siete áreas de entrenamiento: en los materiales margo-yesíferos y calcáreos sobre los que se desarrollan calcisoles y cambisoles, en los yesos sobre los que se forman los gypsisoles, en las cárcavas próximas a los principales ríos, en las parcelas puestas en regadío en núcleos rurales, en tierras dedicada al cultivo de cereales en secano, ya recolectados en el mes de agosto y por último se ha escogido una clase relativamente heterogénea, a la que hemos denominado "parcela mixta", que corresponde a parcelas situadas, muchas de ellas, en las márgenes del río Tajo; en la actualidad estas parcelas son utilizadas para la construcción de viviendas residenciales con pequeños jardines o se dejan para pequeñas extensiones de labor intensiva, con barbecho blanco, o pastizales. Cada área de entrenamiento se ha tomado a partir de varios puntos de muestreo, con extensión variable, dependiendo del tipo de cubierta. Con ellas se ha efectuado una clasificación supervisada

siguiendo el criterio de la mínima distancia. Se ha escogido este algoritmo después de realizar diferentes pruebas con otros como el de máxima probabilidad y el de la distancia de Mahalanobis y comprobar que los resultados eran menos satisfactorios. Esta comprobación se ha hecho visualmente teniendo en cuenta el conocimiento de la verdad terreno.

La información del satélite se ha contrastado con el mapa de suelos de la figura 1, aunque también se han realizado trabajos de campo con el fin de confirmar la presencia y distribución de estas asociaciones de suelos. Sería conveniente poder realizar mediadas con espectrorradiómetros de campo, así como obtener los espectros, en laboratorio, de los horizontes superficiales del suelo, si bien esto no ha sido posible en el presente trabajo, por carecer del instrumental necesario.

RESULTADOS Y DISCUSION

Al efectuar un análisis visual con las diferentes bandas del sensor ETM+ se observa que los yesos y materiales margo-yesíferos y calcáreos se discriminan con mayor nitidez en las bandas del visible, canales 1 (Fig. 2a), 2 y 3, resaltando con tonalidades claras (incluso blancas), frente a los canales infrarrojos en los que se confunden con otros materiales. Esto confirma los resultados que las autoras ya habían obtenido en áreas ricas en yesos y sales en la región de La Mancha (García y Pérez, 1999) con el sensor TM y los que Labradero y de Lera (1988) habían señalado en los sedimentos yesíferos de Madrid: mejor discriminación en la banda 4 (visible) para el sensor MSS. Las bandas térmicas (en la figura 2b se muestra la banda 8) muestran como las áreas ricas en yesos y calizas tienen temperaturas más altas, a pesar de su mayor albedo. Esto puede deberse, en parte, a un menor contenido en humedad y vegetación, lo que hace que, en el mes de agosto, a estas horas de la mañana, el suelo se haya calentado más que el de otros materiales próximos. Las tem-

peraturas son más elevadas que en los núcleos urbanos y sobre todo que en la ciudad de Madrid (Pérez y García, 2001), por lo que el núcleo urbano se destaca en el noroeste de la imagen (Fig. 2b), con tonos muy oscuros; no hay muchas diferencias entre los dos canales (8 y 6), si bien la discriminación es más nítida en la banda 8. También se ha analizado la banda pancromática, ya que su mayor resolución espacial permite una mejora visual observándose bien la heterogeneidad existente en los materiales yesíferos y margo-yesíferos (Fig. 2c). Los tonos blancos permiten delimitar los sectores con gypsisoles, si bien puede haber pequeñas confusiones con otras unidades de suelos, especialmente con los calcisoles y/o regosoles. Esta imagen permite observar bien las áreas más erosionadas, cárcavas, redes de drenaje, cauces de los ríos e infraestructuras viarias.

En cuanto a las combinaciones entre distintas bandas se ha podido observar que la combinación en color real (Fig. 2d) permite delimitar bien las áreas yesíferas, ya que adquieren un tono azulado, si bien tienen el problema de confundirse con los núcleos urbanos, de los que sí se distinguen en otras combinaciones. En la combinación en falso color 4-3-2 (asignándole los cañones rojo, verde y azul respectivamente, Fig. 2e) contrastan bien estas áreas con las que tienen mayor vegetación, especialmente las áreas de regadío y se confirma lo señalado por Labradero y de Lera (1988) respecto a una buena visualización de los patrones de drenaje, sólo comparables estos últimos con su buena diferenciación en la banda pancromática. Las combinaciones 5-2-1 (Fig. 2f) y 4-7-1 (Fig. 3a) son también muy buenas para separar diferentes unidades litológico-geomorfológicas: así, se aprecian con nitidez los sedimentos yesíferos, frente a los materiales pliocenos y las calizas de los páramos que aparecen en estas combinaciones con tonalidades marrones (5-2-1) o verdes (4-7-1) e incluso, a diferencia del color natural, se dis-

tinguen bien de los núcleos urbanos ya que ofrecen tonos más intensos en azul-morado. Las combinaciones 7-5-4 (Fig. 3b) y 5-7-3 (Fig. 3c) permiten resaltar las áreas erosionadas en los materiales margo yesíferos que constituyen las distintas unidades de suelos y en los aportes cuaternarios. En estas combinaciones no se discriminan tan claramente los distintos sedimentos, pero sí resaltan en colores muy oscuros los que aparecen más erosionados, así como las redes de drenaje. Por el contrario hay combinaciones que conducen a equívocos: así, la 4-3-5, 1-4-5, 1-7-3 y 1-7-5 confunden las áreas yesíferas con los núcleos urbanos, y la 3-5-7 mezcla los gypsisoles con otras unidades de suelos como calcisoles, regosoles y cambisoles.

Para una mejor interpretación visual de los gypsisoles se ha efectuado una serie de mejoras radiométricas y espectrales. Entre ellas destacamos el índice de vegetación normalizado (relación entre la suma y diferencia de los canales 4 y 3), que permite separar los sectores en los que apenas hay vegetación como son los puntos donde aparecen los gypsisoles, de aquellos con mayor cubierta (Fig. 3d). En esta imagen los gypsisoles aparecen en tonos muy oscuros, aunque se confunden con otros suelos en los que también la vegetación es escasa: calcisoles, regosoles y algunos cambisoles. Por el contrario, obtenemos

mejor discriminación de esta unidad utilizando índices en los que se resalte la composición litológica. Así, con el índice mineral los suelos ricos en yesos aparecen en tonos morados (Fig. 3e), por lo que son fácilmente discriminables. Estableciendo una composición hidrotermal también se pueden distinguir en tonos azulados, si bien se confunden con los calcisoles, por lo que su extensión parece mayor, aunque ambas unidades se discriminan muy bien del resto (Fig. 3f), diferenciándose en tonos granate los materiales más degradados. Por el contrario los índices minerales en los que sólo se consideran dos bandas no dan buenos resultados (índices de arcillas, ferroso, de óxidos de hierro, etc.), por lo que sus imágenes no las hemos incluido en el presente trabajo.

Entre las mejoras espectrales también se ha efectuado un análisis factorial en componentes principales. En la imagen obtenida las áreas de yesos se confunden con otros suelos constituidos a partir de materiales claros y con poca vegetación y con los núcleos urbanos, por lo que no resulta muy útil para nuestro estudio, independientemente del número de componentes que utilizemos, si bien la diferenciación es más clara cuando se consideran sólo los cuatro primeros componentes, ya que en este caso no se confunden con los núcleos urbanos.

TABLA 1 – Valores digitales máximos y mínimos de las clases consideradas.

	Banda1		Banda2		Banda3		Banda4		Banda5		Banda6		Banda7		Banda8	
	Mx	Mn	Mx	Mn	Mx	Mn	Mx	Mn	Mx	Mn	Mx	Mn	Mx	Mn	Mx	Mn
S.margo- yesífero	114	186	113	205	133	255	123	225	160	255	165	176	110	228	211	232
Yesos	99	168	94	168	107	202	96	166	128	237	164	174	85	192	210	228
Cárcava	79	121	67	121	69	161	85	132	94	189	159	183	52	153	199	243
Regadío	68	95	53	90	42	96	91	212	48	129	139	146	25	83	166	176
Urbano	71	151	52	142	45	168	44	131	37	197	142	161	32	193	169	206
Secano	78	130	73	139	99	189	87	160	123	215	164	172	95	171	209	225
Parcela mixta	64	108	48	108	37	143	29	130	14	167	137	176	10	150	162	232



Fig. 2a. Banda 1 (azul)



Fig. 2b. Banda 8 (térmica)



Fig. 2c. Pancromático.



Fig. 2d. Combinación 3-2-1 (R-V-A)



Fig. 2e. Combinación 4-3-2

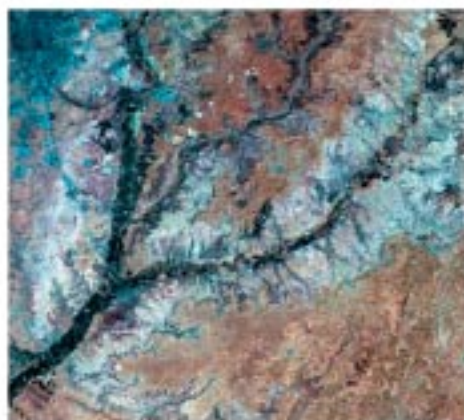


Fig. 2f. Combinación 5-2-1

FIGURA 2. Imágenes derivadas de la escena ETM+, 20-8-1999

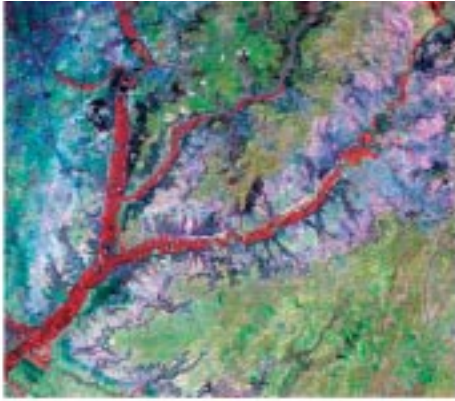


Fig. 3a. Combinación 4-7-1



Fig. 3b. Combinación 7-5-4

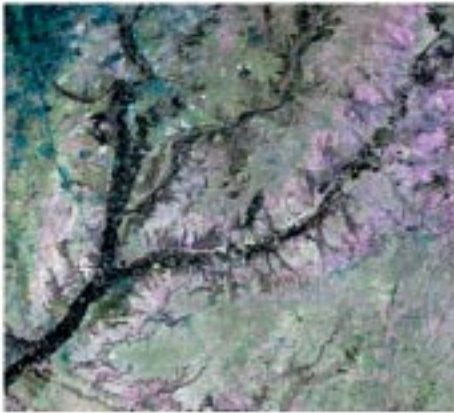


Fig. 3c. Combinación 5-7-3



Fig. 3d. Índice Vegetación Normalizado

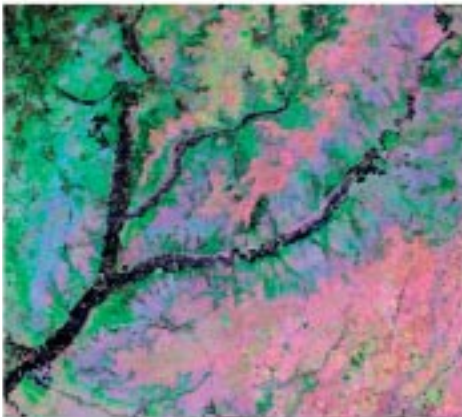


Fig. 3 e. Índice mineral



Fig. 3 f. Composición hidrotermal

FIGURA 3. Imágenes derivadas de la escena ETM+, 20-8-1999 (continuación).

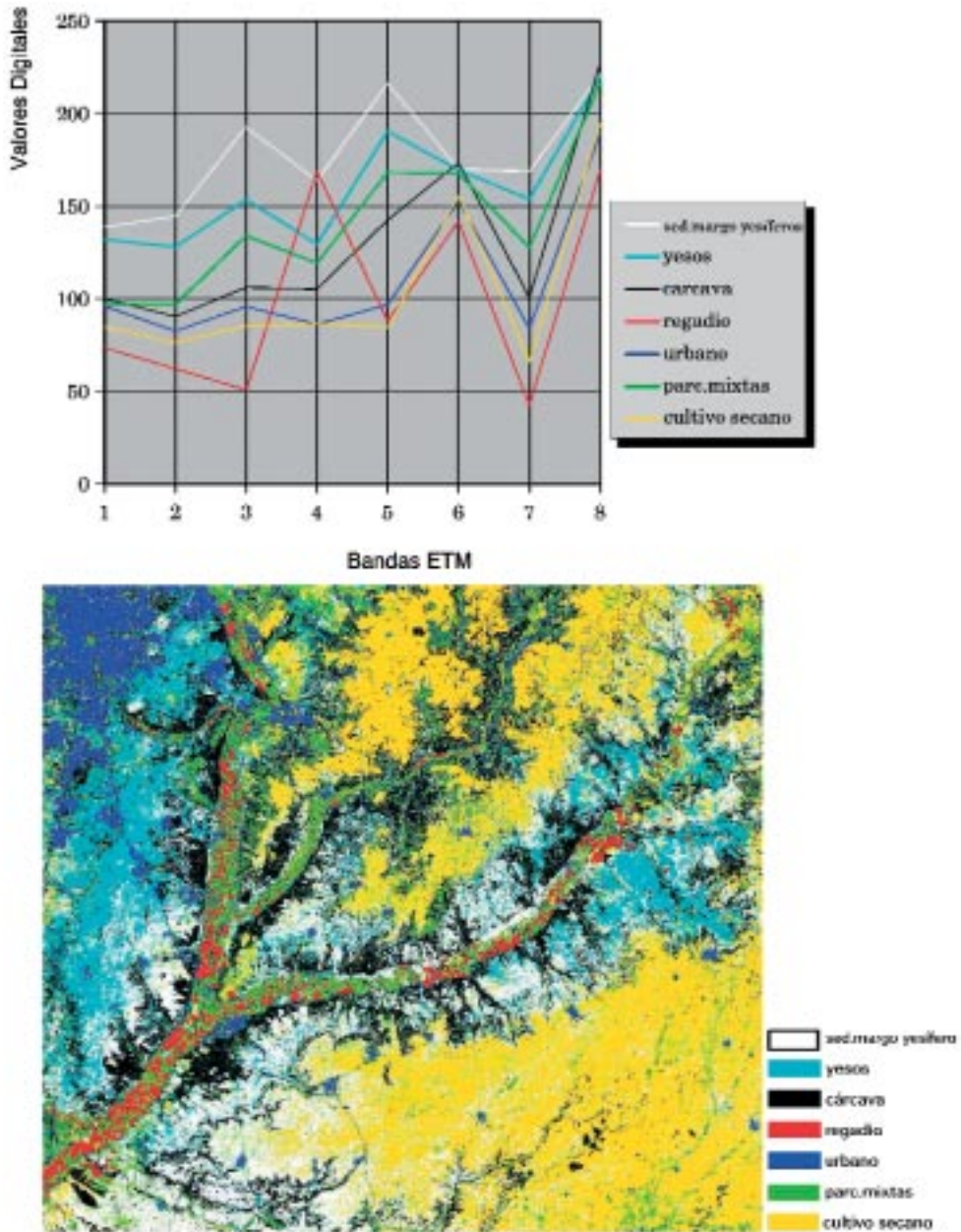


FIGURA 4. Valores espectrales y clasificación supervisada.

En cuanto al análisis digital, se ha realizado cortes espaciales y espectrales en el área de estudio analizando los valores digitales en las ocho bandas, con el fin de comparar las

muestras de gypsisoles, con las de otros tipos de cubiertas y suelos. Además se han considerado siete áreas de entrenamiento, explicadas en el apartado de material y métodos,

representativas de los distintos materiales: las clases informacionales corresponden a clases espectrales suficientemente diferenciadas, tal como se comprueba en el análisis estadístico (Tabla 1) de los datos originales.

Como se observa en la figura 4a los sedimentos margo-yesíferos y calcáreos tienen los valores digitales más elevados en todas las bandas, salvo las térmicas, destacando la banda cinco con valores próximos a 220. También los gypsisoles tienen una signatura espectral similar, aunque con valores más bajos, debido no tanto a la composición del material como al hecho de que con frecuencia se encuentran en las facies de las cuestras, frente a la clase anterior localizada en superficies más planas, por lo que la reflectividad es menor. Por debajo de éstas se encuentra la signatura de las parcelas dedicadas a secano, muchas de ellas sobre materiales pliocenos o de finales del mioceno. Las cárcavas y, en general todas las áreas muy erosionadas (que afectan con frecuencia a materiales cuaternarios), presentan una signatura característica ya que tienen valores bajos en las bandas visibles e infrarrojos próximos y más altos que otras muestras en las bandas térmicas. Esto es debido a su situación, orientación y fuerte pendiente, lo que permite establecer una buena cartografía de ellas y separar todas estas áreas fuertemente erosionadas independientemente del material del que estén constituidas. Las parcelas puestas en regadío y con una gran vigorosidad vegetal en el mes de agosto presentan una curva totalmente diferente al resto de las muestras, ya que tiene los valores más altos en el canal 4, con valores muy bajos en la banda 7 y en los visibles debido a la absorción por la clorofila y a la gran humedad que presentan. Por esta última razón mantienen también las temperaturas más bajas. La muestra tomada en parcelas mixtas, próximas a los cursos fluviales pero con escaso recubrimiento vegetal y mayor influencia del suelo (fluvisoles y suelos afectados por procesos de gleyzación) tiene valo-

res bajos en todos los canales, incluidos los térmicos debido también a su alto contenido en humedad. Los núcleos urbanos tienen la curva característica de las áreas edificadas: valores relativamente bajos en las bandas visibles e infrarrojos próximos y medios y temperaturas también relativamente bajas a estas horas de la mañana, debido a las sombras y a la inercia térmica de los materiales.

Así, pues, de estos datos se deduce que con los números digitales obtenidos por el sensor, es posible discriminar con nitidez los suelos desarrollados sobre materiales yesíferos o margo-calcáreo-yesíferos, con una alta reflectancia. Dentro de ellos, aún es difícil delimitar con total fiabilidad los perfiles correspondientes sólo a gypsisoles, si bien la mayor parte de los suelos desarrollados en esta área, sobre este tipo de materiales, corresponden a estas unidades de suelos o a asociaciones de las que forman parte de manera significativa.

Con estas áreas de entrenamiento se ha efectuado una clasificación supervisada (Fig. 4b) en la que se observa una nítida discriminación en las parcelas próximas a los ríos, tanto en las de regadío como en las que tienen poca vegetación. Asimismo los núcleos urbanos e infraestructuras viarias quedan claramente delimitados. También se separan las áreas de gypsisoles y aquellas con desarrollo de otros perfiles (calcisoles, cambisoles, regosoles y leptosoles) sobre materiales margo-yesíferos, si bien en algunos casos puede haber confusión y sería necesario contrastar los resultados con los de sensores de mayor resolución espacial y con el trabajo de campo. Las áreas más erosionadas (tierras acarcavadas también conocidas como "badlands") también se distinguen bien, pudiéndose llegar a establecer una cartografía de las mismas y analizar su evolución. Gracias a la resolución temporal del sensor se podría analizar la velocidad de los procesos de acarcavamiento y el riesgo de erosión-degradación que existe para este tipo de suelos.

CONCLUSIONES

El sensor ETM+ del satélite Landsat 7 supone una ventaja para los estudios del medio físico a escala regional frente a otros satélites de la serie Landsat. Su mayor resolución espacial, en algunas bandas, permite trabajar con más detalle y facilita incluso la realización de estudios a nivel local.

Con este sensor se observan con nitidez, tanto visual como espectralmente, los materiales margo-yesíferos y calcáreos localizados, en la Comunidad de Madrid, en las proximidades de los ríos Tajo, Jarama y Tajuña.

Para estudios locales o regionales de climatología resulta mucho más eficaz que el sensor TM al contar con dos canales térmicos. Estos canales son similares a los del sensor AVHRR del programa NOAA por lo que se pueden comparar los datos.

Los canales que permiten identificar mejor los sedimentos margo-yesíferos son, individualmente, los pertenecientes al espectro visible. Las combinaciones entre bandas que mejores resultado han ofrecido en este estudio son: 3-2-1, 4-3-2, 5-2-1, 4-7-1, 7-5-4 y 5-7-3.

Entre las mejoras radiométricas destaca el índice mineral que combina los cocientes: 5/7, 5/4 y 3/1.

Al realizar una clasificación supervisada basada en el conocimiento de terreno y en los datos aportados por el sensor se facilita la delimitación de la distribución espacial de los gypsisoles, lo que facilitará su inclusión en un Sistema de Información Geográfica.

Asimismo se discriminan con nitidez las áreas más erosionadas y especialmente las sometidas a un intenso proceso de acarcavamiento, tanto sobre materiales terciarios como cuaternarios.

La información obtenida mediante las imágenes de satélite (color real, combinaciones en falso color, valores digitales de los diferentes materiales, etc.) se puede extrapolar a otras áreas con gypsisoles, de forma que

la cartografía de suelos se beneficie de la rapidez y precisión de esta técnica. Así, el tratamiento de imágenes ETM+, aunque no ofrece por sí solo resultados definitivos para la cartografía de suelos, sí es de gran utilidad en las fases inicial y final de los trabajos sobre geografía de suelos, al menos en lo que respecta a los gypsisoles, pudiéndose localizar áreas con una determinada unidad o asociación de suelos y áreas susceptibles de una mayor degradación física y antrópica.

REFERENCIAS

- Drury, S.A. (1987). *Image Interpretation in Geology*. Allen & Unwin. London.
- Duchaufour, P.H. (1977). *Atlas ecológico de los suelos del mundo*. Masson. Barcelona.
- FAO (1989). *Mapa mundial de suelos*. FAO. Roma.
- García, M.P.; Guerra, A.; Pérez, M.E. (en prensa). Study of a ring structure trough TM-sensor in Northern Somosierra (Spanish Central System). Aceptado para su publicación en *International Journal of Remote Sensing*; paper nº RES 100 761.
- García, M.P. y Muñoz, M.C. (1998). Utilización de la Teledetección y Sistemas de Información Geográfica en la Cartografía de Suelos. *Edafología* 4, 95-105.
- García, M.P. y Pérez, M.E. (1999). Estudio mediante imágenes TM del entorno de Villacañas (Toledo). *Revista de Teledetección* 11, 13-22.
- Goossens, R.; Rans, E. (1998). The use of remote sensing to map gypsiferous soils in the Ismailia province (Egypt). *Geoderma* 87, 47-56.
- Goossens, R.; Rans, E.; Ghabour, T.; Badawi, M. (1999). The use of remote sensing and Gis to detect gypsiferous soils in the Ismailia province, Egypt. *Operational remote sensing for sustainable develop-*

- ment. Procc. of the 18th EARSel Symposium, Enschede, Netherlands*, 11-14 May 1998, 97-102.
- Gumuzzio, J. y Álvarez, J.B. (1984). Características de gipsiorthids en la Región Central Española. *An. Edafol. y Agrobiol.* 43, 93-110.
- I.G.M.E. (1968). Mapa Geológico de España 1:50.000. Aranjuez, nº 605. Madrid
- I.G.M.E. (1975). Mapa Geológico de España 1:50.000. Getafe, nº 582. 2ª Serie. 1ª ed. Madrid.
- I.G.M.E. (1975). Mapa Geológico de España 1:50.000. Arganda, nº 583. 2ª Serie. 1ª ed. Madrid
- I.G.M.E. (1975). Mapa Geológico de España 1:50.000. Chinchón, nº 606. 2ª Serie. 1ª ed. Madrid.
- I.G.M.E. (1975). Mapa Geológico de España 1:50.000. Ocaña, nº 631. Seg. Serie. 1ª ed. Madrid.
- Koch, M. (2000). Geological controls of land degradation as detected by remote sensing: a case study in Los Monegros, NE Spain. *Intern. Jour. Remote Sensing* 21,457-473.
- Labrandero, J. L. y De Lera, O. (1988). Sensores MSS y TM en el análisis del paisaje del suelo. *Coloquio Hispano-francés sobre Teledetección y Planificación Integrada del territorio*. Madrid, mayo de 1988.
- Mulders, M.A. (1987). *Remote Sensing in Soil Science*. Elsevier. Amsterdam.
- Monturiol, F. y Alcalá, L. (1990a). *Mapa de Asociaciones de Suelos de la Comunidad de Madrid*. Escala 1:200.000. 1ª ed. C.A.M.-C.S.I.C. Madrid.
- Monturiol, F. y Alcalá, L. (1990b). *Mapa de Capacidad Potencial de Uso Agrícola de la Comunidad de Madrid*. Escala 1:200.000. 1ª ed. C.A.M. – C.S.I.C. Madrid.
- Nieves, M. y Gómez, V. (1992). *Designación de los horizontes y capas del suelo. Evolución histórica y localización en la Comunidad de Madrid*. Monografías Agencia de Medio Ambiente. C.A.M. Madrid.
- Olmos, T. (1996). Panorama edáfico de la Comunidad de Madrid. *Tierra y Tecnología*; 25-31.
- Peinado, M. y Rivas-Martínez, S. (1987). *La vegetación de España*. Ed. Universidad de Alcalá de Henares. Madrid, 544 p.
- Pérez, M.E. y García, M.P. (2001). Estudio de las bandas térmicas del sensor ETM+ en la Comunidad de Madrid y alrededores. En *El Tiempo y el Clima*, Pérez Cuevas, López Baeza y Tamayo Carmona (eds). Publ. de la Asoc. Esp. de Climatología ; serie A, nº 2, 499-508.
- Schmid, T.F., Gumuzzio, J. y Koch, M. (2000). Spectral and textural classification of multi-source imagery to identify soil degradation stages in semi-arid environments *Proceedings EUROPTO'00*, Barcelona, Spain, Septiembre 2000, 67-74.
- U.S.D.A. (1999). *Soil Taxonomy*. U.S.D.A. Handbook, nº 436. 2ª ed. Washington; 869 pp.

CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS DE LAS MARISMAS DE LA RÍA DE ORTIGUEIRA EN RELACIÓN CON SU POSICIÓN FISIAGRÁFICA Y VEGETACIÓN (GALICIA-NO DE LA PENÍNSULA IBÉRICA)

X. L. OTERO y F. MACÍAS

Departamento de Edafología e Química Agrícola. Facultad de Biología. Universidade de Santiago de Compostela. Galicia. España

Abstract. Analysis was made of the redox conditions and Fe species present in 8 soil profiles from the Ría de Ortigueira (N Galicia). The soils were from different types of salt marsh (high and low), different physiographical positions and had different types of plant cover. The Fe species considered were: amorphous or poorly crystalline oxyhydroxides of Fe (soluble in ascorbate-citrate), crystalline Fe (soluble in dithionite), pyrite-Fe (soluble in nitric acid), metastable Fe sulfides (Fe-AVS) and residual Fe (soluble in HF). The results indicated large spatial variations and variations with depth in the redox conditions of these soils and therefore in the Fe species present. Oxidic conditions prevailed throughout the high salt marsh soil profiles ($E_h > 300$ mV; profiles 3 and 4) and iron oxyhydroxides dominated. Pyrite-Fe was present at very low concentrations in these soils. In soils with oxidic or suboxidic surface layers and anoxic deeper layers, concentrations of reactive-Fe (amorphous and crystalline oxyhydroxides of Fe) were high in the first 15 cm; below the rhizosphere the levels of amorphous oxyhydroxides of Fe decreased, whereas the amount of pyrite-Fe and therefore the degree of pyritization (DOP), increased significantly. The levels of crystalline oxyhydroxides of Fe also decreased with depth in these soils but more gradually, with high concentrations being maintained under strongly reduced conditions. The distribution of Fe species in the soil from the salt pan was anomalous; levels of pyrite-Fe were higher than those of oxyhydroxides of Fe in the surface layers and the DOP was therefore also high. Paradoxically, the amount of pyrite-Fe decreased significantly at depth and there was an increase in levels of iron oxyhydroxides.

The low salt marsh and channel bottom soil profiles were anoxic throughout. Pyrite-Fe was the most abundant species in these soils; the degree of pyritization for the amorphous or poorly crystalline Fe was close to 100% and for Fe soluble in dithionite it was greater than 60%.

Key words: Potential redox (E_h), Soil classification, FAO, Soil Taxonomy, Fluvisols, Aquents, salt marsh.

Resumen. Se realiza la caracterización general y clasificación de 8 suelos de las marismas de la Ría de Ortigueira. Se trata de suelos formados en diferentes tipos de marismas y seleccionados en función de la fisiografía y tipo de vegetación. Los parámetros físicoquímicos (pH, E_h , C orgánico...) presentan una amplia variabilidad espacial y en profundidad, afectando a las tendencias biogeoquímicas de elementos de gran importancia en la dinámica de las marismas litorales como son el Fe y el S. La concentración de pirita (FeS_2), que oscila entre 0.01 y 3.9 %, está principalmente relacionada con suelos u horizontes con condiciones redox fuertemente reducidas ($E_h < -100$ mV). La presencia de concentraciones altas de sulfuros de Fe, confiere a los suelos una elevada acidez potencial que se pone de manifiesto cuando son sometidos a un proceso oxidativo forzado con peróxido de hidrógeno y, en menor medida, cuando son incubados durante dos meses en condiciones aerobias. En ambos casos, los horizontes sometidos a un

encharcamiento permanente alcanzan valores de pH inferiores a 3.5, lo que pone de manifiesto la presencia de material sulfúrico. Esta propiedad de diagnóstico aparece asociada a los horizontes con un porcentaje de S pirítico superior a 0.75% y libres de carbonatos.

Los suelos estudiados se clasifican como: Typic Sulfaquents, Histic Sulfaquents y Sodic Hydraquents según la (Soil Survey Staff, 1999) y como Fluvisol epigleico-endosódico, Fluvisol prototónico-epigleico, Fluvisol hístico-prototónico y Fluvisol estágnico-endosódico según la clasificación FAO (1998).

Palabras clave: Potencial redox (Eh), Clasificación de suelos, FAO, Fluvisoles, Aquentes, marisma litoral.

INTRODUCCIÓN

Galicia es una de las Comunidades con mayor longitud de costa (~1700 km) y, desde el punto de vista geomorfológico, presenta uno de los litorales más complejos de la Península Ibérica, donde las costas de Ría son su característica más peculiar. En ellas, los procesos de sedimentación dan lugar a la formación de sistemas marismes, los cuales se encuentran asociados principalmente a ensenadas, desembocaduras de ríos y zonas internas de las rías (Fig. 1). Los primeros trabajos de investigación sobre estos suelos se llevaron a cabo bajo la dirección del Prof. Guitián Ojea (1967, 1974). En ellos se señalan sus propiedades básicas (CIC, pH, C orgánico, C/N,...) diferenciando dos grandes grupos de “suelos costeros” en función de la ausencia o presencia de vegetación, denominándolos respectivamente sapropel y marsh, adoptando la clasificación que Kubiena había establecido para los suelos subacuáticos (Kubiena, 1952). Según Guitián *et al.* (1966), los “sapropel” son suelos litorales diariamente inundados por las pleamares que no están colonizados por la vegetación vascular; mientras que en los “marsh” presentan una menor influencia mareal, siendo inundados totalmente sólo por las pleamares vivas lo que permite el establecimiento de una cobertura vegetal permanente. Además de la mayor o menor influencia mareal, el paso de sapropel a marsh implica cambios físicos y geoquímicos importantes en los suelos que afecta especialmente a la materia orgánica, Fe y S, pro-

ceso que ha sido definido como “terrestificación” (soil ripening según los autores holandeses, Pons y Zonneveld, 1965), diferenciándose la siguiente secuencia: sapropel → marsh → gley → vega gleyificada → vega (Guitián *et al.*, 1967). Leirós y Guitián, 1981 y Guitián *et al.*, 1982 encuentran que los marsh presentan un pH más ácido, un mayor grado de humificación de la materia orgánica y un mayor contenido de oxihidróxidos de Fe. Además, considerando los suelos marsh y sapropel conjuntamente, obtienen una correlación inversa entre el Eh y la concentración de S²⁻. Por otra parte, Cabaneiro y Macías (1978) realizan la caracterización mineralógica de la fracción arcilla de suelos de sapropel de Galicia de zonas con diferente entorno geológico encontrando como componentes fundamentales caolinita e illita independientemente del material de partida, junto a cantidades variables de gibbsita y clorita. La presencia de caolinita y gibbsita la relacionan con un origen continental ya que las condiciones termodinámicas de estos ambientes favorecen la neoformación de minerales 2:1 y la destrucción de la gibbsita (Macías y Calvo, 1988). De igual manera, la mayor cantidad de clorita encontrada en los suelos de las marismas de la Ría de Ortigueira es consecuencia de la riqueza de este mineral en el complejo básico y ultrabásico de la Sierra de A Capelada (Cabaneiro y Macías, 1979).

González *et al.* (1989) realizan un estudio comparativo de las sustancias húmicas presentes en suelos de estuario (Fluvisol eútrico) y suelos no afectados por el agua

marina (Cambisol dístico); encontrando que la influencia marina sobre la materia orgánica afecta a los complejos órgano-metálicos, altera la solubilidad de los ácidos húmicos y fúlvicos en medio alcalino e incrementa el contenido de amonio, mientras que disminu-

yen las hexoaminas y nitrógeno orgánico hidrolizable. Bescansa y Roquero (1990), ponen de manifiesto la presencia de material sulfúrico en estos suelos, cuantifican la concentración de S reducido y establecen cierta relación entre la presencia de material sulfú-

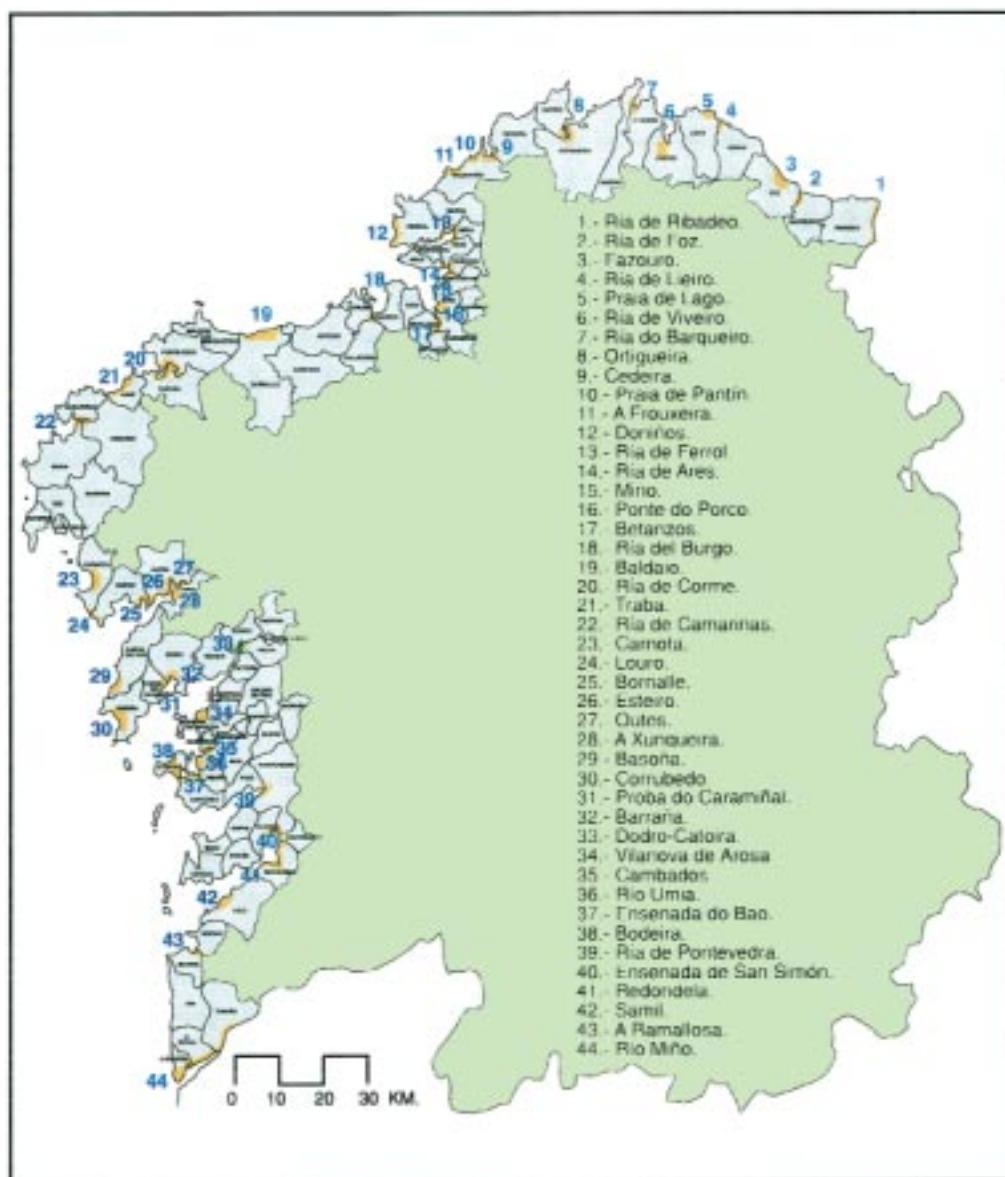


FIGURA 1. Distribución de los principales sistemas de marisma en la costa de Galicia.

rico, la vegetación y la posición fisiográfica. En este trabajo clasificaron los suelos estudiados como Halic Sulfaquents, Typic Sulfaquents y Sulfic Hydraquents según Soil Survey Staff (1975); mientras que Leiros y Guitián (1981) encuentran Fluvisoles dístricos en zonas de sapropel y Fluvisoles éutricos y calcáreos en las áreas de marsh. Más recientemente, en la marisma de Mera (Ría de Ortigueira), se han descrito Fluvisoles tíonicos y sálicos en la marisma alta (marsh) (Sánchez, 1995).

También se han realizado varios estudios acerca de la relación suelo-planta en los medios marismenos gallegos. Así, en 1967 se realizó un estudio de la vegetación de la marisma alta y baja, se establecieron varios complejos de vegetación y se encontró una relación clara entre la evolución física del suelo y la distribución de la vegetación, la cual está influida por la salinidad y velocidad de la corriente (Buurman, 1967). Un estudio más detallado e intensivo fue realizado por Sánchez *et al.* (1998). En este trabajo se llevó a cabo un seguimiento mensual durante año y medio de la altura del manto de inundación así como de la profundidad, salinidad y potencial redox de la capa freática, concluyendo que la distribución de las 7 principales comunidades de vegetación de las marismas de la Ría de Ortigueira están reguladas fundamentalmente por las condiciones redox y la salinidad.

En el presente trabajo se ha llevado a cabo un estudio sobre la variación espacial de las propiedades de los suelos en un sistema de marisma. Para ello hemos seleccionado un número más amplio de perfiles que en los trabajos anteriormente citados, teniendo como criterio el tipo de marisma (alta o baja), posición fisiográfica y cobertura vegetal.

MATERIAL Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

El área de estudio se encuentra situada en el norte de la provincia de A Coruña (Fig. 2).

El entorno geológico de la zona constituye uno de los aspectos más singulares del medio físico, ya que la vertiente oeste y algunos enclaves al este y sur de la Ría forman parte del Complejo básico y ultrabásico de Cabo Ortegal. Se trata de una formación alóctona sobre la que se han llevado a cabo múltiples estudios a fin de establecer su origen (ver p.ej. Girardeau, *et al.*, 1989; Gil y Girardeau, 1991) y que, desde el punto de vista petrológico, presenta una amplia variabilidad de rocas (neises, eclogitas, granulitas, anfibolitas y peridotitas serpentinizadas). Son materiales procedentes del manto o corteza oceánica donde los componentes más antiguos pertenecen al Precámbrico (900 ± 30 m.a., IGME 1977), mientras que los materiales de las unidades estructurales superiores son del Paleozoico inferior y medio (500-420 m.a. Gil y Girardeau, 1991). Además, también están presentes en la parte Este y Sur de la Ría materiales autóctonos (principalmente neises y esquistos) pertenecientes a la unidad denominada Ollo de Sapo.

Las condiciones climáticas se caracterizan por presentar una precipitación media anual que oscila entre 930 mm y 1019 mm concentrándose mayoritariamente en el periodo comprendido entre noviembre y abril (~69 % de la precipitación total). La temperatura media anual registrada en las estaciones meteorológicas de Estaca de Bares y Castropol es de 12.9 °C y 13.9 °C respectivamente. Los registros más bajos se producen en el mes de enero con 8.5 °C y los más elevados en el mes de agosto con 19.7 °C (Carballeira *et al.*, 1983). Esta pequeña diferencia entre estaciones y la elevada capacidad calorífica del agua permiten afirmar que el régimen térmico es de tipo isomésico, siendo ácuico el régimen hídrico (Soil Survey Staff, 1975).

Muestreo de los suelos

Los puntos de muestreo fueron seleccionados intentando recoger los diferentes ambientes geoquímicos presentes en las

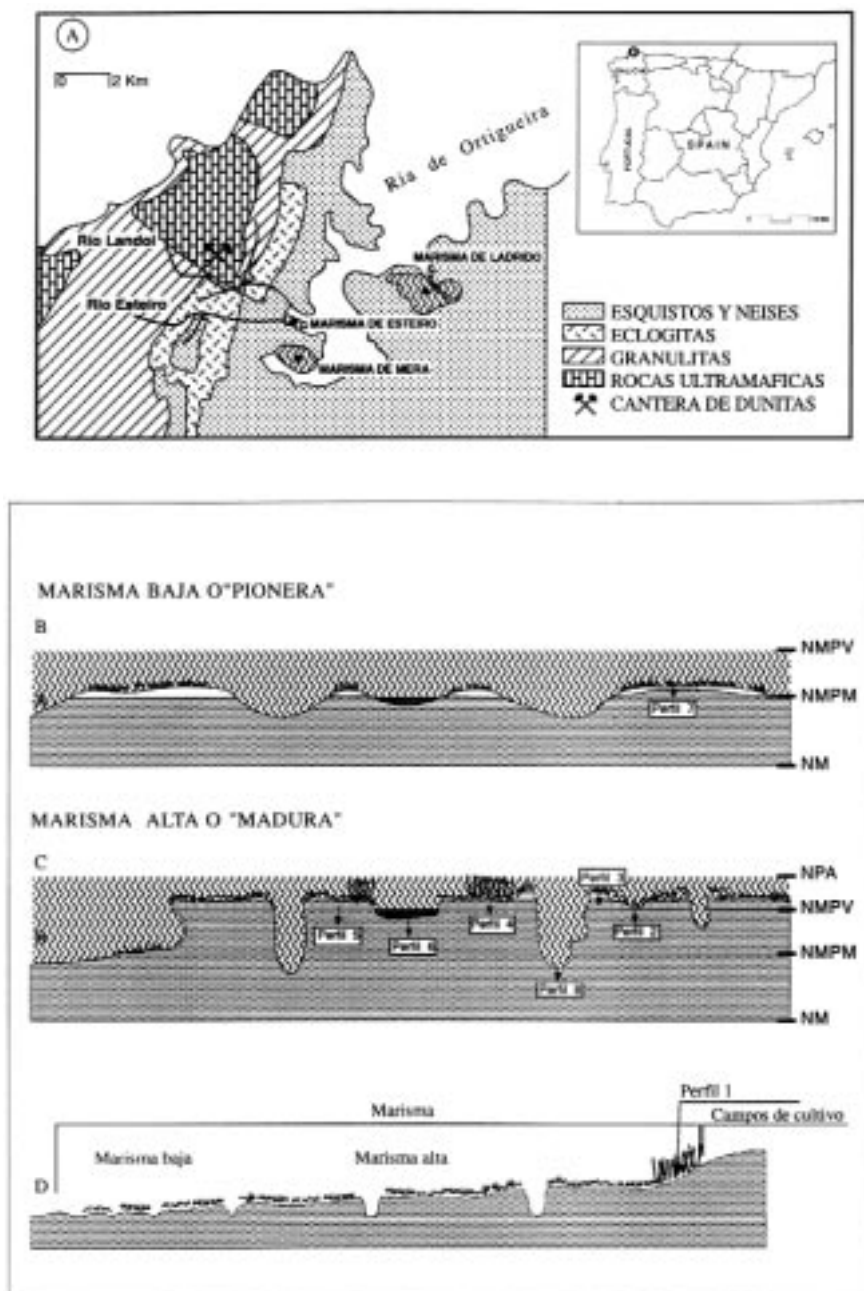


FIGURA 2. A.- Localización y geología del área de estudio- B, C y D.- Posición fisiográfica de los perfiles dentro de la marisma. Los esquemas B y C representan la sección transversal de la marisma; mientras que el esquema D corresponde a una sección longitudinal.

NPA: Nivel de las pleamares astronómicas, NMPV: nivel medio pleamares vivas, NMPM: Nivel medio de las pleamares muertas, NM: Nivel medio.

marismas de la Ría de Ortigueira. Para ello se ha tenido en cuenta la posición fisiográfica, presencia/ausencia de vegetación y tipo de vegetación. En función de estas variables se seleccionaron un total de 8 localidades cuyas principales características se presentan en la Tabla 1. El muestreo se llevó a cabo en marzo de 1996 durante la marea baja. En el campo se realizó una breve descripción del perfil, se identificaron los horizontes y se tomaron muestras de cada uno de ellos en bolsas de plástico. También se recogió una muestra de cada suelo en un tubo de PVC de 11 cm de diámetro interior y 35 cm de longitud. Los

tubos se cerraron herméticamente, se mantuvieron aproximadamente a 4 °C y se transportaron en posición vertical al laboratorio donde fueron congelados a -18 °C. Posteriormente, los suelos fueron cortados en secciones de 5 cm de profundidad y mantenidos congelados hasta su posterior análisis. Por otra parte, en diferentes meses de ese año y en marea baja (enero, marzo, junio, julio y diciembre) se recogieron muestras del horizonte superficial de cada suelo, en las cuales se determinaron en el extracto de pasta saturada cationes, aniones y conductividad eléctrica.

TABLA 1. Posición fisiográfica y tipo de cobertura vegetal en cada perfil

Perfil	Tipo marisma	Posición fisiográfica	Esp. vegetal dominante
Perfil 1	Marisma	Borde de Marisma	<i>Scirpus maritimus</i>
Perfil 2	alta o	Depresión	<i>Spartina maritima</i>
Perfil 3	madura	Borde canal	<i>H. portulacoides</i>
Perfil 4		Planicie de marisma	<i>Juncus maritimus</i>
Perfil 5		Depresión	<i>Spartina maritima</i>
Perfil 6		Cubeta	Sin vegetación
Perfil 7	Marisma baja	Planicie de marisma	<i>Spartina maritima</i>
Perfil 8	Marisma alta	Fondo de canal	Sin vegetación

Análisis de los suelos

Las condiciones de pH y Eh se determinaron *in situ* utilizando un aparato Solomat 2000, previa calibración. El valor de Eh fue corregido añadiendo el potencial del electrodo de referencia respecto al electrodo estándar de hidrógeno (244 mV). En base a los resultados obtenidos para el Eh y pH se ha determinado el rH según indica la clasificación FAO (1998). El color del suelo se determinó en húmedo y en seco utilizando la Munsell Soil Color Charts (Munsell Color Co., 1975 y el índice de color se obtuvo según establecen Evans y Franzmeier (1988). El grado de madurez de los horizontes (*soil ripening* según Pons y Zonneveld, 1965) fue determinado en el campo de manera cuantitativa según Dent (1986).

La presencia de material sulfúrico en los suelos se realizó según el método propuesto por van Breemen (1982) y que recoge la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999). La reacción ácida potencial (pH de oxidación) fue determinada por oxidación de la muestra con 30% H₂O₂ a pH 5.5, según el método de Konsten *et al.* (1988). Carbón orgánico y S total se analizaron en un aparato Leco CSN-1000 previa eliminación de los carbonatos con HCl 6N. El extracto de pasta saturada se obtuvo según Rhoades (1982), determinándose la conductividad eléctrica, cationes (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y K⁺) y aniones (Cl⁻ y SO₄²⁻). La concentración de Fe pirítico se determinó según el método de Huerta-Díaz y Morse (1990). La muestra se trata con HCl 1N durante 16 h disolviendo el Fe y metales

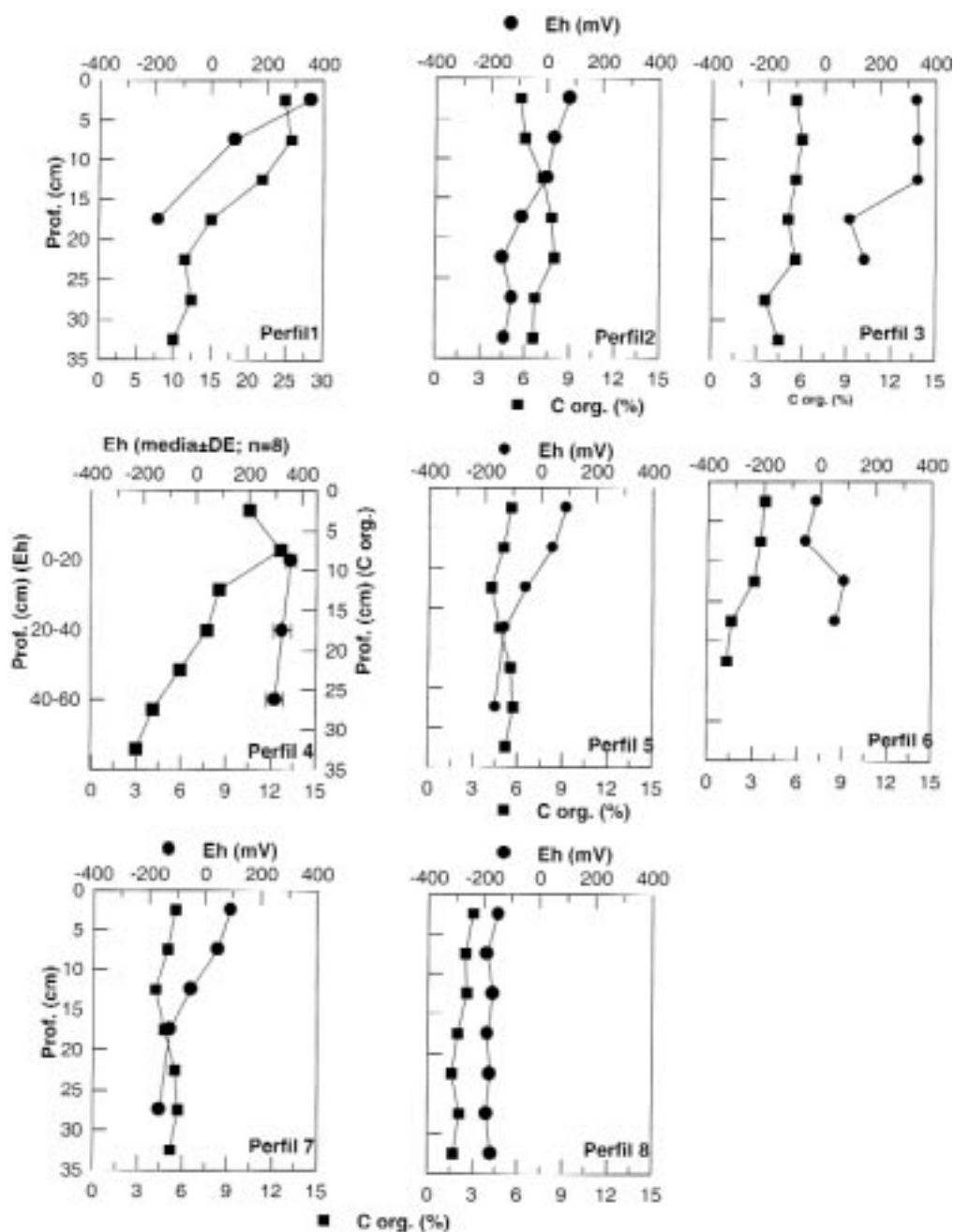


FIGURA 3. Variación espacial y con la profundidad del potencial redox (Eh) y contenido en carbono orgánico.

traza asociados a la fracción AVS, carbonatos y oxihidróxidos amorfos de Fe y Mn. Seguidamente se extrae el Fe asociada a los silicatos con 30 ml de HF 10M durante 16 h en agitación continua y posteriormente se trata la muestra con 10 ml de H₂SO₄ concentrado durante 2 h extrayendo de esta manera el Fe asociado a la materia orgánica. Estas dos últimas fracciones fueron descartadas. Finalmente, se extrae el Fe de la fracción pirítica con 10 ml de HNO₃ concentrado durante 2 h en agitación continua.

El Fe, Ca y Mg fueron determinados por espectrofotometría de absorción atómica y Na y K por espectrofotometría de emisión en un aparato Perkin-Elmer 1100B. La concentración de los aniones fue determinada por cromatografía iónica con un aparato Dionex 4500i. La conductividad eléctrica del extracto de saturación se determinó con un conductímetro Crison CM 2201 previa calibración con una disolución de KCl 0.1N.

La extracción del agua intersticial se realizó a partir de las muestras de los suelos congelados. De cada muestra se extrajeron dos submuestras (~35 ml) de la parte más interna del suelo bajo un flujo de nitrógeno, se introdujeron en botes de 50 ml de polipropileno, se purgaron con nitrógeno durante 1 min. y se cerraron herméticamente. Inmediatamente se centrifugaron a 3000 r.p.m. durante 30 min,

determinándose el pH y conductividad eléctrica. En el agua intersticial de la segunda submuestra se filtró por 0.45 µm y se determinó la concentración de sulfato y cloruro por cromatografía iónica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Descripción general de los perfiles

PERFIL 1: Borde de marisma alta con *Scirpus maritimus*.

Descripción general de la unidad

Se trata de un suelo situado en la parte trasera o borde de la marisma alta, a unos 2 m de los campos de cultivo (Fig. 2). La comunidad de *Scirpus maritimus* (*Scirpetum compacti*) aparece de manera marginal en los bordes de la marisma alta. Estos espacios únicamente son inundados por las pleamares vivas. A pesar de ello, el suelo se encuentra casi siempre encharcado debido al afloramiento de la capa freática, la cual se encuentra a una profundidad de 2.8±4.1 cm (Sánchez *et al.*, 1998) (Fotografías 1 y 2). Esta idea también se apoya en la baja conductividad eléctrica encontrada en ellos (< 5 dS m⁻¹). En la parte más superficial (~2.5 cm de profundidad) las condiciones redox oscilan entre óxicas y subóxicas (Eh~ 200-350 mV), mientras a partir de los 15 cm de profundidad se producen situaciones de anoxia (Eh < 0 mV).

FOTOGRAFIA 1 y 2.- La fotografía 1 muestra una visión general del borde de la marisma, espacio sobre el que se desarrolla *Scirpus maritimus*.



El suelo (perfil 1; Fotog. 2) se caracteriza por presentar un horizonte H hístico y baja concentración de sales, siendo clasificado según la Soil Survey Staff (1999) como Histic Sulfaquents y como Fluvisol hístico-prototónico aplicando los criterios de la FAO (1998)



Descripción morfológica

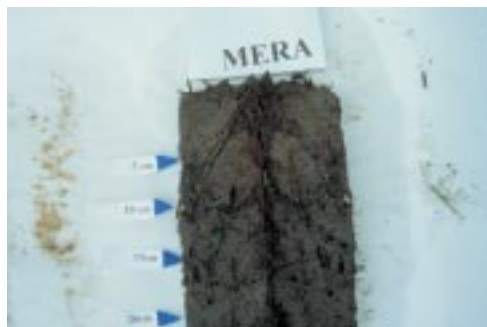
Horizonte	prof. (cm)	Descripción
H	0-20	Horizonte con abundante restos vegetales de <i>Scirpus maritimus</i> y abundantes raíces y rizomas vivos. Marrón oliva, 2.5 Y 4/4 (h), con moteados rojos, 10YR 4/8 (h), y negros, 5BG 2/1 (h). Fluye fácilmente entre los dedos, prácticamente no maduro (n: 1.4-2). Límite difuso y ondulado.
Cr	+20	Zona de reducción permanente. Matriz gris oliva, 5Y 4/2 (h). Presencia escasa de raíces finas, prácticamente no maduro (n: 1.4-2). Plástico y adhesivo.

PERFIL 2: Depresión en la planicie de la marisma alta colonizado por *Spartina maritima* (forma alta)

Descripción general de la unidad

El perfil 2 procede de una pequeña depresión situada en el interior del juncal halófilo que se encuentra colonizada por formas altas de *Spartina maritima* (42.0 ± 5.9 cm, comunidad *Spartinetum maritimae*) con densidades de 956 ± 93 pies m^2 (Sánchez *et al.* 1997) (Fotografías 3 y 4). Son espacios

mal drenados, encontrándose el suelo saturado en agua durante todo el año ya que la capa freática se encuentra prácticamente en superficie (0.2 ± 0.8 cm; Sánchez *et al.*, 1998). El suelo presenta condiciones subóxicas en superficie transformándose en anóxicas por debajo de 10 cm (Eh: 90 a -166 mV). La conductividad eléctrica es elevada, lo que pone de manifiesto una influencia mareal importante (cond. eléctrica: > 15 dS m^{-1}).



FOTOGRAFÍA 3 y 4.- Pequeñas depresiones que existen en el interior del juncal halófilo presentan un drenaje imperfecto y por consiguiente un encharcamiento en superficie permanente. Estas zonas son colonizadas por *Spartina maritima*, especie que tolera las presencia de concentraciones elevadas de sulfuro en el agua intersticial. La fotografía 4 muestra el aspecto de los suelos de esta unidad (perfil 2). Se trata de un suelo que presenta en superficie condiciones subóxicas y en profundidad (por debajo de los 10 cm) anóxicas. En él se puede observar moteados rojizos como consecuencia del efecto de oxidante de la vegetación sobre el suelo. El suelo fue clasificado como Typic Sulfaquents/Fluvisol prototiónico-endosódico (Fotog. 4).

Descripción morfológica

Horizonte	prof. (cm)	Descripción
Ag	0-10	Horizonte con abundantes raíces y rizomas vivos de <i>Spartina maritima</i> . Matriz marrón oliva, 2.5 Y 4/4 (h) y gris oscura, 2.5Y 4/1 (s); frecuentes moteados rojo amarillentos, 5YR 5/6 (h) y 5YR 5/8 (s). También presencia de moteados negros, 5BG 2/1 (h) y fuerte olor a sulfhídrico cuando se le añade HCl diluido, lo que indica la presencia de sulfuros de Fe metaestables, tipo mackinawita o greigita. Fluye fácilmente entre los dedos, prácticamente no maduro (n: 1.4-2). Límite difuso y ondulado.
ACg	10-15	Pocas raíces finas, matriz marrón oliva, 2.5 Y 4/4 (h), y gris oscuro, 2.5Y 4/1 (s). Moteados rojo oscuro escasos, 5YR 5/6 (h) y 2.5 YR 3/6 (s). Prácticamente no maduro (n: 1.4-2). Plástico y muy adhesivo. Límite difuso.
Cr	>15	Horizonte fuertemente reducido, gris verdoso, 5Y 4/1 (h) y 5Y 5/1 (s). Frecuentes raíces muertas y muy pocas raíces y rizomas vivos. Prácticamente no maduro (n:1.4-2.).

PERFIL 3: Borde de canal de la marisma alta con *Halimione portulacoides*

Descripción general de la unidad

Este suelo se sitúa al borde de un gran canal de la marisma alta. Son suelos con buen drenaje, está bien aireado y presenta condiciones redox óxicas, por lo menos en su horizonte superficial (Eh~ 350 mV; profundidad de la capa freática 17.1±13.4 cm; Sánchez *et al.*, 1998). Por debajo de los 25 cm puede presentar condiciones de hidromorfía alternante, con moteados rojizos situados en torno a canales o raíces que se encuentran inmersos en una matriz gris (Eh ~ 100 mV). No pre-

senta material sulfúrico, por lo menos en los 60 cm superficiales, aunque se observó en profundidad moteados negros que indican la presencia de sulfuros de Fe metaestables (Fotografías 5 y 6) (Tabla 2). En las marismas gallegas, los bordes de canal casi siempre aparecen ocupados por *Halimione portulacoides* (comunidad *Bostrychio-Halimionetum portulacoidis*), ya que esta especie no soporta la hidromorfía del suelo por su sensibilidad a la toxicidad del Mn²⁺ y Fe²⁺ (Armstrong *et al.*, 1985; Singer y Havil, 1993; Sánchez *et al.*, 1998).

TABLA 2. Principales características físico-químicas de la fracción sólida

Horiz.	Prof. (cm)	pH campo	pH incub	pH oxidac	M org.S total -----%-----	Spirit.	Textura	madurez (n)	
PERFIL 1: Borde marisma alta con <i>Scirpus maritimus</i>									
Hg	0-20	6.4	5.8	5.4	38.0	2.2	0.93	Arcillo-limosa	1.4-2
Cr	>20	6.4	3.2	2.5	19.7	2.8	0.90	Franco-arc.-limosa	1.4-2
PERFIL 2: Depresión marisma alta con <i>Spartina maritima</i> (forma alta)									
Ag	0-10	6.6	4.7	5.6	12.9	0.5	0.23	Franco-arc.-limosa	1.4-2
ACg	10-15	6.4	3.6	2.9	16.0	2.4	1.65	Franco-arc.-limosa	1.4-2
Cr	>15	6.5	3.1	2.8	13.1	2.3	1.46	Franco-arc.-limosa	1.4-2
PERFIL 3: Borde canal de marisma alta con <i>Halimione portulacoides</i>									
Ag	0-25	5.5	5.2	5.0	9.9	0.3	0.04	Franco-limosa	1.4-2
Cg	>25	6.8	5.8	2.6	6.3	0.5	0.04	Franco-limosa	1.4-2
PERFIL 4: Planicie de marisma alta con <i>Juncus maritimus</i>									
Ag	0-17	5.8	5.6	5.0	17.1	0.3	0.01	Franco-arc.-limosa	0.4-0.7
2Cg	17-40	6.0	5.6	2.2	9.8	0.3	0.01	Franco-arc.-limosa	1.4-2
3Cr	>40	6.5	5.5	2.2	14.6	0.4	nd	Franco-arc.-limosa	1.4-2
PERFIL 5: Depresión marisma alta con <i>Spartina maritima</i> (forma baja)									
Ag	0-10	6.3	6.5	5.4	9.2	0.5	0.10	Franco-arc.-limosa	1-1.4
2Cg	10-25	6.3	4.7	2.9	8.4	0.7	0.60	Franco-limosa	1.4-2
3Cg	>25	6.6	3.3	2.5	9.9	2.1	0.80	Franco-arc.-limosa	1.4-2
PERFIL 6: Cubeta marisma alta, sin vegetación									
Ar	0-10	6.6	6.1	2.7	6.4	0.9	0.58	Franco-arc.-limosa	>2
Cg	10-25	6.7	6.3	4.7	2.4	0.1	0.04	Arcillosa	1-1.4
PERFIL 7: Planicie de marisma baja con <i>Spartina maritima</i> (forma alta)									
Ag	0-10	6.6	2.8	2.8	9.4	3.0	2.07	Franco-arc.-limosa	>2
Cr	10-25	6.7	2.6	2.3	7.0	3.2	1.54	Franco-arc.-limosa	1-1.4
2Cr	>25	6.5	2.7	2.4	6.4	2.9	0.85	Franca	0.7-1
PERFIL 8: Fondo canal marisma alta, sin vegetación									
Ag	0-12	7.4	5.1	2.9	5.2	1.0	1.06	Franco-arc.-limosa	>2
Cr	>12	7.1	5.9	2.3	4.4	1.5	1.32	Franco-arc.-limosa	1-1.4



FOTOGRAFÍA 5 y 6 – Los suelos de los bordes de canal se caracterizan por presentar al menos en superficie buen drenaje y aireación. En estas condiciones se desarrolla *Halimione portulacoides* ya que es un especie muy sensible a la toxicidad por Mn^{2+} o Fe^{2+} . El suelo fue clasificado como Sodic Hydraquents/Fluvisol epigleico-endosódico (Fotog. 6).

Descripción morfológica

Horizonte	prof. (cm)	Descripción
Ag	0-25	Horizonte con abundantes raíces finas y gruesas. Matriz marrón 7.5 YR 5/4 (h) y 7.5YR 3/2 (s). Moteados rojos 2.5 YR 3/6 (h) y 2.5 YR 5/8 (s). Fluye fácilmente entre los dedos, prácticamente no maduro (n: 1.4-2). Muy adherente y plástico. Límite gradual y ondulado.
Cg	>25	Raíces finas poco frecuentes. Matriz oliva oscura, 5 Y 4/4 (h), y gris, 2.5Y 6/1 (s). Moteados negro azulados, 5BG 2/1 (h) y rojo oscuros abundantes, 2.5 YR 4/8 (h) y 2.5YR 3/6 (s). Prácticamente no maduro (n: 1.4-2). Plástico y adherente.

PERFIL 4: Planicie de marisma alta con juncal halófilo (*Limonio serotini-Juncetum maritimi*)

Descripción general de la unidad

Corresponde a un suelo sobre el que se desarrolla el juncal halófilo, que constituye la comunidad que ocupa la mayor parte de la superficie de las marisma alta (Fotografía 7).

Los suelos sobre los que se asienta se caracterizan por estar bien aireados en superficie y presentar en los 20 cm superficiales una gran densidad de rizomas y raíces que le confieren condiciones óxicas (Eh ~400 mV; Fig. 4). En profundidad, presentan condiciones de hidromorfía alternante con abundantes moteados rojos en una matriz gris.

FOTOGRAFÍA 7.- El perfil 4 representa a un suelo característico de la planicie mareal dominada por el juncal halófilo (*Limonio-Juncetum maritimi*). Presenta condiciones óxicas en la mayor parte del perfil. En profundidad se pueden observar una matriz grisácea con abundantes moteados rojizos que ponen de manifiesto rasgos redoximórficos. El suelo fue clasificado como Sodic Hydraquents/Fluvisol epigleico-endosódico.



Descripción morfológica

Horizonte	prof. (cm)	Descripción
Ag	0-17	Horizonte con abundantes raíces finas y rizomas. Matriz marrón amarillenta, 10YR 4/5 (h) y 10YR 5/4 (s). Pegajoso, no fluye fácilmente entre los dedos, maduro (n: 0.4-0.7). Límite gradual y ondulado.
Cg	17-40	Raíces finas poco frecuentes. Matriz gris oscura, 5 Y 4/1 (h), y gris, 2.5Y 6/1 (s), con moteados rojos abundantes, 10R 3/6 (h) y 2.5YR 3/6 (s). Prácticamente no maduro (n: 1.4-2). Plástico y adherente. Límite gradual.
Cr	+40	Ausencia de rizomas y raíces vivas. Restos vegetales muertos. Matriz gris, 5Y 6/1 (h), pocos moteados rojos 10R 3/5 (h). Prácticamente no maduro (n: 1.4-2).

PERFIL 5: Depresión en la marisma alta colonizado por *Spartina maritima* (forma baja)

Descripción general de la unidad

El perfil 5 se encuentra en una depresión, a unos 5 metros de un canal de la marisma de Ladrado. Se trata de una zona mal drenada con encharcamiento en superficie y rodeado por el juncal halófilo (Fotografías 8 y 9). Situación similar a la del perfil 2; sin embargo, en este caso la unidad se encuentra colonizada por formas bajas de *S. maritima*

(22.3 ± 5.4 cm), con densidades de pies significativamente más elevadas (1603 ± 286 pies m^{-2}) (Sánchez *et al.*, 1997). Las condiciones redox ponen de manifiesto un ambiente anóxico ya en el horizonte superficial, con valores de Eh inferiores a 0 mV. En la parte superior del suelo son comunes los moteados. Sin embargo, también aparecen abundantes moteados rojos que ponen de manifiesto microambientes con condiciones óxicas o subóxicas.



FOTOGRAFÍA 8 y 9.- Aspecto de la unidad de sobre la que se desarrollan formas bajas de *Spartina maritima* en la marisma de Ladrado (Fotog. 8). El perfil 5, representa una situación biogeoquímica similar a la del perfil 2. Aunque en superficie ya es anóxico, presenta en el horizonte superficial moteados rojizos que evidencian microsistemas oxidantes asociados a edafotúbulos. El suelo fue clasificado como Typic Sulfaquents/Fluvisol prototónico-endosódico (Fotog. 9).

Descripción morfológica

Horizonte	prof. (cm)	Descripción
Ag	0-10	Horizonte con abundantes rizomas y raíces. Matriz gris oliva, 5Y 4/2(h), con moteados de color rojo, 2.5 YR 4/8 (h), y negro, 5BG 2/1 (h). Fluye fácilmente entre los dedos, prácticamente no maduro (n: 1-1.4). Plástico y adherente. Límite difuso.
Cg	10-25	Raíces finas, pocos rizomas y edafotúbulos. Matriz gris oscura, 5 Y 3/2(h), moteados rojo oscuros, 2.5 YR 4/8 (h) y 2.5YR 3/6 (s). Prácticamente no maduro (n: 1.4-2). Límite difuso.
Cg	+25	Raíces finas poco frecuentes, ausencia de rizomas. Abundantes restos vegetales muertos. Matriz gris, 5 Y 5/1 (h), con moteados rojo oscuros 2.5 YR 4/8 (h) y 2.5YR 3/6 (s). Prácticamente no maduro (n: 1.4-2).

PERFIL 6: Cubeta en la marisma alta, sin vegetación

Descripción general de la unidad

En estas marismas las cubetas son de tamaño reducido (~10 m²), permanentemente inundadas y sin colonizar por plantas vasculares (Fotografías 10 y 11). Su origen es incierto. Según Long y Mason (1983) las cubetas pueden formarse durante los procesos de colonización vegetal de zonas desnudas de la marisma. En este caso, las plantas dejan zonas sin colonizar que habitualmente

corresponden a ligeras depresiones. Cuando esto sucede, después de una pleamar viva, el agua queda retenida en la cubeta permaneciendo encharcada permanentemente lo que dificulta su posterior colonización. También, a partir de los canales de la marisma se puede formar una cubeta por derrumbe de sus paredes, dando origen a un dique que impide su drenaje. Los principales limitantes para la vegetación vascular son: la elevada salinidad y suelos anóxicos con concentraciones elevadas de sulfuros (Long y Mason, 1983).



FOTOGRAFÍA 10 y 11. La fotografía 10 muestra una cubeta de la marisma alta. Las cubetas son depresiones de la marisma sin colonizar por plantas vasculares y permanentemente inundadas. El suelo se caracterizó por presentar una situación de las condiciones redox invertida. En superficie es anóxico con una matriz gris y abundantes moteados negros que corresponden a sulfuros de Fe metaestables (principalmente mackinawita y greigita). Además la pirita fue la forma de Fe más abundante. Por el contrario, en profundidad (por debajo de los 15 cm) presentó una matriz grisácea con abundantes moteados rojos, y la concentración de sulfuros metálicos resultó muy reducida. Este suelo fue clasificado como Sodic Hydraquents/Fluvisol estagnico-endosódico.

Descripción morfológica

Horizonte	prof. (cm)	Descripción
Ar	0-10	Horizonte con una matriz color gris verdoso oscuro, 10Y 4/1 (h) y gris, 5Y 5/1 (s). Moteados negros, 5BG 2/1 (h). Escurre entre los dedos, no maduro (n > 2). Límite claro y ondulado.
Cg	10-25	Abundantes moteados rojo amarillentos, 5YR 4/6 (h) y 5YR 5/4 (s). Matriz gris oscura, 5Y 4/1 (h). Fluye fácilmente entre los dedos, prácticamente no maduro (n: 1-1.4).

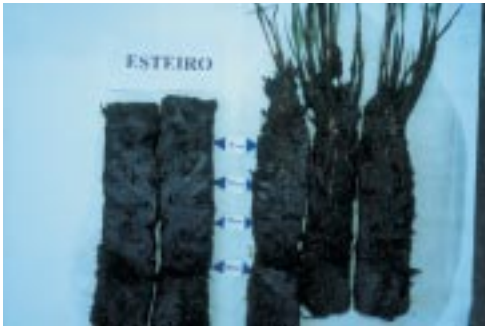
PERFIL 7: Planicie mareal de la marisma baja colonizada por *Spartina maritima* (forma alta)

Descripción general de la unidad

El perfil 7 corresponde a una zona de marisma baja, con una altura inferior al nivel medio de las pleamares muertas (263-273 cm



s.n.m.; Sánchez *et al.* 1997). Se trata, por tanto, de un medio que es inundado por todo tipo de pleamares (Fotografía 12). El suelo presenta condiciones fuertemente reducidas con un color negro verdoso, con moteados rojizos asociados a la zona radicular (Fotografías 13 y 14). Está colonizado por formas altas de *Spartina maritima* (37.8±7.4 cm), que se presenta con una densidad de pies significativamente inferior a la del perfil 2 (471±131 pies m²) (Sánchez *et al.*, 1997). La biomasa subterránea es también muy inferior a la encontrada en los otros dos suelos con *Spartina* (perfiles 2 y 5), lo que indica que se trata de una colonización incipiente (Otero 2000).



FOTOGRAFÍA 12, 13 y 14.- En la fotografía 12 se puede observar como el manto mareal inunda totalmente los suelos de la marisma baja colonizados por *S. maritima*. La inundación se produce dos veces por día y durante un tiempo prolongado. Además en bajar el suelo permanece encharcado en superficie. En estas condiciones los suelos son fuertemente anóxicos y la forma dominante de Fe es la pirita. Las fotografías 13 y 14, muestran el efecto de las raíces sobre el suelo en la marisma baja. En la fotografía 11 se presenta a modo comparativo el aspecto del sedimento sin colonizar por *Spartina maritima* y cuando este es colonizado (perfil 7). El suelo ha sido clasificado como Typic Sulfaquents/Fluvisol prototiónico-endosódico.

Descripción morfológica

Horizonte	prof. (cm)	Descripción
Ag	0-10	Horizonte con presencia de rizomas y raíces. Matriz color negro 5BG 2/1 (h) y gris 5Y 5/1 (s). Moteados rojos, 2.5 YR 3/6 (h) y 2.5 YR 5/8 (s), asociados a la presencia de raíces. Olor a sulfhídrico. Escurre entre los dedos, totalmente inmaduro (n>2).

Cr1	10-25	Ausencia de rizomas vivos y muy pocas raíces finas. Matriz color negro 5BG 2/1 (h) y gris verdosa, 10Y 5/1 (s). Ausencia de moteados. Fluye con facilidad entre los dedos (n: 1-1.4).
Cr2	25-35	Ausencia de rizomas y raíces vivas. Matriz gris oscura 5BG 2/1 (h), sin moteados. Abundantes arenas de cuarzo. Prácticamente maduro (n: 0.7-1).

PERFIL 8: Fondo de canal de la marisma alta, sin vegetación.

Descripción general de la unidad

Los canales de la marisma alta constituyen las vías de entrada y salida del flujo mareal, encontrándose inundados diariamente durante un prolongado periodo de tiempo. Incluso en bajamar el fondo del canal permanece saturado en agua. Las condiciones bio-

geoquímicas de estos suelos son similares a los que se encuentran en la marisma baja, presentando unas condiciones redox fuertemente reducidas ($E_h < -100$ mV). El perfil presenta un color homogéneo, negro o gris oscuro, excepto en los 5 cm superficiales donde pueden aparecer moteados rojizos asociados a los canales generados por poliquetos (Fotografías 15 y 16).



FOTOGRAFÍA 15 y 16. Aspecto del suelo de fondo de canal de la marisma alta. Se trata de suelo con condiciones fuertemente reducidas en todo el perfil y, por tanto con elevadas concentraciones de sulfuros metálicos. La actividad de la fauna del suelo (poliquetos) puede generar la oxidación de estos sulfuros que en marismas contaminadas con metales traza puede suponer su liberación e incremento de su biodisponibilidad (Otero *et al.* 2000). El suelo ha sido clasificado como Typic Sulfaquents/Fluvisol prototónico-endosódico.

Descripción morfológica

Horizonte	prof. (cm)	Descripción
Ag	0-5	Horizonte con una matriz de color negra, 5 BG 2/1 (h), canales recubiertos de color rojizo, 2.5YR 4/8 (h). Fluye muy fácilmente entre los dedos. Totalmente inmaduro (n >2). Presencia de trozos de conchas.
Cr	>10	Horizonte de color negro, 5 BG 2/1 (h), más compacto que el anterior, sin edafotúbulos, adhesivo. Fluye por entre los dedos, prácticamente inmaduro (n: 1-1.2). Presencia de trozos de conchas.

Características fisicoquímicas de los suelos

Textura y color

La composición textural se encuentra dominada por la fracción limo con porcentajes que oscilan entre 47% y 71.2%, seguida de la arcilla (16.6-64%) y la arena (3.5-30%), siendo las clases texturales dominantes la franco-arcillo-limosa y franco-limosa (Tabla 2). En algunos de los suelos se ha puesto de manifiesto discontinuidades en profundidad, posiblemente debido a un cambio en los procesos de sedimentación (Kostka y Luther, 1994).

En cuanto al color, en la marisma alta los horizontes superficiales presentaron una amplia variación. Se han descrito colores marrón amarillento (10YR 4/5) en suelos bien aireados en superficie (p.ej. perfil 3 y 4), marrón oliva (2.5Y 4/4) en medios subóxicos en los cuales el Fe puede encontrarse tanto en forma reducida como oxidada (p. ej. suelo 2) y gris oliva (5Y 4/2) con moteados negros (5BG 2/1) y rojos (2.5 YR 4/8) que corresponden a horizontes con condiciones redox fuertemente reducidas y microambientes óxicos (p. ej. suelo 5). En profundidad, la situación es más homogénea dominando, colores claros (2.5 o 5Y) y generalmente con intensidad ≤ 2 (p.ej. gris, 5Y 6/1; gris oliva, 5Y 4/2; gris verdoso, 10Y 4/1 y marrón oliva, 2.5 Y 4/4) que es característico de horizontes con condiciones ácuicas, fuertemente reducidos (ver p.ej., Vepraskas y Wilding, 1983; Dorronsoro *et al.* 1988; Stoops y Eswaran, 1985; Megonigal *et al.* 1993); y que está de acuerdo con los valores obtenidos para el Eh (Fig. 3).

Los moteados son un rasgo morfológico común en la mayoría de los horizontes superficiales y, en algunos casos, también en profundidad (p. ej. perfil 5 y 6). En líneas generales se identifican dos tipos de moteados: moteados rojizos (10YR 4/8, 5YR 5/6, 2.5 YR 5/8) y negros (5BG 2/1). El perfil 6 presentó un patrón inverso en cuanto a la distri-

bución de los colores con la profundidad. Así, el horizonte superficial mostró un color gris verdoso oscuro (10Y 4/1), con moteados negros (5BG 2/1), mientras que el horizonte subsuperficial se caracterizó por mostrar una gran abundancia de moteados rojo amarillento (5YR 4/6) en una matriz gris oscura (5Y 4/1).

En la marisma baja (perfil 7) y canales de la marisma alta (Perfil 8), la matriz mostró un color negro (5BG 2/1) con algunos moteados rojizos asociados a edafotúbulos.

Condiciones redox

La figura 3 muestra la variación de las condiciones redox con la profundidad para cada perfil. Los valores más elevados se encontraron en el perfil 4 (planicie mareal) que presentó condiciones óxicas ($E_h > 300$ mV) en todo el perfil. Una situación similar se obtuvo en el perfil 3 (borde de canal), mientras que en los restantes el E_h fue en general inferior a 100 mV, correspondiendo los valores más bajos al perfil 8 (fondo de canal) donde el potencial redox fue siempre inferior a -100 mV.

Los resultados obtenidos para el rH presentaron también un amplio rango de variación, oscilando entre 24.7 y 5.3 (Fig. 4). Todos los suelos, excepto el perfil 4, presentaron al menos algún horizonte con un rH inferior a 19, lo que indica que una sección de los mismos se encuentra saturada en agua durante tiempo suficiente para permitir la reducción y segregación del hierro según establece la clasificación FAO (1998). Además, se ha encontrado una buena correlación entre el rH y el índice de color ($r_s = 0.623$, $p = 0.003$, $n = 20$; Fig. 4), lo que pone de manifiesto una estrecha relación entre la morfología y las condiciones de aireación de los suelos.

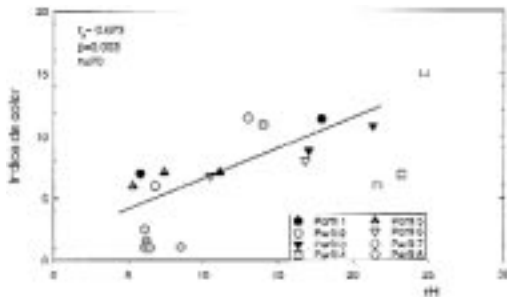


FIGURA 4. Relación entre las condiciones redox (rH) y el color del suelo.

Reacción del suelo y acidez potencial

El pH de campo osciló en la mayor parte de los casos entre 6 y 7 (Tabla 2). No obstante, cuando la muestra es incubada durante dos meses en condiciones aerobias el pH experimenta un descenso que pone de manifiesto importantes diferencias tanto entre suelos como entre horizontes de un mismo suelo, oscilando entre una disminución inferior a una unidad de pH (p.ej perfil 3 y 4) hasta valores inferiores a 3.5 (p.ej. perfiles 1, 2, 7). Sin embargo, la reacción ácida potencial (pH de oxidación) supuso una caída mucho más brusca y generalizada del pH, de manera que prácticamente todos los horizontes subsuperficiales presentaron valores inferiores a 3, mientras que en superficie mostraron valores especialmente bajos los perfiles 6, 7, 8 (Fig. 5). Estos resultados están de acuerdo con los obtenidos por otros autores que al drenar un suelo potencialmente sulfato ácido y tras un periodo de 70 días sólo obtuvieron la oxidación de un 0.038% (peso húmedo) de la piritita, estimando necesario un periodo superior a los 10 años para su total oxidación (2.086% peso húmedo) (Ritsema y Groenenberg, 1993). Esta lenta cinética de oxidación puede ser consecuencia de la precipitación de oxihidróxidos de Fe (principalmente ferrihidrita) en torno a los cristales de piritita cuando la oxidación ocurre a un pH superior 4 (Ritsema y Groenenberg, 1993; Zhang y Evangelou, 1996). En nuestro caso, los resultados obteni-

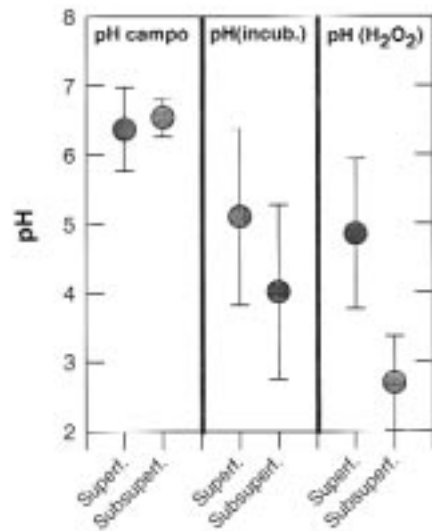


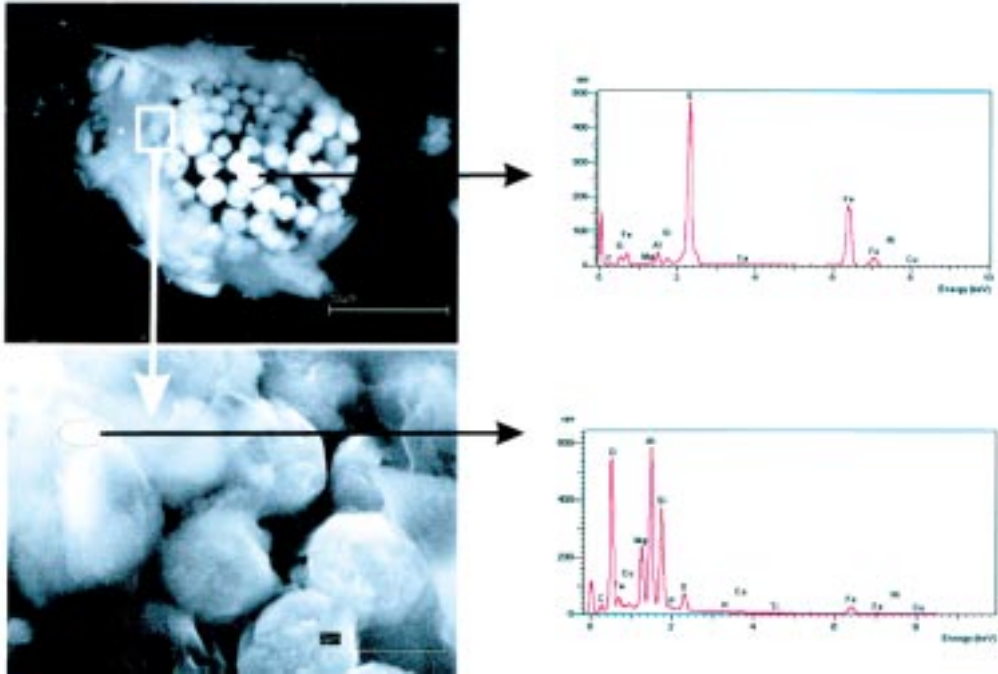
FIGURA 5. Variación del pH de campo, de incubación y oxidación en horizontes superficiales y subsuperficiales (media±D.E.).

dos por microscopía electrónica (SEM) han puesto de manifiesto en las pirititas framboidales recubrimientos constituidos por aluminio, oxígeno y silicio que podrían actuar como freno a su oxidación (Fotografía 16).

Por otra parte, la caída brusca del pH cuando la muestra es oxidada con H_2O_2 , incluso en suelos con cantidades muy reducidas de sulfuros de Fe (Otero, 2000), puede estar relacionada también con la ausencia de carbonatos (excepto en el caso del perfil 8) y la baja capacidad de los minerales de la arcilla para neutralizar la acidez derivada de la oxidación de la piritita y de la materia orgánica. De hecho, el mineral dominante en la fracción arcilla en suelos y sedimentos de las rías gallegas es la caolinita (Cabaneiro y Macías, 1978; Macías y Calvo 1988), la cual presenta una reducida capacidad de neutralización de la acidez por su reducida CIC.

Carbono orgánico y S total

Los valores más elevados de C orgánico correspondieron a los suelos de marisma colonizados por plantas vasculares (Tabla 2),



FOTOGRAFÍA 16.- Microfotografía de una pirita framboidal con recubrimiento rico en sílice.

destacando los porcentajes obtenidos para la zona sobre la que se desarrolla la especie *Scirpus maritimus* (perfil 1) con un 38% de materia orgánica en el horizonte superficial. Las concentraciones más bajas correspondieron a los horizontes subsuperficiales de los suelos no colonizados por la vegetación (perfil 6 y 8) con valores inferiores al 3%. En la mayoría de los perfiles se ha encontrado una disminución irregular del C orgánico con la profundidad, tal y como corresponde a su carácter fluvéntico (Fig. 3).

El porcentaje de S total osciló entre 0.1% y 3.2% (Tabla 2). Los resultados muestran que las concentraciones de S más elevadas no se corresponden exactamente con las concentraciones más altas de C orgánico. Así, suelos con concentraciones relativamente bajas de materia orgánica presentaron porcentajes muy elevados de S total, como el perfil 7 (S total: 3.2-2.9%; mat. org.: 9.4-6.4%) o el

perfil 8 (mat. org. 5.2-4.4 y S total: 1 y 1.5%). Estos resultados indican que en estos suelos la concentración de S es independiente de la de C y se produce por la acumulación de formas inorgánicas de azufre debido a los procesos de reducción del sulfato.

Salinidad, conductividad eléctrica y porcentaje de sodio intercambiable (PSI)

En todos los casos el catión dominante fue el sodio, seguido del magnesio, calcio y potasio, mientras que el cloruro fue el anión más abundante (Tabla 3). La conductividad eléctrica y PSI más bajos se obtuvieron en el perfil 1 (cond. elect. 3.9 ± 4.1 ; PSI: 8.76 ± 8.9 ; Tabla 3), que corresponde a un suelo salino según la clasificación establecida por Richards (1954). Los restantes suelos presentaron una conductividad superior a 4 dS m^{-1} y un PSI muy superior al 15%, lo que indica que se trata de suelos salino-alcalinios (Richards, 1954).

Caracterización físico-química del agua intersticial

En general, la conductividad eléctrica fue elevada, superando en la mayor parte de los casos los 15 dS m⁻¹. Sin embargo, se ha encontrado una gran variabilidad espacial, oscilando entre 0.8 dS m⁻¹ del perfil 1 a más de 50 dS m⁻¹ del perfil 6 (Tabla 4). Esta variabilidad se explica por la gran heterogeneidad de combinaciones posibles entre la inundación mareal, la precipitación y la evapotranspiración (Beefink, 1977) y la influencia de los niveles freáticos y aguas flu-

viales. En cuanto a la variación espacial del pH, los resultados muestran que en la mayor parte de los casos oscila dentro de un estrecho intervalo comprendido entre 7 y 8. Valores que fueron ligeramente superiores al pH del suelo realizado *in situ* (Tablas 2 y 4).

Un aspecto de especial interés en los suelos de marisma es la reducción del sulfato. En medios anóxicos una buena parte de la respiración microbiana utiliza como aceptor de electrones el sulfato según la reacción 1 (Howarth, 1984).



Cuando esto ocurre el sulfato del agua intersticial es consumido y la relación SO₄/Cl pasa a ser inferior a la del agua de mar (Giblin, 1988) (SO₄/Cl del agua de la Ría de Ortigueira = 0.14; Otero, 2000). Valores inferiores a 0.14 se han encontrado en la mayor parte de los horizontes subsuperficiales y especialmente en el perfil 7 de la marisma baja, con un valor para esta relación de 0.08 en el horizonte Cr (Tabla 4). Como producto final de la reducción del sulfato se genera la pirita (FeS₂), motivo por el cual algunos horizontes con bajo contenido en C orgánico pueden presentar en cambio un contenido elevado de S total.

Clasificación de los suelos

Atendiendo a los resultados obtenidos para los suelos estudiados, los principales horizontes y propiedades de diagnóstico identificados fueron: presencia de horizonte H hístico (perfil 1), propiedades ácuicas (*rasgos redoximorfos*), material sulfúrico y valores de madurez n > 0.7, según la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999). Por otra parte, aplicando los criterios de la FAO (1998), habría que añadir a las anteriores: propiedades gleicas y flúvicas. Según la Soil Taxonomy, todos los suelos pertenecen al suborden Aquents, como consecuencia de sus condiciones reductoras, su bajo grado de madurez y presencia de material sulfúrico. Esta última propiedad se puso de manifiesto

TABLA 3. Concentración de cationes, aniones, conductividad eléctrica y porcentaje de sodio intercambiable (PSI) (media±desviación típica) de los horizontes superficiales

Perfil	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	pH	C.E.	PSI
	cmol l ⁻¹							dS m ⁻¹	%
Perfil 1	12.2±9.8	16.6±10	28.7±27	1.22±0.6	383±30	36.6±38.0	7.6	3.9±4.1	8.7±8.9
Perfil 2	23.8±8.8	60.3±18	559±169	15.6±6.5	818±212	201±114	7.7	15.3±3.3	55.3±5.1
Perfil 3	5.4±4.1	26.0±17	186±52	3.90±1.7	39.7±10	278±112	7.0	6.70±4.5	39.7±10
Perfil 4	13.2±4.4	34.9±19	361±71	8.30±1.2	52.4±3.2	501±107	7.6	14.1±4.9	52.4±3.2
Perfil 5	25.6±9.0	66.4±5.0	597±127	17.6±5.4	55.8±4.1	785±214	6.9	16.3±2.1	55.8±4.1
Perfil 6	26.0±13	67.5±4.4	491±110	12.8±3.8	633±198	131±62	7.4	17.0±1.4	50.6±5.4
Perfil 7	35.1±11	56.1±14	430±159	10.4±3.4	570±222	116±50	7.4	12.8±4.4	47.0±7.6
Perfil 8	37.7±3.7	66.8±2.8	504±33.4	11.6±1.8	677±40.0	157±70	7.4	11.2±1.4	50.4±1.4

en los perfiles 1, 2, 5 y 7 y está de acuerdo con la idea de que el material sulfúrico va asociado a porcentajes de S pirítico superiores a 0.75% valor que, según van Breemen, (1982), representa la capacidad de neutralización de la acidez generada por la oxidación de los sulfuros por parte de los minerales de

la fracción arcilla y cationes de intercambio. Estos suelos fueron clasificados como Typic Sulfaquents (Soil Survey Staff, 1999), Fluvisoles prototiónico-endosódico según la FAO (1998); excepto en el caso del perfil 1, que al presentar un horizonte H hístico, fue clasificado como Histic Sulfaquents

TABLA 4. Características físico-químicas del agua intersticial

Horiz.	Prof. (cm)	pH	C. eléctrica dS m ⁻¹	SO ₄ ⁻ . ----- mg l ⁻¹ -----	Cl ⁻¹	SO ₄ ⁻ /Cl
PERFIL 1: Borde marisma alta con <i>Scirpus maritimus</i>						
H	0-20	7.6	0.82	148	166	0.89
Cr	>20	7.4	3.50	276	662	0.41
PERFIL 2: Depresión marisma alta con <i>Spartina maritima</i> (forma alta)						
Ag	0-10	7.6	29.9	1243	9490	0.13
ACg	10-15	-	-	-	-	-
Cr	>15	7.5	48.3	1760	17931	0.10
PERFIL 3: Borde canal de marisma alta con <i>Halimione portulacoides</i>						
Ag	0-25	7.0	15.5	713	4512	0.16
Cg	>25	6.8	6.20	2624	22320	0.12
PERFIL 4: Planicie de marisma alta con <i>Juncus maritimus</i>						
Ag	0-17	7.6	19.8	904	5506	0.16
Cg	17-40	-	-	-	-	-
Cr	>40	6.6	-	2740	20992	0.13
PERFIL 5: Depresión marisma alta con <i>Spartina maritima</i> (forma baja)						
Ag	0-10	7.0	34.6	1335	11197	0.12
Cg	10-25	-	-	-	-	-
Cg	>25	7.0	44.8	1906	16631	0.11
PERFIL 6: Cubeta marisma alta, sin vegetación						
Ar	0-10	7.4	54.1	1840	-	-
Cg	10-25	7.4	12.3	1735	-	-
PERFIL 7: Planicie de marisma baja con <i>Spartina maritima</i> (forma alta)						
Ag	0-10	7.4	40.2	1610	1910	0.11
Cr1	10-25	-	-	-	-	-
Cr2	>25	7.5	21.7	957	957	0.08
PERFIL 8: Fondo canal marisma alta, sin vegetación						
Ag	0-12	7.3	26.1	1052	7884	0.13
Cr	>12	7.9	31.1	1190	9898	0.12

(Fluvisol hístico-prototiónico). En el caso del perfil 8 (fondo de canal) a pesar de presentar cantidades elevadas de S pirítico (S pirítico > 1%; Tabla 2) el pH se mantuvo por encima de 5, debido a la presencia de conchas en el perfil que incrementa la capacidad de neu-

tralización de ácidos del suelo impidiendo su acidificación por oxidación. Este perfil, así como el 4, 5, y 6 fueron clasificados como Sodic Hydraquents (Fluvisol epigleico-endosódico los perfiles 4,5 y Fluvisol estágnico-endosódico el perfil 6) (Tabla 5).

TABLA 5. Clasificación de los suelos

Perfil	Soil Taxonomy (1999)	FAO (1998)
1	Histic Sulfaquents	Fluvisol hístico-prototiónico
2	Typic Sulfaquents	Fluvisol prototiónico-endosódico
3	Sodic Hidraquents	Fluvisol epigleico-endosódico
4	Typic Hidraquents	Fluvisol epigleico-endosódico
5	Typic Sulfaquents	Fluvisol prototiónico-endosódico
6	Sodic Hidraquents	Fluvisol estágnico-endosódico
7	Typic Sulfaquents	Fluvisol prototiónico-endosódico
8	Sodic Hidraquents	Fluvisol epigleico-endosódico

REFERENCIAS

- Armstrong, W, Wright, E.J., Lythe, S. y Gaynard, T.J. (1995): Plant zonation and the spring-neap tidal cycle on soil aeration in a Humber salt marsh. *J. Ecol.* 7: 323-339.
- Beefink, W. G. (1977): The coastal salt marshes of western and northern Europe: An ecological and phytosociological approach. En V.J. Capman (ed), *Wet Coastal Ecosystem*, Elsevier, Amsterdam, 109-155.
- Bescansa, P. y Roquero, C. (1990): Characterization and classification of tidal marsh soils and plant communities in North-west Spain. *Catena*: 17: 347-355.
- Buurman, P. (1967): Relaciones entre suelo y vegetación de unas rías de la España occidental. Departamento de Geología, Suelo y Agricultura. Universidad de Wageningen. Holanda.
- Cabaneiro, A. y Macías, F (1978): Mineralogía de las arcillas en sapropelas en Galicia. *Trabajos Compostelanos de Biología* 7: 87-101.
- Carballeira, A.; Devesa, C.; Retuerto, R.; Santillán, E. y Uceda, F. (1983): *Bioclimatología de Galicia*. Fundación P. Barrié de la Maza. A Coruña.
- Dent, D. (1986): Acid sulphate soils: A baseline for research and development. Int. Inst. Land Reclam. and Improvement (IILRI). Publ. 39. Wageningen
- Evans, C.V. y Franzmeier, D.P. (1988): Color index values to represent wetness and aeration in some Indiana soils. *Geoderma* 41: 353-368.
- FAO (1998): World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resource Report 85. Roma
- Gee, G.W., y Bauder, J.W. (1986): Particle-size analysis. En A Klute (Ed) *Methods of Soil Analysis Part 1.-Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy, Inc., Soils Science Society of America. Madison-Wisconsin, USA, 383-411.
- Giblin, A.E. (1988): Pyrite formation in marshes during diagenesis. *Geomicrobiol. J.* 6: 77-97.

- Gil, J.I. y Girardeau, J. (1991): El Complejo de Cabo Ortegal. *Investigación y Ciencia* 180:6-14.
- Girardeau, J.; J.I. Gil y N.B. Jamaa (1989): Evidence for a heterogeneous Upper Mantle in the Cabo Ortegal Complex, Spain. *Science* 245: 1231-1233.
- González, S.J., Lista, M., Carballas, M., y Carballas, T (1989): Humic substances in a catena of estuarine soils: Distribution of organic nitrogen and carbon. *Sci. Total Environ.* 81/82: 363-372.
- Guitián Ojea, F. y Muñoz Taboadela, M. (1966): Estudio agrobiológico de la provincia de La Coruña. Instituto Nacional de Edafología y Agrobiología "José M^a Albareda" del C.S.I.C., Instituto de Investigaciones Geológicas y Agrobiológicas de Galicia. Santiago de Compostela.
- Guitián Ojea, F (1974): Itinerarios de los suelos en Galicia. Universidad de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela.
- Guitián Ojea, F., Carballas, T. y Muñoz Taboadela, M. (1982): Suelos naturales de la provincia de Lugo. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Instituto de Investigaciones Agrobiológicas de Galicia. Santiago de Compostela.
- Howarth, R.W. (1984): The ecological significance of sulfur in the energy of salt marsh and coastal marine sediments. *Biogeochem.* 1: 5-27.
- Huerta-Díaz, M.A y Morse, J.W. (1990): A quantitative method for determination of trace metal concentrations in sedimentary pyrite. *Mar. Chem.* 29:119-144.
- IGME (1977): Mapa geológico de España. Hoja de Cariño (1:50.000) n° 1(6-2).
- Konsten, C.J.M., Adriesse, W. y Brinkman, R. (1988): A field laboratory method to determine total potential and actual acidity in acid sulphate soils. In Selected Papers of the Dakar Symposium on Acid Sulphate Soils. Internacional Institute for Land Reclamation and Improvement. 44: 106-134, Wageningen.
- Kostka, J.E. y Luther III, G.W. (1995): Seasonal cycling of Fe in saltmarsh sediments. *Biogeochem.* 29: 159-181.
- Kubiena, W.L. (1952): Claves sistemáticas de suelos. Instituto de Edafología, C.S.I.C. Madrid.
- Leiros, M.C. (1979): Suelos hidromorfos en Galicia. Tesis Doctoral. Facultad de Biología. Universidad de Santiago de Compostela.
- Leirós M.C. y Guitián Ojea, F. (1981): Suelos de la zona húmeda española. XI.- Contribución al estudio de los suelos hidromorfos de Galicia. I. Suelos costeros. *An. Edafol. Agrobiol.* 40: 1707-1734.
- Long, S.D. y Mason, C.F. (1983): Salt marsh ecology. Blackie. London. 160 p.
- Luther, G.W. III; Ferdelman, T.G.; Kostka, J.E.; Tsamakis, E.J. & Church, T.M. (1991). Temporal and spatial variability of reduced sulfur species (pyrite, thiodulfate) and pore water parameters in salt marsh sediments. *Biogeochem.* 14: 57-88.
- Macías, F. y Calvo, R. (1988): Arcillas y limos de sedimentos actuales de las rías de Galicia. Consideraciones genéticas. *Geociencias* 3:179-187.
- Megonical, J.P., Patrick, W.H. Jr y Faulkner, S.P. (1993): Wetland identification in seasonally flooded forest soils: Soil morphology and redox dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 140-149.
- Munsell Color Company (1975): Mussel Soil Color Charts. Munsell Color Co. (ed). Baltimore. MD.
- Otero, X.L. (2000): Biogeoquímica de metales pesados en ambientes sedimentarios marinos. I. Fluvisoles de la marismas de la Ría de Ortigueira. II Sedimentos de la Fosa hidrotermal de Guaymas (Golfo de California-Mexico). Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Otero, X.L., Sánchez, J.M. y Macías, F (2000b): Bioacumulación de heavy

- metals in thionic fluvisols by a marine polychaete: The role of metal sulfides. *J. Environ. Qual.* 29:1133-1141
- Pons, L.J. y Zonneveld, I. (1965): Soil ripening and soil classification. Initial soil formation in alluvial deposits and a classification of the resulting soils. Int. Inst. Land Reclam. and Improvement (IILRI). Publ. 13. Wageningen. The Netherlands. 128 p.
- Rhoades, J.D. (1982): Soluble salts. En A.L. Page, R.H. Miller y D.R. Keeney (eds.), *Methods of soils analysis. Part. 2, Chemical and microbiological properties.* American Society of Agronomy y American Soil Science Society, Soil Science Society of America, Madison-Wisconsin, 167-179.
- Richards, L.A. (1954): Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. USDA Manual n° 60. Limusa, México.
- Ritsema, C.J. y Groenbergen, J.E. (1993): Pyrite oxidation, carbonate weathering and gypsum formation in a drained potential acid sulfate soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 968-976.
- Singer, C.E. y Havill, D.C. (1993): Resistance to divalent manganese of salt-marsh plants. *J. Ecol.* 81:797-806.
- Sánchez, J.M. (1995): Caracterización florística y fitosociológica de las rías de Ortigueira y Ladrado (NW de la Península Ibérica) en relación con factores ambientales. Tesis doctoral, Universidad de Santiago de Compostela.
- Sánchez, J.M., Otero, X.L., Izco, J. y Macías, F. (1997): Growth form and population density of *Spartina maritima* (Curtis) Fernald in Northwest Spain. *Wetlands* 17: 368-374.
- Sánchez, J.M., Otero, X.L., Izco, J. (1998): Relationships between vegetation and environmental characteristics in a salt-marsh system on the coast of Northwest Spain. *Plant Ecology* 136: 1-8.
- Soil Survey Staff (1975): Soil taxonomy. USDA. Handb. 436. U.S. Government Printing Office, Washington.
- Soil Survey Staff (1999): Soil Taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil survey. Second edition. USDA. Washington, 869 p.
- Stoops, G y Eswaran, H. (1985): Morphological characteristics of wet soils. En *Wetland soils. Characterization, Classification and Utilization.* International Rice Research Institute. Manila-Philippines, 177-189.
- Van Breemen, N. (1982): Genesis, morphology and classification of acid sulfate soils in coastal plains. En J.A. Kittrick *et al.* (Ed.), *Acid sulfate weathering.* Spec. Pub. 10. Soil Science Society of America. Madison-Wisconsin, WI, USA, 95-108.
- Van Breemen, N. (1988): Effects of seasonal redox processes involving iron on chemistry of periodically reduced soils. En J.W. Stucki *et al.* (Eds), *Iron in soils and clays minerals.* Reidal Publi. Co., Boston, 797-809.
- Vepraskas, M.J. y Wilding, L.P. (1983): Aquic moisture regimes in soils with and without low chroma colors. *Soil Sci Soc. Am. J.* 47: 280-285.
- Zhang, Y.L. y Evangelou, V. P. (1996): Influence of iron oxide forming conditions on pyrite oxidation. *Soil Science* 161: 852-864.

FERTILIZACIÓN EN LA REVEGETACIÓN DE ÁREAS DEGRADADAS EN EL PRE-PIRINEO CATALÁN

A. HERETER, A.M.C VERDÚ, R. BALLESTEROS, R. JOSA

Escola Superior Agricultura Barcelona. Urgell 187. 08036 Barcelona. España. E-mail: agnes.hereter@upc.es

Abstract: Field restoration experiences of some eroded areas in the Pyrenean mountains showed the importance of substrate nutrient enrichment through chemical fertilization. A greenhouse experience using regolithic materials from the badlands of the High Llobregat basin (Catalunya, NE Spain) was conducted to study the influence of the kind of nutrient added and the fertilizer rate on plant used in their revegetation. The fertilizer doses were: 1 (the normal amount for the crops of the area: 64 kg N ha⁻¹, 120 kg P₂O₅ ha⁻¹ and 120 kg K₂O ha⁻¹), 0.5, 1.5 and 2 fold. The results demonstrate that phosphorus is the nutrient that limits the chemical fertility of this substrate longer, because the addition of this element increases the production two-fold, whereas the material supplies sufficient potassium. Maximum plant production is found when NPK and NP fertilizers are used, especially when the rate is 1.5. With this dose the success of the field revegetation is achieved.

Key words: Badlands, Reclamation, Chemical fertilization, Regolith.

Resumen: Experiencias previas de revegetación de áreas degradadas en los Pirineos, demostraron la necesidad del abonado mineral. Se ha realizado una experiencia de laboratorio utilizando el material regolítico de badlands del Alto Llobregat para estudiar la influencia del tipo de nutriente y la dosis del fertilizante en las plantas utilizadas en su revegetación. Las dosis de fertilizante fueron: 1 (usual en los cultivos de la zona: 64 kg N ha⁻¹, 120 kg P₂O₅ ha⁻¹ y 120 kg K₂O ha⁻¹), 0.5, 1.5 y 2. Los resultados demuestran que el fósforo es el nutriente que limita principalmente la fertilidad química de este tipo de sustrato, ya que su aporte incrementa dos veces la producción vegetal, mientras que los niveles de potasio son suficientes. Los mayores valores de producción se obtienen cuando se utilizan fertilizantes NPK y NP y especialmente cuando la dosis es 1.5. En condiciones de campo, es la adecuada para conseguir la revegetación de los badlands.

Palabras clave: Badlands, Restauración, Fertilización química, Regolito.

INTRODUCCIÓN

En la vertiente sur de los Pirineos se ha descrito frecuentemente la existencia de áreas degradadas con morfología de *badlands* (Clotet *et al.*, 1988; Gonzalez *et al.*, 1994; Tello *et al.*, 1994). En las zonas húmedas, esta morfología se justifica por la rotura de un equilibrio inestable (por causas naturales o antrópicas) entre los procesos geomorfológi-

cos y la vegetación (Gallart, 1992). Sin que sea un fenómeno generalizable en los Pirineos, su existencia tiene consecuencias remarcables: las zonas de *badlands* están intensamente degradadas y suponen una fuente importante de sedimentos que van a parar al sistema de drenaje. Además, el fuerte contraste entre las zonas con una cubierta vegetal continua y las denudadas crea un fuerte impacto visual.

En Vallcebre (Alto Llobregat, Barcelona) existe desde 1986 un sistema de cuencas experimentales, alguna de las cuales se encuentra en áreas activas de badlands y en las que se han medido tasas de erosión de 9 mm/año (Clotet *et al.*, 1988). Se ha observado que la ausencia de vegetación en las laderas de los *badlands* y los ciclos alternativos de hielo-deshielo y de humectación-deseccación aceleran la erosión, con la consiguiente pérdida de nutrientes. La superficie del regolito presenta una morfología de tipo "popcorn" (Imeson y Verstaten, 1988) que facilita sus desplazamientos durante las precipitaciones intensas (Regüés *et al.*, 1994). Las condiciones de sellado superficial del suelo influyen asimismo sobre el comportamiento hidrológico estacional del regolito. En las condiciones más desfavorables, la velocidad de infiltración oscila entre 1 y 7 mm/h (Regüés *et al.*, 1995).

En otras áreas climáticas, como en el semiárido del SE de España, diversos estudios sobre *badlands* concluyen que, además de los procesos erosivos, se han de considerar otros factores limitantes del medio dependiendo de las características de cada regolito, para explicar la falta de germinación y crecimiento vegetal en estas áreas (García-Fayos y Recatalá, 1992; García-Fayos *et al.*, 2000).

En este trabajo se presentan los resultados de unas experiencias de laboratorio, paralelas a ensayos de restauración de la vegetación más amplios realizados por Ballesteros (1994) en la zona de Vallcebre. Se trata, en éste caso, de estudiar la respuesta de diversas especies vegetales frente a la dosis de fertilizante en un regolito de los *badlands*, deficiente en elementos nutritivos para las plantas. Dado el origen del material regolítico, con una pluviometría que puede considerarse elevada, en ésta experiencia se ha considerado el aporte hídrico como factor no limitante, para ello, en el ensayo se ha introducido el riego.

CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA

La zona en la que se realizaron los ensayos de campo está situada en la cuenca de El Carot (Berguedà, Barcelona) a unos 1300 m de altitud. La precipitación anual media es de 850 mm y la temperatura media anual 9 °C. El sustrato litológico está constituido por margas y arcillas rojizas del Cretácico (con 22-65% arcillas) sobre calizas con 17-53% CaCO₃ (Solé *et al.*, 1992).

La vegetación de las áreas con *badlands* es heterogénea y escasa. Dependiendo de la orientación y de las características topográficas, puede variar desde un prado (en el límite del frente de progreso de las cárcavas) hasta zonas sin ninguna cubierta vegetal (en el propio badland). Incluso existe un gradiente florístico desde los puntos culminales a las zonas bajas en cada *badland*, asociado a los procesos erosivos. La vegetación climax de la zona pertenece a la asociación *Quercion pubescenti-petraeae*, aunque debido a la actividad humana en las últimas décadas son frecuentes los prados de *Aphyllantion*. También existen algunos pinares de *Pinus sylvestris* (Guardia, 1995).

En esta zona, se han llevado a cabo experiencias de restauración en áreas con suelos denudados, donde no era posible la colonización y desarrollo de la vegetación natural (Ballesteros, 1994). En la primera fase de estos procesos, para estabilizar las laderas y reducir las pérdidas de regolito, es necesario modificar la pendiente mediante la realización de aterrazamientos. Con las condiciones topográficas mejoradas, el regolito alterado por el hielo fue utilizado como sustrato para la vegetación a introducir. Las variables climáticas y físicas favorables que proporcionarían una mejor revegetación en nuestro caso fueron una pluviometría suficiente durante el período post-siembra y pendientes inferiores a 25°. En estas condiciones, la remoción de las semillas introducidas fue nula, mientras que con pendientes de 45° se produjeron pér-

didas del 40%. De estos ensayos, se dedujo así mismo que el abonado mineral del sustrato era imprescindible para asegurar el éxito de la revegetación, dada la pobreza del contenido en nutrientes del regolito.

MATERIAL Y MÉTODOS

El material que se utilizó como sustrato, el regolito de los *badlands*, tiene las características relacionadas en la Tabla 1. Se observa el déficit en materia orgánica así como en fósforo asimilable, como consecuencia de la retrogradación de los materiales calcáreos.

Se llenaron contenedores de 1440 cm³ (25.5*15.7*3.6 cm) con muestras del regolito superficial secado al aire (4.7% humedad) y tamizado por 5 mm. Se seleccionaron especies vegetales de los cultivos de la zona, y que son usuales en los trabajos de revegetación de espacios degradados. Se sembró una mezcla de 33% *Medicago sp.*, 25% *Dactylis glomerata*, 25% *Festuca pratensis*, y 17% *Lolium hybridum* en dosis de 20 g m⁻². Durante el periodo de la experiencia (de abril a julio) se controló el contenido de agua del sustrato y se realizaron los riegos necesarios para evitar estrés hídrico. Con el primer riego, se aplicó

un acondicionador de la estructura (PVA, alcohol polivinilo) en dosis de 3 g m⁻². El acondicionador aportado, mantuvo su efecto durante todo el periodo que duró el ensayo y, a pesar del riego, no se manifestó la morfología en *popcorn*.

El abonado se aplicó en 23 tratamientos que combinaban dosis de abonado y tipo de nutriente utilizado (Tabla 2): nueve tratamientos de N, P o K, con dosis 0.5, 1 y 2; nueve tratamientos de NP, NK o PK con dosis 0.5, 1 y 2; cuatro tratamientos con NPK con dosis 0.5, 1, 1.5 y 2, además de un tratamiento sin abonado como control. La dosis 1 es la que se utiliza en los cultivos de la zona: 64 kg N ha⁻¹, 120 kg P₂O₅ ha⁻¹ y 120 kg K₂O ha⁻¹. De cada tratamiento se realizaron cuatro réplicas y los parámetros medidos en las plantas al final de la experiencia (momento de máxima madurez vegetal que se alcanzó en el mes de julio) fueron el peso fresco y la producción (peso seco 105°C).

Los resultados se compararon mediante análisis de la varianza (ANOVA). En el caso de diferencias significativas ($p < 0.05$) se analizaron los tratamientos mediante el test SNK (SAS Institute, 1992).

TABLA 1. Principales características del material usado como sustrato.

Profundidad cm	Gravas %	Textura USDA %			C.Textural (USDA)	pH H ₂ O	CaCO ₃ %	M.O %	C.E.C. cmolckg ⁻¹	K ₂ O mg kg ⁻¹	P ₂ O ₅ mg kg ⁻¹
		Arena	Limo	Arcilla							
0-4	5.0	10.7	75.2	14.1	Franco limosa	8.1	21.8	<0.03 ^a	35.7	79.4	<5 ^a
4-20	4.9	5.9	75.9	18.2	Franco limosa	8.3	25.0	<0.03 ^a	29.3	54.5	<5 ^a

^a: Inferior al rango mínimo de sensibilidad del método utilizado (Oxidación sulfocrómica para la materia orgánica y método Olsen para el fósforo).

TABLA 2. Dosis de fertilizante aplicadas en los tratamientos.

Dosis	N	kg ha ⁻¹	
		P ₂ O ₅	K ₂ O
0.5	32	60	60
1	64	120	120
1.5	96	180	180
2	128	240	240

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El peso de las plantas en el tratamiento control es inferior a la de la mayoría de los tratamientos estudiados (Tabla 3), mientras que los mayores valores de peso fresco (PF) y peso seco (PS), superiores a 500 g m⁻² y 100 g m⁻² respectivamente, se obtienen en los tratamientos en los que se utiliza abonado NPK

y NP. Si se compara el efecto de estos dos tipos de abonado, la producción es similar, o incluso superior, entre las dosis más altas de NP (dosis 2) y las de NPK. En general, con los restantes tratamientos de fertilización analizados, el peso seco de las plantas no se incrementa significativamente respecto al de las plantas control.

TABLA 3. Valores medios (n=4) de Peso fresco y Peso seco de las plantas (g m⁻²), en los diferentes tratamientos de fertilización. sd = desviación standard.

Fertilizante	Dosis	Peso fresco	sd	Peso seco	sd
NPK	0,5	365,00* b ^a	25,33	71,56* b	7,51
	1	538,50* b	62,15	111,13* ab	11,10
	1,5	786,94* a	231,70	149,44* a	47,30
	2	526,69* b	62,13	105,56* ab	8,53
NP	0,5	382,69* b	56,78	83,63* b	8,65
	1	411,06* b	73,30	84,69* b	12,10
	2	589,56* a	21,99	102,88* a	2,93
PK	0,5	267,00 a	41,34	54,81 a	10,60
	1	299,00* a	23,53	57,50 a	6,31
	2	288,31* a	80,56	56,25 a	13,39
NK	0,5	177,56 a	41,76	40,63 a	4,17
	1	172,00 a	36,36	38,13 a	5,95
	2	145,56 a	20,76	32,00 a	7,20
N	0,5	169,81 a	21,93	37,13 a	2,50
	1	191,06 a	60,93	42,75 a	10,50
	2	140,88 a	21,45	33,19 a	3,29
P	0,5	212,69 a	62,31	46,88 a	9,65
	1	176,75 a	35,93	37,94 a	3,58
	2	188,31 a	49,38	41,31 a	7,58
K	0,5	141,31 a	26,54	33,50 a	6,88
	1	116,56 a	14,56	26,31 a	3,56
	2	131,38 a	39,59	31,75 a	8,62
CONTROL	0	127,25	11,86	30,19	5,99

* Diferencias significativas (p<0.05) con el tratamiento control.

^a Los valores medios de un mismo fertilizante con distintas letras minúsculas, indican diferencias significativas (p<0.05) entre dosis.

Cuando se analiza para cada tipo de fertilizante las diferencias entre las dosis utilizadas, los resultados muestran que los valores

de PS no son significativamente diferentes para los tratamientos con fertilizante simple o PK y NK. Incluso, con las dosis más bajas

de algunos fertilizantes (dosis 0.5 de NK, P o K) la producción vegetal es superior, aunque no estadísticamente diferente, que cuando se utilizan dosis más altas.

En el caso del fertilizante complejo NPK, en el que se analizaron cuatro tipos de dosis, se obtienen los valores estadísticamente mayores de PF (aunque con alta variabilidad) cuando se utiliza la dosis 1.5. Sin embargo, cuando se considera la producción (PS), no existen diferencias significativas con las dosis 1 o 2. Se deduce por lo tanto, que parece innecesario aumentar el aporte de nutrientes que se realiza con las dosis más altas de éste fertilizante, en relación con las dosis habituales. En contraste con todos los otros tratamientos, cuando se utiliza la dosis 2 en el fertilizante NP, siempre se incrementa el peso por m² de las plantas.

Por otro lado, también se han analizado los resultados considerando únicamente las consecuencias del elemento nutritivo aportado (Tabla 4). En los sustratos estudiados se observa que no existe diferencia en la producción vegetal respecto la aportación de potasio; por el contrario, sí que se ve afectada cuando se refiere al nitrógeno o fósforo. Los ensayos a los que no se aportó fósforo son los de menor producción y además, los que presentan un mayor incremento. Consecuentemente, los materiales de los *badlands* como los del Carot, que en su origen

son deficitarios en fósforo, muestran una muy buena respuesta cuando se aporta este nutriente y se obtiene una producción vegetal en estas condiciones experimentales, dos veces superior a la conseguida sin su aporte.

Los resultados obtenidos en las experiencias de campo muestran que, para que la revegetación de los *badlands* fuera adecuada (considerando como adecuada una cubierta vegetal > 50% de la superficie) la producción vegetal tenía que ser superior a 110 g m⁻² (Ballesteros, 1994). En los ensayos de laboratorio, esta producción se alcanza cuando se aporta como mínimo la dosis 1. En las condiciones de campo, más adversas para el crecimiento vegetal, las dosis de abonado tendrían que ser superiores, entre 1 y 1.5, para asegurar el éxito en la restauración. A partir de los resultados obtenidos en los tratamientos con el fertilizante NPK, se propone no utilizar mayores dosis, ya que no se obtienen incrementos significativos de la producción. Además, la alta solubilidad de los fertilizantes, junto con las bajas tasas de infiltración de los *badlands*, podría contribuir a la eutrofización de las aguas embalsadas. La dosis 2 de los fertilizantes binarios de nitrógeno y fósforo, también puede considerarse óptima para la revegetación en la zona.

En resumen, la experimentación en condiciones controladas en los materiales de los *badlands* muestra la limitada capacidad del regolito para desarrollar vegetación sin aporte de nutrientes, por tanto cualquier iniciativa de restauración requiere como mínimo la aplicación de fertilizantes. En segundo lugar pone de manifiesto la eficacia comparada de diferentes tipos de fertilizantes y las dosis a utilizar. Se facilita así los trabajos de revegetación, ya que se incide sobre un factor limitante importante en estos sustratos, permitiendo que se establezca en un periodo corto de tiempo una cubierta vegetal suficiente para disminuir las tasas de erosión de estos materiales degradados.

TABLA 4. Efectos de la presencia o ausencia de un elemento en los fertilizantes en el peso medio de las plantas (g m⁻²). n = número de muestras.

Fertilizante	n	Peso fresco	Peso seco
Con N	52	353,63 a ^a	71,79 a
Sin N	40	194,73 b	41,65 b
Con P	52	387,02 a	77,21 a
Sin P	40	151,33 b	34,60 b
Con K	52	304,29 a	62,19 a
Sin K	40	258,88 a	54,13 a

^a Los valores medios para una mismo elemento, designados con distinta letra, son significativamente diferentes (p<0.05).

CONCLUSIONES

Las arcillas erosionadas del Cretácico de los Prepireneos tienen un contenido muy bajo en N y P asimilable; sin embargo, los niveles de potasio son adecuados para la colonización y desarrollo de la vegetación que se utiliza en su recuperación. A partir de ensayos de laboratorio se concluye que, cuando se aporta fósforo con el abonado, se obtiene una producción vegetal dos veces superior en comparación a cuando no se aporta este nutriente.

La experimentación simultánea en condiciones de campo y de laboratorio es útil para seleccionar las dosis óptimas de abonado. Los mejores resultados de producción se obtienen cuando se aportan 96 kg N ha⁻¹, 180 kg P₂O₅ ha⁻¹ y 180 kg K₂O ha⁻¹ con fertilizantes NPK. Así mismo, se consiguen buenas respuestas cuando se aporta fósforo combinado con nitrógeno con dosis de 128 kg N ha⁻¹ y 240 kg P₂O₅ ha⁻¹. En estos casos parece suficiente para conseguir una cubierta vegetal superior al 50% de la superficie.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se ha realizado en el marco del proyecto PROHIDADE, financiado por la CICYT (AMB 95-0986-C02-01).

REFERENCIAS

Ballesteros, R. (1994): Efecte dels factors locals i de fertilitat en una experiència de revegetació em una àrea de badlands de la conca de l'Alt Llobregat. TFC Escola Superior Agricultura Barcelona. 257 p.

Clotet, N., Gallart, F., Balasch, J. (1988): Medium term erosion rates in a small scarcely vegetated catchment in the Pyrenees. *Catena Supplement* 13, 37-47.

Gallart, F. (1992): Sobre la actividad de las zonas de cárcavas en un gradiente de precipitación: Un experimento de ordena-

dor. En: Lopez-Bermudez, F., Conesa, C., Romero, M.A. (Eds.) *Estudios de Geomorfología en España*, S.E.G., Murcia. Tomo II, 705-711.

- García-Fayos, P., Recatalá, M.T. (1992): La reserva de semillas en una cuenca de "badlands" (Petrer, Alicante). *Pirineos* 140; 29-36.
- García-Fayos, P., García-Ventoso, B., Cerdà, A. (2000): Limitations to plant establishment on eroded slopes in southeastern Spain. *Journal of Vegetation Science* 11: 77-86.
- Gonzalez, C., Ortigosa, L., Martí, C., Garcia Ruiz, J.M. (1994): Aplicación de técnicas SIG al estudio de la organización espacial de procesos geomorfológicos en montaña. En: Arnáez, J., García-Ruiz, J.M., Gómez-Villar, A. (Eds.) *Geomorfología en España*, S.E.G., Logroño. Tomo II, 365-377.
- Guardia, R. (1995): La colonització vegetal de les àrees erosionades de la conca de La Baells (Alt Llobregat). Tesis Doctoral. Universitat Barcelona. Barcelona. 317 p.
- Imeson, A.C., Verstraten, J.M. (1988): Rills on badland slopes: A physicochemically controlled phenomenon. *Catena Supplement* 12:139-150.
- Regúés, D., Pardini, G., Vigna, G., Gallart, F. (1994): El efecto de los ciclos térmicos e hídricos sobre las rocas arcillosas: un experimento de laboratorio. En: Arnáez, J., García-Ruiz, J.M., Gómez-Villar, A. (Eds.) *Geomorfología en España*, S.E.G., Logroño. Tomo I, 6-72.
- Regúés, D., Pardini, G., Gallart, F. (1995): Regholic behavior and physical weathering of clayey mudrock in a gullied area, as dependent on seasonal weather conditions. *Catena* 25, 199-212.
- SAS Institute. (1992): SAS/STAT User's Guide. Version 6.08, vols I and II. Sans Institute Inc, Cary, NC.

- Solé, A., Josa, R., Pardini, G., Aringhieri, R., Plana, F., Gallart, F. (1992): How mudrock and soil physical properties influence badland formation at Vallcebre (Pre-Pyrenees, Spain). *Catena* 19, 208-300.
- Tello, B., Torcal, L., Gonzalez, J.A. (1994): Rasgos geomorfológicos del Valle del río Aragón, en las proximidades de Jaca (Huesca, Pirineo Aragonés). En: Arnáez, J., García-Ruiz, J.M., Gómez-Villar, A. (Eds.) *Geomorfología en España*, S.E.G., Logroño. Tomo II, 391-402.

APLICACIÓN DEL FLUJO DE CO₂ COMO INDICADOR DE LA CALIDAD DE LA RESTAURACIÓN EN ACTIVIDADES EXTRACTIVAS A CIELO ABIERTO

O. ORTIZ PERPIÑÁ y J. M. ALCAÑIZ BALDELLOU

CREAF (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals)–Unitat d'Ecologia. Universitat Autònoma de Barcelona. 08193 Bellaterra (Barcelona). JosepOriol.Ortiz@uab.es

Abstract. CO₂ efflux has been measured in the development of a retrospective analysis of limestone quarries rehabilitation in Catalonia. Rehabilitation treatments have been grouped into different categories according to soil application, soil amendment, sowing and plantation. CO₂ fluxes were usually below 1 g CO₂ m⁻² h⁻¹. Our analysis shows that the type of rehabilitation treatment has a major importance in the recuperation of the soil biological activity. This was especially true when rainfall was low (below 525 mm y⁻¹) and in soils with unbalanced textures. In these cases, there were not significant differences between soils where biosolids have been applied as organic amendment (1,127±0,227 g CO₂ m⁻² h⁻¹) and reference undisturbed soils (1,071±0,130 g CO₂ m⁻² h⁻¹). For organic amendment treatments, comparison between plots of different age suggests that the effect of the fresh organic matter addition on CO₂ flux is not transient.

Key words: Biological activity, CO₂ efflux, limestone quarries, soil restoration

Resumen. Se ha medido el flujo de CO₂ para una evaluación retrospectiva de los trabajos de restauración de áreas afectadas por minería de calizas a cielo abierto. Los trabajos de rehabilitación se han tipificado en distintas categorías atendiendo a las opciones más frecuentes (aporte de suelos, enmiendas orgánicas, siembra y plantación). Los flujos de CO₂ suelen ser inferiores a 1 g CO₂ m⁻² h⁻¹. Su evaluación demuestra que el tipo de tratamiento tiene gran importancia en la recuperación biológica del suelo, especialmente en áreas de escasas precipitaciones (menos de 525 mm anuales) y para granulometrías extremas. En estos casos, no aparecen diferencias significativas entre suelos enmendados con lodos de depuradora (1,127±0,227 g CO₂ m⁻² h⁻¹) y suelos de referencia no perturbados (1,071±0,130 g CO₂ m⁻² h⁻¹). En estos suelos, la comparación de parcelas de distintas edades sugiere que el efecto de la adición de materia orgánica fresca no es efímero.

Palabras clave: Actividad biológica, canteras, flujo de CO₂, restauración de suelos

INTRODUCCIÓN

Las actividades extractivas, aunque necesarias, generan un impacto ambiental notable, que conlleva una importante degradación del medio natural. Con el objetivo de paliar estos efectos, hace ya más de veinte años que se dictaron normas (Real Decreto 2994/1982

para el conjunto del Estado español y Ley 12/1981 para Catalunya) que obligan a la restauración de los espacios afectados por dichas actividades. En el transcurso de estos años se han ensayado distintas técnicas de restauración, centradas esencialmente en la restitución del suelo con materiales de calidades diversas, la enmienda de estos suelos

mediante residuos orgánicos, y la revegetación mediante siembras y/o plantaciones. Sin embargo, la diversidad de opciones que se presentan para el desarrollo de las labores de restauración, unida a la heterogeneidad entre explotaciones dificulta el establecimiento de unos procedimientos generales de restauración y la posterior evaluación del grado de éxito conseguido.

La utilización del flujo de CO₂ se presenta, en este contexto, como una alternativa rápida y económicamente viable a la realización de costosos análisis de caracterización de los suelos y de su cubierta vegetal. Cabe destacar, sin embargo, que este flujo no es regular en el tiempo, ya que puede verse alterado por numerosos factores que modifican el gradiente de concentraciones de CO₂ y generan una variabilidad espacial y temporal importante. Estos factores han sido revisados exhaustivamente por muchos autores (Witkamp, 1969; Atkinson, 1977; Neilson y Pepper, 1990; McCarthy y Brown, 1992).

Aunque el CO₂ producido en el interior del suelo puede tener también un origen abiótico (Miglietta *et al.*, 1993), fundamentalmente proviene de su actividad biológica, por lo que en muchas ocasiones se ha propuesto su utilización como indicador de la calidad, función y estado de conservación del suelo (Wolters, 1991; Insam, 2001). Valores elevados en el flujo de CO₂ indican elevados contenidos de materia orgánica, además de una biomasa microbiana metabólicamente activa y no afectada por factores que puedan inhibir su desarrollo (Jandl y Sollins, 1997; Fu *et al.*, 2000). Por el contrario, valores menores indican bajos contenidos de materia orgánica o una actividad metabólica reducida (Anderson y Domsch, 1993; Rouard *et al.*, 1996; García y Hernández, 1997; Speir *et al.*, 1999).

El objetivo de este trabajo consiste en la utilización del flujo de CO₂ como indicador para la evaluación retrospectiva de distintos tipos de labores desarrolladas en la rehabilitación de áreas afectadas por actividades mine-

ras a cielo abierto. Se pretende utilizar este parámetro para aportar información sobre qué tipo de labores de restauración son las que ofrecen los mejores resultados, en relación con los suelos de áreas vecinas no perturbadas. Estos suelos son indicadores de las características previas de las áreas afectadas y con frecuencia constituyen el objetivo a conseguir en la rehabilitación.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se seleccionaron 57 parcelas experimentales en 18 actividades extractivas a cielo abierto en Catalunya, destinadas a la explotación de recursos calizos y gravas. Los trabajos de restauración que se habían aplicado en las distintas explotaciones se tipificaron en 7 grupos de tratamientos de rehabilitación (Tabla 1), en función de los tipos de labores desarrolladas (aporte de suelo, aporte de lodos de depuradoras como enmienda orgánica, siembra y plantación). Se establecieron, además, 9 parcelas en zonas forestales próximas a las áreas explotadas, como indicadores de referencia (REF) del estado del suelo en ausencia de perturbaciones aparentes. Las parcelas experimentales (Tabla 2) eran formadas por suelos con una apreciable densidad aparente, en su mayoría de texturas francas, fuertemente carbonatados y con valores de pH moderadamente básicos. Los niveles de materia orgánica, fósforo y capacidad de intercambio catiónico eran generalmente bajos, exceptuando las parcelas en las cuales se habían incorporado enmiendas orgánicas.

El flujo de CO₂ se midió en campo mediante un equipo PP Systems compuesto por un analizador de CO₂ por infrarrojo (EGM) acoplado a una cámara cerrada (SRC). Se tomaron un total de 10 medidas en cada parcela experimental, en puntos al azar, con una intensidad media de muestreo de 400 puntos ha⁻¹. Las medidas del flujo de CO₂ se tomaron entre los meses de mayo y junio de 2000.

TABLA 1. Tratamientos de rehabilitación considerados. SO: Aporte de suelo; FA: Enmienda con lodos de depuradora; SE: Siembra; PL: Plantación. Se indica para cada posibilidad de tratamiento de restauración ensayado el número de parcelas que se han estudiado.

Denominación del tratamiento	SO	FA	SE	PL	n
SO (Aporte de suelo)	+				14
PL (Plantación)				+	3
SOPL (Suelo + plantación)	+			+	3
SOSE (Suelo + siembra)	+		+		18
SOSEPL (Suelo + siembra + plantación)	+		+	+	4
SOFA (Suelo con lodos)	+	+			6
SOFASE (Suelo con lodos + siembra)	+	+	+		9
REF (Suelos de referencia)	—	—	—	—	9

TABLA 2. Valores promedio de las principales características analíticas de los suelos de las parcelas experimentales, medidas en los proyectos coordinados.

Parámetro	REF	PL	SO	SOFA	SOFASE	SOPL	SOSE	SOSEPL
Tierra fina (%)	60,02	65,72	55,47	51,87	41,99	66,75	57,25	71,85
Densidad ap. (Mg m ⁻³)	1,06	1,76	1,69	1,31	1,49	1,70	1,57	1,78
Arena gruesa (%)	9,40	7,40	14,05	14,74	25,96	7,14	11,16	7,11
Arena fina (%)	24,02	17,55	30,92	25,58	23,08	26,37	25,15	26,62
Limo grueso (%)	13,50	13,37	12,17	13,06	9,83	20,59	13,35	16,54
Limo fino (%)	28,70	38,32	21,15	24,02	20,38	24,82	24,71	27,42
Arcilla (%)	24,34	23,36	21,71	22,61	20,54	21,08	25,63	22,32
CaCO ₃ (%)	36,98	67,80	42,33	29,23	66,79	41,33	35,32	45,28
pH (H ₂ O)	8,28	8,24	8,36	7,85	8,05	8,11	8,30	8,44
Materia orgánica (%)	6,85	1,13	1,58	3,87	2,48	1,31	2,23	1,13
P Olsen (mg kg ⁻¹)	11,22	26,33	20,36	185,50	256,44	11,00	12,53	5,25
N (%)	0,265	0,082	0,183	0,414	0,171	0,079	0,092	0,076
C/N	15,23	8,20	10,13	17,15	9,31	9,67	8,40	8,53
CIC (cmol _c kg ⁻¹)	25,39	11,91	21,39	37,21	16,36	11,06	13,48	11,00

La singularidad del flujo de CO₂, o independencia con respecto a otros paquetes de datos obtenidos en los proyectos coordinados, se ha verificado mediante matrices de correlaciones entre el flujo de CO₂ y el resto de parámetros referentes a las características de los suelos y de la cubierta vegetal. Los efectos de los distintos tipos de tratamientos de rehabilitación sobre el flujo de CO₂ se han verificado mediante análisis de varianza, tomando el tipo de tratamiento como fuente de variación. Estos análisis se han aplicado en tres niveles de concreción progresivamente más detallados: (1) con la totalidad de los

datos, (2) con pares de tratamientos que difieren en una única opción de restauración, y (3) con parcelas seleccionadas a partir de criterios de homogeneidad, en el análisis de escenarios o situaciones de restauración frecuentes. El efecto de la edad o antigüedad de la restauración sobre el flujo de CO₂ se ha evaluado mediante análisis de regresión lineal. Cuando se han detectado diferencias significativas en función de la edad se ha comprobado mediante el análisis de varianza si éstas pueden ser explicadas por distintos contenidos de materia orgánica en el suelo.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos muestran unos valores de flujo de CO_2 que por lo general no superan $1 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, llegando a $1,699 \pm$

$0,809 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ para el tratamiento SOFA (Fig. 1). Hay que destacar que los valores extremos se han hallado siempre en parcelas correspondientes al tratamiento SO ($0,078$ a $4,418 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

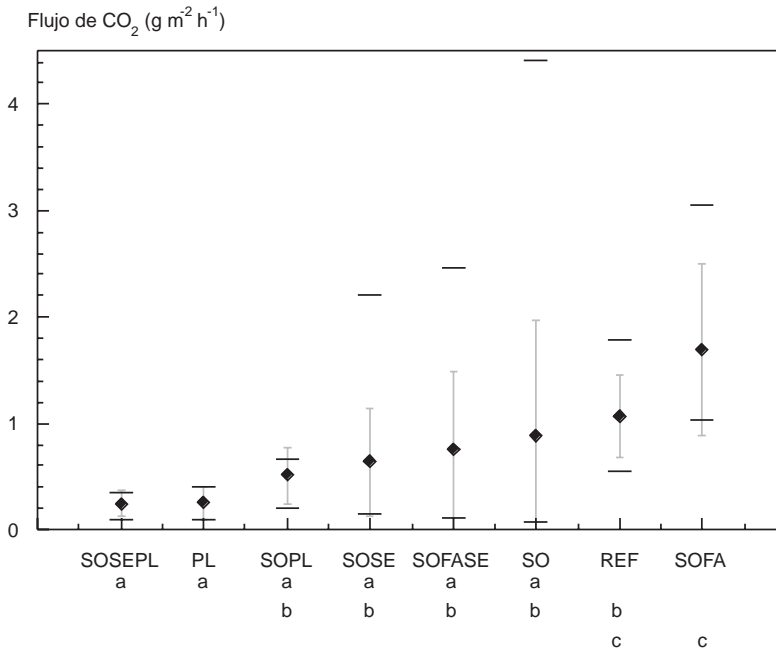


FIGURA 1. Flujos medios de CO_2 de las distintas parcelas experimentales agrupadas en función del tipo de tratamiento de restauración. Se incluyen los valores máximos y mínimos de cada grupo. Las barras de error corresponden a la desviación estándar. Las letras bajo el código del tratamiento indican la existencia de diferencias significativas para $\alpha = 0,05$.

Los análisis de correlación entre los datos de flujo de CO_2 y el resto de características analíticas medidas muestran (Tabla 3) que el flujo de CO_2 se relaciona con características del suelo, de su cubierta vegetal y del ambiente donde se halla, aunque éstas no resultan suficientes para explicar su variabilidad. Resulta interesante comprobar que una fracción importante de la variabilidad del flujo de CO_2 se explica por características relativas a la calidad o composición de la materia orgánica del suelo (54,7% nitrógeno total, 52,7% CIC, y 30,7% relación C/N), mientras que el contenido total de materia

orgánica del suelo se relaciona mucho menos con el flujo de CO_2 , explicando solamente un 17,4% de su variabilidad.

El análisis de varianza sobre el conjunto de los datos muestra un claro efecto del tratamiento sobre el flujo de CO_2 (Fig. 1). Sin embargo, existe un gran solapamiento entre los distintos tipos de tratamientos, pudiéndose afirmar tan sólo que las parcelas de referencia y las correspondientes al tratamiento SOFA son las únicas que muestran unos flujos de CO_2 claramente mayores al resto. Aunque significativo, este resultado no resulta suficiente para evaluar o clasificar los dis-

tintos tratamientos de rehabilitación en función de su efecto sobre el flujo de CO₂ hacia la atmósfera.

Los resultados de la comparación de pares de tratamientos que difieren en un único factor se presentan en la Tabla 4. Un aspecto que llama la atención de este análisis es que algunos factores aparecen como significativos en determinadas comparaciones, mientras que en otros parece que no tengan el más mínimo efecto. Este es el caso de, por ejem-

plo, la adición de lodos de depuradoras, que incrementa significativamente el flujo de CO₂ en las parcelas con suelo enmendado con lodos en comparación a las que no han sido tratadas (SOFA > SO; p=0,0244), pero cuyo efecto desaparece cuando las parcelas han sido, además, sembradas (SOFASE = SOSE; p=0,9084). Lo mismo sucede con los factores siembra (SE) y plantación (PL), cuyos efectos son aparentemente dependientes del hecho que se apliquen o no otros tratamientos.

TABLA 3. Resultados significativos de los análisis de correlación entre los valores de flujo de CO₂ y los de los distintos parámetros analíticos medidos en los proyectos coordinados. Se incluyen los valores promedio y la desviación estándar de cada uno de los parámetros medidos en el conjunto de parcelas analizadas.

Variable	Valor medio	r ²	p
Recubrimiento vegetal total (%)	80,72 ± 16,93	0,134	0,0002
Nitrógeno total (%)	0,167 ± 0,111	0,547	0,0003
Capacidad de intercambio de cationes (cmol _c kg ⁻¹)	17,97 ± 8,17	0,527	0,0004
Carbono orgánico (%)	1,59 ± 1,31	0,174	0,0005
Abundancia relativa de herbáceas (%)	78,94 ± 28,22	0,194	0,0006
Densidad aparente (Mg m ⁻³)	1,52 ± 0,31	0,165	0,0007
Índice de diversidad de la vegetación	1,29 ± 0,51	0,163	0,0018
Riesgo de encostramiento	0,83 ± 0,41	0,140	0,0020
Abundancia relativa de árboles (%)	9,82 ± 24,08	0,161	0,0020
Abundancia relativa especies plantadas (%)	9,91 ± 24,37	0,156	0,0023
Total especies vegetales	9,95 ± 4,09	0,141	0,0040
Recubrimiento arbóreo (%)	7,27 ± 15,96	0,136	0,0047
Conductividad hidráulica, k (m s ⁻¹)	2,39E ⁻⁴ ± 3,77E ⁻⁴	0,107	0,0078
Precipitación (mm)	632,84 ± 115,16	0,102	0,0090
Contenido de agua en saturación (%)	60,58 ± 35,80	0,096	0,0122
Agua de drenaje (%)	57,00 ± 34,57	0,095	0,0126
Relación C/N	11,83 ± 4,29	0,307	0,0139
Carbonato cálcico equivalente (%)	43,01 ± 20,64	0,072	0,0296

TABLA 4. Resultados de los análisis de la varianza de un factor para los pares de tratamientos estudiados.

Factor	Par de tratamientos	ANOVA p	Ordenación (si procede)
SO	SOPL / PL	0,2778	
FA	SOFA / SO	0,0244	SOFA > SO
	SOFASE / SOSE	0,9084	
SE	SOSEPL / SOPL	0,2135	
	SOFASE / SOFA	0,0199	SOFA > SOFASE
	SOSE / SO	0,8690	
PL	SOSEPL / SOSE	0,0348	SOSE > SOSEPL
	SOPL / SO	0,7722	

Se han establecido un total de 7 escenarios que corresponden a situaciones frecuentes en trabajos de rehabilitación de suelos de canteras (Tabla 5). En caso que el análisis de varianza muestre un efecto significativo del tipo de tratamiento aplicado, se presentan los que presentan flujos de CO₂ significativamente mayores al tratamiento elemental de aporte de suelo (SO). Como se observa en los resultados, cuando se aprecian diferencias significativas, los análisis suelen mostrar los tratamientos SOFA y SOFASE como los que presentan unos mayores flujos de CO₂. Es destacable también que en tres de los cuatro casos en que se observan diferencias significativas las parcelas de referencia (REF) muestran valores mayores que el tratamiento básico (SO), de la misma manera que los tratamientos SOFA y SOFASE. En ninguno de los escenarios que han resultado significativos el tratamiento SOFA ha aparecido como estadísticamente diferenciado de las parcelas de referencia, lo cual indica que este sistema de rehabilitación consigue, respecto al flujo de CO₂, un mayor parecido a estas áreas.

El efecto del tiempo transcurrido desde la restauración ha resultado significativo para los tratamientos SOFASE y SOPL (Tabla 6), aunque este último ha sido descartado por disponer solamente de parcelas de dos edades

distintas. Para las parcelas SOFASE, el efecto de la edad resulta levemente significativo, indicando que las parcelas tienden a presentar un mayor flujo de CO₂ con el paso del tiempo. El análisis de varianza para las parcelas SOFASE ha demostrado que no existen diferencias significativas entre los contenidos de materia orgánica de las parcelas de distintas edades ($p=0,8990$). Para el resto de tratamientos estudiados, no se observa ningún patrón de variación en el tiempo.

DISCUSIÓN

La multiplicidad de factores que desarrollan un efecto significativo en la configuración del flujo de CO₂ hacia la atmósfera ha sido plenamente demostrada mediante el análisis de correlaciones que se ha efectuado. Ello demuestra el carácter integrador de este parámetro y, por tanto, su carácter como indicador de un conjunto de propiedades o calidades del suelo.

Hay que destacar, en primer lugar, que los valores de flujo de CO₂ que se han medido en las parcelas experimentales no son, por lo general, excesivamente bajos (Jong *et al.*, 1979; Vekemans *et al.*, 1989), presentando unos valores comparables a los de suelos agrícolas o de pastos (Jensen *et al.*, 1996). Sin embargo, en pocas ocasiones se alcanzan

TABLA 5. Escenarios descritos y resultados de los análisis efectuados.

Escenario y tratamientos incluidos en el análisis	ANOVA p	Parcelas con flujo mayor a SO
Áreas de precipitaciones escasas Precipitación ≤ 525 mm SOPL, PL, SOSEPL, SO, SOSE, SOFASE, SOFA y REF	0,0266	SOSE, SOFASE, SOFA, REF
Áreas de precipitaciones elevadas Precipitación ≥ 700 mm SOSE, SO, SOFA y REF	0,3265	—
Suelos pedregosos Gravas ≥ 50% SO, SOFA, SOFASE, SOSE, SOSEPL y REF	0,2636	—
Suelos poco pedregosos Gravas < 50% SOSEPL, PL, SOSE, SOPL, SOFASE, SO, SOFA y REF	0,0023	SOFA, REF
Suelos poco pedregosos y precipitaciones escasas Gravas < 50% y Precipitación ≤ 525 mm SOPL, PL, SO, SOSE, SOFASE, SOFA y REF	0,0283	SOFA, REF
Suelos con bajo contenido de arcillas Arcillas ≤ 20% SOSEPL, SO, SOPL, SOSE, SOFASE, SOFA y REF	0,0415	SOFASE, SOFA
Suelos con pendientes pronunciadas PENDIENTE ≥ 30° PL, SO, SOFA, SOFASE, SOPL, SOSE y SOPL	0,0955	—

TABLA 6. Distribución del número de parcelas experimentales de cada tratamiento en función de su edad. Se indican los resultados de los análisis de regresión del flujo de CO₂ en función de la edad.

Parcelas	Edad de las parcelas (años)												Análisis de regresión			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	β_0	β_1	r ²	p	
SO	1	0	1	1	4	0	2	1	2	1	1	ns	ns	ns	ns	
PL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	—	—	—	—	
SOPL	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	-5,759	0,508	1,000	0,0136	
SOSE	2	1	1	2	7	0	3	0	2	0	1	ns	ns	ns	ns	
SOSEPL	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	ns	ns	ns	ns	
SOFA	2	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0	ns	ns	ns	ns	
SOFASE	3	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	-1,289	0,315	0,458	0,0452	
Total	8	4	6	4	13	0	5	3	7	3	5					

los valores de las parcelas de referencia, lo cual indica que se encuentran todavía distantes de los suelos no perturbados. Se puede afirmar, pues, que los trabajos de restauración no han conseguido una regeneración biológica completa de los suelos, o bien que el tiempo transcurrido desde su rehabilitación es todavía insuficiente. Este hecho resulta especialmente importante si consideramos que en el conjunto de las áreas estudiadas se han estudiado parcelas de entre 2 y 12 años de edad, ya que indica que se requiere un período de tiempo más largo para la recuperación funcional del suelo.

De acuerdo con Wagai *et al.* (1998) y Paustian *et al.* (2000), distintos tipos de tratamientos de rehabilitación crean distintas condiciones en el suelo que se reflejan en unos flujos de CO₂ también diferentes. Ello ha sido plenamente demostrado, aunque el problema aparece cuando se evalúa la eficacia de un tipo u otro de tratamiento a partir de los datos de flujo de CO₂, debido a la gran variabilidad de los resultados. Es destacable, así, que las parcelas correspondientes al tratamiento más simple, consistente en aportar únicamente suelo al área a restaurar (SO), presenta los valores menores y también mayores de todos los que se han medido.

La gran variabilidad existente en este tipo de características ha sido destacada recientemente por Insam (2001), afirmando que los suelos no perturbados muestran una variabilidad mucho menor que los suelos perturbados o sometidos a algún tipo de manejo. Cabe añadir la gran diversidad de tratamientos de rehabilitación que pueden ser incluidos bajo el epígrafe "SO", cuya única condición es que se haya realizado un aporte de suelo, sin enmiendas ni posteriores trabajos de revegetación, y que demuestra la gran importancia que tiene la selección de materiales que se van a emplear para la restauración. Hay que señalar todavía una tercera causa de variabilidad en los resultados, y es la introducida por las condiciones ambientales y climáticas específicas de cada parcela.

Esta es la razón por la cual en el análisis de tratamientos emparejados, aunque se reduce parte de la variabilidad entre parcelas, se obtienen unos resultados aparentemente contradictorios. Por ejemplo, y con relación al efecto de añadir una enmienda orgánica al suelo, como se ha señalado se observa un efecto muy marcado cuando éste es el único tratamiento aplicado (SOFA > SO), pero el efecto desaparece cuando se siembran las parcelas (SOFASE = SOSE). Ello es debido, sin duda, a que las precipitaciones son muy diferentes en la primera comparación (SOFA: 775 mm año⁻¹; SO: 695 mm año⁻¹) y más parecidas en la segunda (SOFASE: 580 mm año⁻¹; SOSE: 610 mm año⁻¹). La importancia de las condiciones climáticas sobre el flujo de CO₂, especialmente de las precipitaciones y de la temperatura, ha sido destacado ya por muchos autores (Insam, 1990; Grisi *et al.*, 1998; Lomander *et al.*, 1998a y 1998b).

Aunque esta variedad climática habría podido verse reducida en la selección de las parcelas experimentales, los resultados habrían sido engañosos, puesto que es una variabilidad real, y debe ser tomada en consideración en su justa medida.

Es en el análisis de escenarios concretos donde la variabilidad entre condiciones climáticas y edafológicas se reduce por la misma definición del escenario. En este análisis sí se manifiesta la capacidad del flujo de CO₂ para la discriminación de los distintos tipos de tratamientos. Los resultados obtenidos indican que la utilización de enmiendas orgánicas en los trabajos de rehabilitación incrementa significativamente el flujo de CO₂ hacia la atmósfera. Ello es especialmente significativo en aquellas situaciones en que las condiciones ambientales o las características del suelo resultan especialmente difíciles para la recuperación del sistema, como se ha visto en áreas de escasa pluviometría, y en suelos de granulometrías extremas.

Se podría argumentar que los mayores flujos de CO₂ en los suelos enmendados se

producen por un efecto temporal derivado del aporte de materia orgánica fresca. Efectivamente, estos residuos son portadores de una materia orgánica que se mineraliza, por lo general, muy rápidamente (Seaker y Sopper, 1988; Ortiz y Alcañiz, 1994). Sin embargo, se ha demostrado que el flujo de CO₂ no se modifica o tiende a aumentar con el paso del tiempo, por lo que se puede afirmar que el aporte de lodos de depuradora induce una mejora a largo plazo en las características y propiedades de los suelos tratados.

En comparación con las parcelas de referencia, los tratamientos que no incluyen el aporte de residuos orgánicos en la restauración muestran unos flujos de CO₂ menores y que, además, no tienen tendencia a incrementar con el tiempo. De ello puede deducirse que el proceso de recuperación de estos suelos se encuentra en una fase de estancamiento, o bien que su recuperación funcional es mucho más lenta que lo que permite deducir la escala temporal abarcada en este trabajo. En cualquiera de los dos casos, y desde un punto de vista biológico, debe concluirse que estos suelos no pueden calificarse, en el momento actual, como de suelos rehabilitados, sino, en todo caso, de suelos en proceso de rehabilitación.

CONCLUSIONES

El flujo de CO₂ como indicador de la calidad de la restauración de áreas afectadas por actividades extractivas constituye un parámetro que integra aspectos referentes a las características del suelo, de la cubierta vegetal y del ambiente. Ello le otorga validez en calidad de indicador global del estado del suelo, aunque le proporciona también una gran variabilidad que dificulta el establecimiento de unos valores de referencia.

Por ello, su utilización como indicador debe desarrollarse siempre en comparación con valores de referencia lo más próximos posible al área de estudio. El establecimiento

de estas áreas de referencia es un aspecto crítico del análisis, puesto que permite acotar unos márgenes de variabilidad mucho menores.

Por lo que respecta a las intervenciones de restauración de actividades extractivas, destaca en primer lugar su gran diversidad, lo cual dificulta la definición de unos patrones generales. Los tratamientos basados en la utilización de enmiendas orgánicas para la mejora de los suelos a rehabilitar se han demostrado eficaces en situaciones en las que las características ambientales o del sustrato a restaurar presentaban importantes limitaciones. De la misma manera, se ha demostrado que la selección de los materiales a utilizar tiene una gran importancia en el grado de recuperación conseguido.

AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo ha sido posible gracias a la subvención concedida por el Ministerio de Ciencia y Tecnología para el desarrollo del proyecto CE-FEDER: 2FD1997-1644-C03 "Evaluación ambiental retrospectiva de las intervenciones restauradoras en áreas afectadas por actividades extractivas a cielo abierto en Catalunya". Los autores agradecen la colaboración prestada por las empresas explotadoras y por el Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya.

REFERENCIAS

- Anderson, T.-H. y Domsch, K. H. (1993): The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biol. Biochem.* 25, 393-395.
- Atkinson, T. C. (1977): Carbon dioxide in the atmosphere of the unsaturated zone: an important control of groundwater hardness in limestones. *J. Hydrology* 35, 111-123.

- Fu, S., Coleman, D. C., Schartz, R., Potter, R., Hendrix, P. F., Crossley Jr., D. A. (2000): ^{14}C distribution in soil organisms and respiration after the decomposition of crop residue in conventional tillage and no-till agroecosystems at georgia Piedimont. *Soil Till. Res.* 57, 31-41.
- García, C. y Hernández, T. (1997): Biological and biochemical indicators in derelict soils subject to erosion. *Soil Biol. Biochem.* 29, 171-177.
- Grisi, B., Grace, C., Brookes, P. C., Benedetti, A., Dell'Abate, M. T. (1998): Temperature effects on organic matter and microbial biomass dynamics in temperate and tropical soils. *Soil Biol. Biochem.* 30, 1309-1315.
- Insam, H. (1990): Are the soil microbial biomass and basal respiration governed by the climatic regime? *Soil Biol. Biochem.* 22, 525-532.
- _____ (2001): Developments in soil microbiology since the mid 1960s. *Geoderma* 100, 389-402.
- Jandl, R. y Sollins, P. (1997): Water-extractable soil carbon in relation to the below-ground carbon cycle. *Biol. Fertil. Soils* 25, 196-201.
- Jensen, L. S., Mueller, T., Tate, K. R., Ross, D. J., Magid, J., Nielsen, N. E. (1996): Soil surface CO_2 flux as an index of soil respiration in situ: a comparison of two chamber methods. *Soil Biol. Biochem.* 28, 1297-1306.
- Jong, E. de., Redmann, R. E., Ripley, E. A. (1979): A comparison of methods to measure soil respiration. *Soil Sci.* 127, 300-306.
- Lomander, A., Kätterer, T., Andrén, O. (1998a): Modelling the effects of temperature and moisture on CO_2 evolution from top- and subsoil using a multi-compartment approach. *Soil Biol. Biochem.* 30, 2023-2030.
- _____ (1998b): Carbon dioxide evolution from top- and subsoil as affected by moisture and constant and fluctuating temperature. *Soil Biol. Biochem.* 30, 2017-2022.
- Miglietta, F., Raschi, A., Bettarini, I., Resti, R., Selvi, F. (1993): Natural CO_2 springs in Italy: a resource for examining long-term response of vegetation to rising atmospheric CO_2 concentrations. *Plant cell environment* 16, 873-878.
- McCarthy, K. P. y Brown, K. W. (1992): Soil gas permeability as influenced by soil gas-filled porosity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 997-1003.
- Neilson, J. W. y Pepper, I. L. (1990): Soil respiration as an index of soil aeration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54, 428-432.
- Ortiz, O. y Alcañiz, J. M. (1994): Respiration potential of microbial biomass in a calcareous soil treated with sewage sludge. *Geomicrobiology J.* 11, 333-340.
- Paustian, K., Six, J., Elliott, E. T., Hunt, H. W. (2000): Management options for reducing CO_2 emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry* 48, 147-163.
- Rouard, N., Dictor, M.-C., Chaussod, R., Soulas, G. (1996): Side-effect of herbicides on the size and activity of the soil microflora: DNOC as a test case. *Eur. J. Soil Sci.* 47, 557-566.
- Seaker, E. M. y Sopper, W. E. (1988): Municipal sludge for minespoil reclamation: I. Effects on microbial populations and activity. *J. Environ. Qual.* 17, 591-597.
- Speir, T. W., Kettles, H. A., Parshotam, A., Searle, P. L., Vlaar, L. N. C. (1999): Simple kinetic approach to determine the toxicity of $\text{As}[\text{V}]$ to soil biological properties. *Soil Biol. Biochem.* 31, 705-713.
- Vekemans, X., Godden, B., Penninckx, M. J. (1989): Factor analysis of the relationships between several physico-chemical and microbiological characteristics of some belgian agricultural soils. *Soil Biol. Biochem.* 21, 53-58.

- Wagai, R., Brye, K. R., Grower, S. T., Norman, J. M., Bundy, L. G. (1998): Land use and environmental factors influencing soil surface CO₂ flux and microbial biomass in natural and managed ecosystems in southern Wisconsin. *Soil Biol. Biochem.* 30, 1501-1509.
- Witkamp, M. (1969): Cycles of temperature and carbon dioxide evolution from litter and soil. *Ecology* 50, 922-924.
- Wolters, V. (1991): Biological processes in two beech forest soils treated with simulated acid rain - A laboratory experiment with *Isotoma tigrina* (Insecta, Collembolla). *Soil Biol. Biochem.* 23, 381-390.

Instrucciones a los autores para la presentación de manuscritos

La Revista de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo publica trabajos originales, revisión de artículos y notas cortas relacionadas con cualquiera de las diferentes Secciones de la Ciencia del Suelo.

Los manuscritos deberán estar escritos en español o en inglés.

De cada manuscritos (texto y figuras) se enviarán **Original y Dos Copias** a la dirección del Editor Principal. Las dos copias serán revisadas por especialistas elegidos por el Comité Editorial, y sólo se publicarán los manuscritos que hayan sido informados favorablemente. Tras la aceptación definitiva se solicitará a los autores una copia en disquete 3^{1/4}.

Cada manuscrito deberá estar preparado según las siguientes normas. Si no se cumplen le será devuelto a los autores.

I. Trabajos originales y revisión de artículos

1. Estructura y objeto del trabajo
2. Título
3. Título abreviado
4. Nombre(s) de autor(es) y nombre(s) y dirección(es) de la(s) institución(es)
5. Resumen-Abstract
6. Palabras Clave-Key Words
7. Texto
8. Referencias
9. Tablas
10. Figuras
11. Leyenda de tablas y leyenda de figuras

1. Estructura y objeto del trabajo

El plan indica el orden de los diferentes apartados del manuscrito. No será publicado.

2. Título

Deberá ser conciso, preciso y con palabras que reflejen el contenido del trabajo.

3. Título abreviado

No contendrá más de 60 caracteres, con objeto de poderlo imprimir en la parte superior de cada página impar de la revista.

4. Nombre(s) de autor(es)

Deberá incluirse las iniciales del nombre y los apellidos de cada autor, así como la dirección(es) completa(s) del centro de trabajo de cada uno. Cualquier correspondencia se dirigirá al primer autor si no existen indicaciones en contra.

5. Resumen-Abstract

Ambos deberán presentar los resultados principales del trabajo, con datos cuantitativos. Extensión máxima de 150 palabras.

6. Palabras Clave-Key Words

A continuación del Resumen y del Abstract se añadirán ocho palabras como máximo, que caractericen el contenido del trabajo.

7. Texto

Deberá ser claro y conciso. Como norma general, los trabajos no deben exceder 10 páginas mecanografiadas a doble espacio en tamaño DIN A4 con letra Courier 10, incluyendo, resúmenes, referencias, tablas y figuras.

Las referencias en el texto deberán aparecer como sigue: (Roquero, 1984; Guerra y Benayas, 1984).

o:

según Roquero (1984); y Guerra y Benayas (1984)

o, si son más de dos autores:

(Velasco *et al.*, 1988)

Si en la lista de referencias hay varias para un mismo autor con el mismo año de publicación, deberán distinguirse entre sí añadiéndole un letra, tal como se indica:

(Fernández 1987a; Brindley y Robison, 1947a y b)

Las figuras (independientemente de que sean gráficos o fotos) y las tablas se numerarán separadamente, usando números arábigos, así: (Fig. 3) (Tabla 2)

8. Referencias

Las referencias deberán presentarse en un listado final ordenado alfabéticamente, tal como sigue:

- Bliss, N.W. y MacLean, S.H. (1975): The paragenesis of zoned chromite from central Manitoba. *Geochim. Cosmochim. Acta* 39, 973-990.
- Frenzel, G., Ottermann, J., Kurtze, W. (1973): Uber Cu-haltigen Bleinglanz und Pb-haltigen Covellin von Boarezzo (Varese) und Sulfidparagenese. *Schweizer Mineral. Petrog. Mitt.* 53, 217-229.
- Guinier, A. (1956): Théorie et technique de la radiocristallographie. Dunod de., Paris, 736 p.
- Mc Laren, A.C. (1974): Transmission electron microscopy of the feldspars in <<the Feldspars>>, W.S. MacKenzie and J. Zussman, de. Manchester University Press, 379-423.
- Spry, P.G. (1978): The geochemistry of garnet-rich lithologies associated with the Broken Hill Orebody, N.S.W., Australia, M.S. thesis, Univ. Adelaide, Adelaide, Australia.
- ____; Scott, S.D. (1986a): The stability of zirconian spinels in sulfide systems and their potential as exploration guides for metamorphosed massive sulfide deposits. *Econ. geol.* 81, 1446-1463.

9. Tablas

Todas las tablas se reproducirán reduciendo un 50% y por tanto deberán estar escritas con especial cuidado y nitidez.

Se sugiere un espaciado de uno y medio y un número limitado de líneas horizontales o verticales.

La anchura de las tablas será de 13,5 cm (para reducir a una columna) o de 28 cm (para reducir a dos columnas).

10. Figuras

El tamaño máximo de los originales será de 21x29,7 cm. En ellos deberá figurar, escrito a lápiz en la parte posterior, el nombre del autor y el número de orden.

Dibujos y gráficos han de ser originales, preferiblemente delineados sobre papel blanco o vegetal, con grosor de líneas y tamaño de letras adecuados para ser legibles una vez reducidos; así, en una figura de 13,5 cm de ancho (para reducir a una columna) las letras deberán ser de 5 mm.

Fotografías: 4 como máximo, preferiblemente como diapositiva. Deberán tener un buen contraste y la escala irá incluida en cada una de ellas. Si las fotos están agrupadas en una lámina, se enviará también un duplicado de las fotos separadas.

11. Leyendas

Todas las figuras y tablas llevarán una leyenda suficientemente explicativa. Dichas leyendas se escribirán en una hoja aparte.

II. Notas cortas

La revista de la Sociedad Española de Ciencia del Suelo podrá publicar también los resultados más importantes de un trabajo en forma condensada; la totalidad de los resultados podrán ser presentados posteriormente en un trabajo más extenso.

Los artículos para su publicación pueden ser enviados al editor principal, Felipe Macías, a la siguiente dirección: Dpto. de Edafología. e Química Agrícola, Facultad de Biología, Campus Sur, 15782-Santiago de Compostela.

Los manuscritos originales y las ilustraciones se destruirán dos meses después de su publicación.

Advertencia: Los autores serán responsables de las faltas ortográficas y gramaticales de sus artículos.

