

*Análisis multivariante de los horizontes
orgánico-minerales de los suelos del Parque Natural
de Sierra Mágina (Jaén)*

*Multivariate analysis of the organo-mineral horizons of soils
in the Sierra Mágina Natural Park (Jaén, Spain)*

V. ARANDA¹, G.M. LIÉBANAS², G. DELGADO³, R. DELGADO³, J. CALERO³, R. PEÑA²
Y J.M. MARTÍN-GARCÍA¹

ABSTRACT

Soils are described normally using a great number of properties (variables). This generates a great quantity of data not easily understandable in a direct way. Consequently, multivariate analysis is necessary to support and confirm impressions and interpretations of investigations in field and laboratory. In the present work we quantify, through multivariate analysis, the relative influence of the different factors of soil formation that act on the soil system. We have studied 203 organo-mineral horizons, sampled to a depth between 0 and 25 cm of soils in the Sierra Mágina natural park (Jaén, Spain). The studied soils are from calcareous rocks. Five factors were found to be significant and showed that the organic carbon accumulation, decarbonation and the argillization/rubefaction, as internal variables, and the hill-slope, as external variable, they are those which explain a greater percentage of the natural variability of the soil system.

Keywords: Multivariate analysis, Factors of soil formation, Surface horizon, Sierra Mágina.

1 Departamento de Geología. Facultad de Ciencias Experimentales. Universidad de Jaén. e-mail: varanda@ujaen.es

2 Departamento de Biología Animal, Vegetal y Ecología. Facultad de Ciencias Experimentales. Universidad de Jaén.

3 Departamento de Edafología y Química Agrícola. Facultad de Farmacia. Universidad de Granada.

RESUMEN

Los suelos se describen normalmente usando un gran número de propiedades (variables). Esto genera una gran cantidad de datos no fácilmente manejables. El análisis multivariante apoya y confirma diferentes impresiones e interpretaciones de las investigaciones tanto de campo como de laboratorio. En el presente trabajo se cuantifica, mediante análisis multivariante, la influencia relativa de los diferentes factores de formación del suelo que actúan sobre el sistema suelo. Se han estudiado 203 horizontes orgánico-minerales, muestreados a una profundidad entre 0 y 25 cm, provenientes de suelos del Parque Natural de Sierra Mágina (Jaén). Los suelos estudiados proceden de rocas calcáreas. Cinco factores se han encontrado significativos estadísticamente, mostrando que la acumulación de carbono orgánico, la decarbonatación y la argillización/rubefacción, como variables internas, y la pendiente, como variable externa, son las que explican un porcentaje mayor de la variabilidad natural del sistema de suelo.

Palabras clave: Análisis Multivariante, Factores Formadores de suelo, Horizonte superficial, Sierra Mágina.

INTRODUCCIÓN

Las montañas mediterráneas con substrato de rocas carbonatadas -muchas de ellas compactas- constituyen un paisaje característico en nuestra región y se pueden considerar como reservas de biodiversidad. Concretamente, Sierra Mágina es un macizo montañoso perteneciente a las Zonas Externas de las Cordilleras Béticas y está catalogado como Parque Natural desde el año 1989. El estudio de sus suelos ha sido realizado por Martín-García *et al.* (2000). Los suelos de estos ambientes (Calcimagnésicos-Rendzinas, según Duchaufour, 1977) tienen gran importancia ecológica, ya que constituyen un factor limitante para la vegetación, dado su escaso espesor condicionado por el carácter compacto del substrato rocoso y el relieve montañoso, que desencadena procesos de erosión intensos que los rejuvenecen continuamente. En muchos de estos suelos el perfil de horizontes es de tipo A-R o A-C, con un espesor inferior a 20 cm (Leptosoles, FAO-1988); la totalidad del "solum" se corresponde, en la mayor parte de estos suelos, con el horizonte orgánico-mineral (epipedón). De ahí que su estudio en los ambientes de montaña mediterránea carbonatada sea esencial para comprender la dinámica y las potencialidades de estas áreas.

Los horizontes orgánico-minerales de los suelos pueden entenderse como una interfase biosfera-litosfera, donde los restos orgánicos y la actividad biológica (raíces, fauna y microorganismos) son el principal motor de la edafogénesis.

La descripción de los suelos requiere de un elevado número de propiedades (variables), muchas de ellas correlacionadas entre sí, lo que genera un gran volumen de datos difícilmente interpretables de forma directa. Por consiguiente, se hace necesario el empleo de una herramienta estadística (el análisis multivariante, y concretamente el análisis factorial) que permita agrupar variables

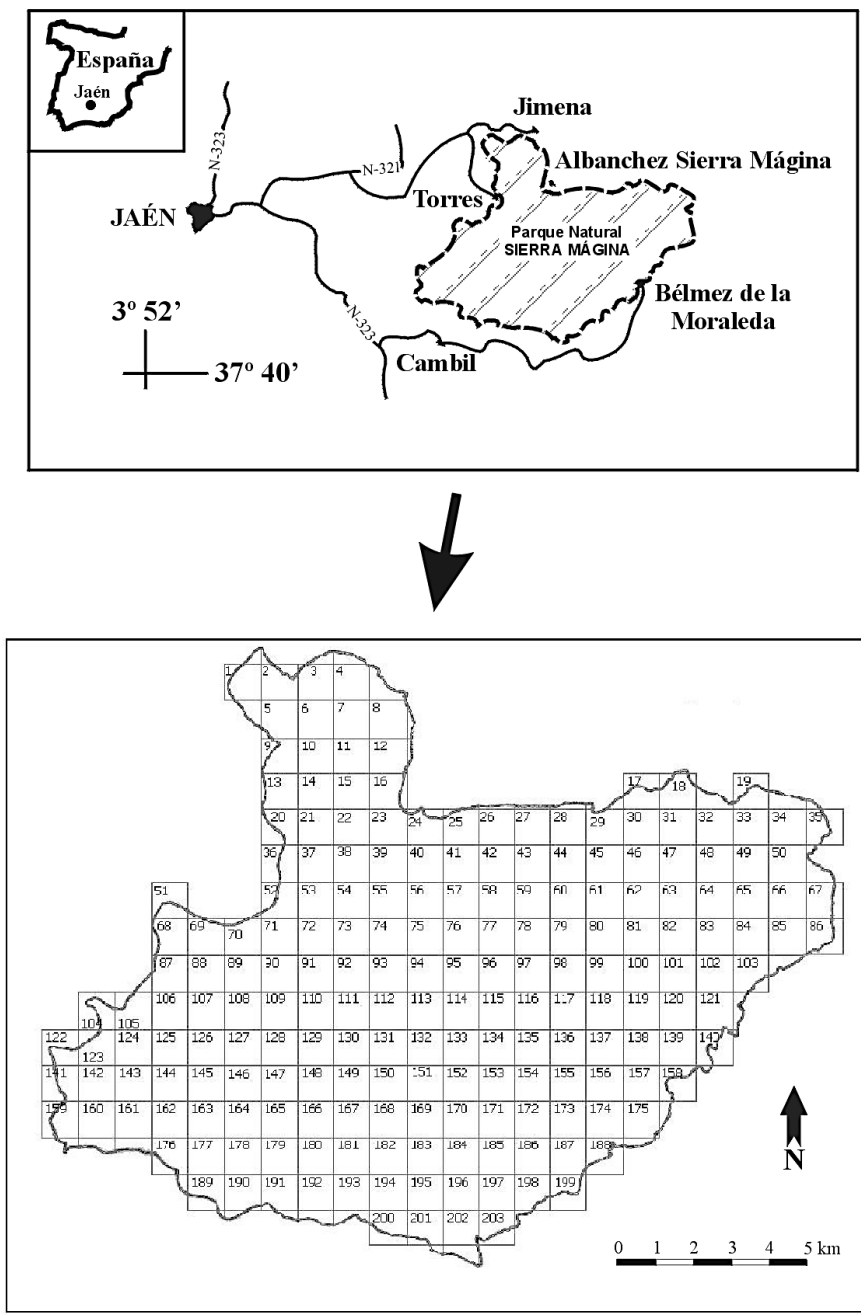


FIG. 1.- Localización de la zona de estudio y cuadrículas de muestreo.
 FIG. 1.- Location of the study area and sampling scheme.

en factores, que aportan una información mucho más útil, de otro modo dispersa por la covarianza natural que existe entre muchas propiedades de suelo (Sondheim *et al.*, 1981). De esta forma se pueden extraer las tendencias genéticas principales y las características más importantes del sistema edáfico analizado, tal y como afirman Cooley y Lohnes (1971), Arkley (1976), Webster (1977; 1985), Webster y Oliver (1990), Sánchez-Marañón *et al.* (1996), etc.

El objetivo del presente trabajo es cuantificar, mediante análisis factorial, las relaciones que se establecen entre las principales características de los horizontes orgánico-minerales de los suelos del Parque Natural de Sierra Mágina (Jaén, España), así como estudiar la incidencia de los factores ambientales en esas características.

CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO FÍSICO

El Parque Natural de Sierra Mágina está situado en el centro-Sur de la provincia de Jaén, a pocos kilómetros de la capital en dirección Sureste (Fig. 1).

La roca madre de los suelos la constituyen rocas sedimentarias carbonatadas (calizas, dolomías, margas y materiales coluviales de todas ellas) y en menor medida, rocas sedimentarias no carbonatadas (arcillas y arcillas con yesos) (Roldán *et al.*, 1991), todas ellas de edades jurásica y cretácica. Estructuralmente estos materiales pertenecen a la Zona Subbética, Unidades Intermedias y Zona Prebética de las Zonas Externas de las Cordilleras Béticas.

Existe un fuerte control litológico sobre el relieve (geomorfología) de la zona, apareciendo grandes escarpes sobre materiales compactos de caliza y dolomía, que contrastan con las suaves lomas de pendientes moderadas sobre rocas deleznable tipo marga y arcilla. En gran parte del Parque Natural, y sobre todo en las cumbres, aparece un modelado kárstico, con el desarrollo de lapiaz estructurales así como de numerosas dolinas.

El clima de la zona de estudio es típicamente mediterráneo, con un periodo húmedo y templado que alterna con otro seco y cálido. Las oscilaciones térmicas diarias y estacionales son mayores que las de su entorno (especialmente en las cumbres) por efecto de la altitud. La temperatura disminuye y la precipitación aumenta cuando ascendemos en la cota, apareciendo precipitaciones en forma de nieve en los meses más fríos.

La vegetación natural del parque está estratificada con la altura, apareciendo de mayor a menor altitud las siguientes Series: Serie mesomediterránea bética basófila seca de la encina, Serie supramediterránea bética basófila subhúmeda de la encina y Serie oromediterránea bética basófila de la sabina rastrera. En cualquier caso, el tapiz vegetal natural está bastante desdibujado por la acción antrópica, debido a la existencia en amplias zonas del parque, de pinos de repoblación, cultivos, evidencias de incendios, etc.

Las tipologías de suelos presentes en la zona de estudio son Leptosoles, Phaeozems, Kastanozems, Chernozems, Calcisoles, Fluvisoles, Vertisoles y Antrosoles (Martín-García *et al.*, 2000). Predominan los suelos con escaso espe-

sor (Leptosoles), lo que indica tanto el poco desarrollo edáfico como el carácter erosivo de los suelos de la zona estudiada. Phaeozems, Kastanozems y Chernozems, están representados en superficies más estables donde los procesos de formación de suelo son más intensos que los de degradación. En zonas de menor pendiente, coincidiendo con conos aluviales, glaciares, etc., los procesos de lavado y acumulación de carbonatos en profundidad llegan a formar horizontes cálcicos y petrocálcicos, originando tipologías de Calcisoles. Los Fluvisoles se localizan en las llanuras de inundación de ramblas y arroyos. Los Vertisoles son de origen topográfico y litológico, localizándose en vaguadas sobre materiales margosos. Por último, los Antrosoles se ubican en las proximidades de los centros urbanos, y en terrazas construidas por el hombre para uso agrícola.

MATERIAL Y MÉTODOS

El material de estudio lo constituyen 203 epipedones muestreados por Liébanas (1999), a una profundidad entre 0 y 25 cm como máximo (capa arable). Cada uno de ellos se localiza en el centro de las cuadrículas UTM de 1 km² de superficie proyectada en las que se divide el Parque Natural de Sierra Mágina (Hojas Topográficas 1:50.000 números 947 y 948 de Jaén y Torres, respectivamente) (Fig. 1).

Cada punto muestreado se ha caracterizado por su altitud, pendiente, precipitación anual y temperatura media anual. Para la obtención de estas dos últimas variables de cada epipedón muestreado, se han utilizado las ecuaciones de correlación cota-precipitación y cota-temperatura (Aranda, 1998).

Para la caracterización de las propiedades físicas y químicas de los epipedones, se realizaron los siguientes análisis: granulometría (porcentajes en arcilla, limo y arena de tierra fina, y porcentaje en fragmentos gruesos respecto al total de suelo), contenido de carbono orgánico y de nitrógeno total, pH (1:1 peso/peso, en agua), conductividad eléctrica del extracto de saturación, contenido de carbonato cálcico equivalente, y color en seco (hue, value y croma) de la superficie de los agregados. Todos estos análisis se efectuaron según los métodos oficiales del MAPA (1983), excepto el color que ha sido estimado con el código Munsell (Munsell Color Co., 1994).

El análisis estadístico se efectuó con el programa Statgraphics plus v.4.1 (STSC Inc., 1999). Se consideraron 18 variables con 203 datos por variable, totalizando 3654 datos. La estadística descriptiva caracteriza las variables determinadas mediante medidas de tendencia central, variabilidad y descriptiva de la distribución del conjunto de datos. Por su parte, la regresión lineal simple explica o predice el valor de una variable que depende de otra única variable, ajustándose el modelo por el método de mínimos cuadrados. El análisis de factores en modo R se efectuó partiendo de los valores y autovalores de la matriz de correlación. Las variables han sido tipificadas (estandarizadas), con el fin de normalizar las distintas medidas. La matriz de la solución final se obtuvo mediante rotación "Varimax", basándose en los algoritmos indicados por Joreskog *et al.* (1976).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO FÍSICO Y PROPIEDADES ANALÍTICAS DE LOS HORIZONTES ORGÁNICO-MINERALES

En la Tabla 1 se recogen los valores medios, así como una estadística descriptiva general, de los parámetros del medio físico y las características físicas y químicas de los epipedones muestreados. Los valores de algunas de las variables muestran una elevada desviación estándar, es decir una gran dispersión de los datos, que es consecuencia de la diversidad intrínseca de los epipedones.

El rango altitudinal es muy amplio (entre 660 y 2100 m), como corresponde a una zona montañosa y, en consecuencia, se observa un pronunciado rango de precipitación y temperatura (757 mm y 10°C, respectivamente). Estas grandes variaciones altitudinales también se reflejan en la elevada pendiente media (44%), dominando las pendientes de las clases 4, 5 y 6 de la FAO (1977).

La mayoría de los epipedones presentan colores pardos, con un amplio rango de value y croma debido a la gran variabilidad en los contenidos de los elementos cromógenos de los suelos (materia orgánica y carbonato cálcico, fundamentalmente).

Variable	Media	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo	Coefficiente de variación (%)	Asimetría	Curtosis estandarizada
Altitud (m)	1289	317	660	2100	24.64	0.431	-1.921
P. A. (mm)	1070	167	739	1496	15.60	0.43	-1.92
T. M. A. (°C)	11	2	6	16	19.59	-0.43	-1.92
Pendiente (%)	44	19	0	100	44.47	-0.080	-0.864
Color Hue*	19.75	1.38	12.5	22.5	7.01	-2.16	30.06
Color Value*	4.82	1.26	2.5	8.0	26.09	0.34	-1.51
Color Croma*	3.80	1.34	2.0	8.0	35.4	0.69	-0.37
pH (H ₂ O)	7.9	0.3	6.4	8.5	4.34	-1.064	6.706
pH (KCl)	7.2	0.4	4.1	7.8	4.81	-4.052	88.722
C.E. (dS m ⁻¹)	0.41	0.28	0.15	2.06	68.65	2.659	26.035
CaCO ₃ eq. (%)	24.72	21.32	0.0	85.77	86.22	0.555	-2.056
C.O. (%)	5.05	3.40	0.67	20.62	67.33	1.512	8.479
N (%)	0.45	0.29	0.08	1.58	63.47	1.452	7.061
C/N	11.86	6.12	2.05	70.74	51.59	4.993	123.457
Arcilla (%)	33	14	5	64	44.09	-0.014	-2.345
Arena (%)	19	12	1	59	64.56	0.845	0.889
Limo (%)	48	11	25	79	23.67	0.687	-0.110
F.G. (%)	42	18	2	84	42.69	-0.10	-2.434

* Color (Código Munsell) medido sobre muestra seca.

Abreviaturas: P.A.= precipitación total anual; T.M.A.= temperatura media anual; C.E.= conductividad eléctrica del extracto de saturación; CaCO₃ eq.= carbonato cálcico equivalente; C.O.= carbono orgánico; N = nitrógeno; F.G.= fragmentos gruesos.

TABLA 1. Valores medios y estadística descriptiva de los caracteres del medio físico y de las propiedades analíticas de los horizontes orgánico-minerales (n = 203).

TABLE 1. Summary statistics of selected variables.

Los valores de pH (H_2O), para el conjunto de los epipedones de Sierra Mágina, están entre medianamente alcalinos a ligeramente alcalinos, lo que está en relación con la naturaleza del material parental (rocas carbonatadas), con el complejo de cambio dominado por el Ca^{2+} y con grados de saturación en bases muy superiores al 50% (Martín-García *et al.*, 2000).

La conductividad eléctrica del extracto de saturación presenta un bajo valor medio (0.41 dS m^{-1}), por lo que podemos inferir que las muestras estudiadas no presentan problemas de salinidad. Existen algunos epipedones con una conductividad próxima a 2.00 dS m^{-1} desarrollados sobre arcillas con yesos de edad triásica.

El contenido de carbonato cálcico equivalente es muy variable (desde 0% hasta valores próximos al 86%). Estas situaciones extremas se deben tanto a factores litológicos (heredados de la roca madre), al presentarse en la zona litologías carbonatadas y no carbonatadas, como a procesos de lavado de carbonatos que se hacen más eficaces en los epipedones de mayor altitud al recibir mayor precipitación. No obstante, en términos medios, las muestras estudiadas poseen un carácter fuertemente calcáreo.

El porcentaje de carbono orgánico es medio (5% de media), favorable en general para la retención de agua, estructuración del suelo y aireación. En muchos casos su acumulación e incorporación en profundidad es más que suficiente para originar horizontes de diagnóstico superficiales del tipo móllico (Soil Survey Staff, SSS, 1994).

El valor medio de nitrógeno total es alto (0.45%). No obstante, la relación carbono/nitrógeno (C/N) media, cercana a 12, podemos considerarla como normal en suelos de montaña, desarrollados sobre materiales carbonatados y vegetación mediterránea de carácter basófilo. Esta relación nos indica que la velocidad de mineralización de la materia orgánica es adecuada para garantizar a las plantas un aporte de nutrientes fácilmente asimilables.

Los contenidos medios de arcilla, arena y limo corresponden a una textura franco arcillo-limosa, siendo las francas, franco-arcillosas, franco-limosas y arcillo-limosas las texturas más abundantes de los epipedones de la Sierra. Se trata pues de texturas equilibradas, que aportan buenas propiedades físicas y fisicoquímicas a los suelos.

Finalmente, el contenido en fragmentos gruesos es medio (algo más del 40% de media), presentando valores que se les puede considerar influyen negativamente en la capacidad del suelo para almacenar agua y nutrientes.

ANÁLISIS FACTORIAL

El análisis de factores se ha aplicado a todas las variables estudiadas, excepto a dos de ellas (precipitación anual y temperatura media anual) por ser variables linealmente dependientes de la altitud y que llegan a oscurecer la interpretación causal de los factores; se ha prescindido igualmente del pH (KCl).

Se han considerando un total de 5 factores (que sustituyen al total de variables observadas), por presentar un "eigenvalue" superior a 1, y que por sí solos

explican el 72.4% de la varianza total acumulada en la población. En la Tabla 2 se muestra la matriz de cargas de los factores, así como la varianza explicada y la varianza explicada acumulada por cada factor.

El factor 1, explica más del 28% de la varianza total del sistema y recoge, con carga positiva, las variables carbono orgánico, nitrógeno total (ambas muy relacionados entre sí), conductividad eléctrica del extracto de saturación; y con carga negativa: pH, carbonato cálcico equivalente y color value. La acumulación y la transformación de la materia orgánica es, probablemente, el proceso edafogenético más característico de los epipedones. Así, el contenido de carbono orgánico es la variable con mayor peso en este factor, que podríamos denominar “factor orgánico-químico”. La carga negativa que encontramos en las variables carbonato cálcico equivalente, pH y color value se debe a que pH y value disminuyen su valor según se enriquece el suelo en materia orgánica. Cuanto mayor es el contenido de carbonatos, el pH y el value también son mayores (por eso los tres tienen carga factorial del mismo signo). Por otra parte, el contenido en carbonatos disminuye hacia las zonas altas de la sierra provocado, con toda probabilidad, por una mayor humedad (precipitación) y donde, además, hay mayor aporte de materia orgánica al suelo.

El factor 2, que podemos denominar “factor granulométrico” o textural, explica el 19.2% de la varianza, e incluye a las variables arcilla con carga nega-

Variable	factor 1	factor 2	factor 3	factor 4	factor 5
Altitud (m)	0.41799	0.08621	0.24172	0.47649	-0.32362
Pendiente (%)	0.06115	0.06420	0.03878	0.77486	0.06711
Color Hue	0.08877	-0.09422	0.75847	0.04957	-0.03912
Color Value	-0.70581	-0.00567	0.08793	-0.49377	-0.08565
Color Cromo	-0.02866	-0.34619	-0.63639	-0.07189	0.21045
pH (H ₂ O)	-0.80503	0.34007	-0.14147	0.04819	0.03714
C.E. (dS m ⁻¹)	0.71073	0.10408	0.03577	-0.38831	0.16600
C.O. (%)	0.84714	0.21329	-0.05611	0.21675	0.14749
CaCO ₃ eq.	-0.54673	0.47831	0.45424	-0.27609	0.08975
N (%)	0.84248	0.20072	0.04134	0.24146	-0.15398
C/N	0.11502	-0.04302	-0.11114	0.02749	0.86153
Arcilla (%)	-0.01770	-0.84918	-0.36644	0.07136	-0.12055
Arena (%)	-0.42913	0.41569	0.52639	-0.02813	0.39459
Limo (%)	0.49032	0.62351	-0.1035	-0.06202	-0.27475
F.G (%)	0.04618	0.68621	-0.04375	0.36501	-0.07295
Varianza explicada	28.778	19.211	8.979	8.079	7.321
Var. exp. acumulada	28.778	47.990	56.969	65.048	72.369

TABLA 2. Matriz reordenada de factores rotados (Varimax).

TABLE 2. Factor loading matrix after Varimax rotation.

tiva y limo y fragmentos gruesos con carga positiva. Los contenidos de arcilla se relacionan directamente con la evolución del material de suelo. Se corrobora esta afirmación con otras variables, como el carbonato cálcico equivalente (0.47831) y la arena (0.41509) que, si bien tienen mayor peso en otros factores, también explican parte de la variabilidad de este factor. Así, el carbonato cálcico equivalente es el componente esencial de la roca madre de la cual parten los suelos (fundamentalmente calizas, dolomías y margas), y la arena total es otra fracción gruesa que, al igual que los fragmentos gruesos, es heredada de la roca madre. La carga negativa de la arcilla total se explica por la propia evolución de esta fracción, ya que procede de la alteración de la roca madre, de los fragmentos gruesos, de la arena y del limo; y a que el proceso de arcillización se incrementa cuando se eliminan los carbonatos de la tierra fina (se acentúa la hidrólisis de los minerales primarios, se favorece la formación de caolinita, etc.).

El factor 3, o “factor cromático”, recoge las variables color hue y arena total, con carga positiva, y color croma con carga negativa. Todas ellas explican casi el 9% de la variabilidad. El aumento de color hue supone que el material es menos rojo, lo que se relaciona con mayor contenido de arena, o lo que es igual, con un menor desarrollo de la textura (con el mismo sentido que el factor 2). Cuanto menos rojos son los epipedones, menor es la cantidad de pigmento (menos croma). Los factores 2 y 3 pueden interpretarse conjuntamente como un factor de evolución fersialítica: los incrementos de arcilla por alteración del material de partida suponen enrojecimiento paralelo del suelo por un proceso de rubefacción. Este mismo resultado ha sido obtenido por Sánchez-Marañón *et al.* (1996) en los suelos de Sierra Nevada sobre materiales silíceos. Se confirma, de este modo, la posibilidad de una evolución convergente de los horizontes orgánico-minerales en los que la orientación general de la edafogénesis es semejante, aunque la parte inferior del perfil, por el contrario, refleja las propiedades del material geológico de partida. Ideas desarrolladas en su día en la definición de “suelos análogos” establecida por Duchaufour (1978).

El factor 4, o “factor relieve”, incluye a las variables pendiente (representación primordial del relieve) y altitud, ambas con carga positiva, explicando un 8% de la variabilidad del sistema. Esto se debe a la propia naturaleza de las rocas calizas, que originan relieves muy escarpados en las partes cacuminales de las sierras béticas, apareciendo laderas de menor pendiente en los pies de los escarpes. También cabe mencionar la constatable incidencia en este factor de la variable fragmentos gruesos (0.36501), lo que se explica porque en las grandes pendientes de los relieves calizos, el material original está constituido por una acumulación de cantos heterométricos compactos (derrubios de ladera) que constituyen los fragmentos gruesos de estos epipedones, además del proceso de erosión selectiva, con pérdida de componentes de la tierra fina por arrastre superficial.

El factor 5, fundamentalmente pone de manifiesto, y de forma única, la relación C/N. Tiene escasa incidencia en la variabilidad de los epipedones (7.3%) y esta relación constituye por sí sola un buen índice de la fertilidad natural del suelo.

Por tanto, el estudio de componentes principales (análisis factorial), efectuado con rotación Varimax, muestra 4 factores realmente significativos, pudiéndose afirmar además que el medio edáfico de Sierra Mágina tiene, en total, 5 factores que lo definen plenamente (tanto a sus características como a propiedades de suelo); coincidentes los cuatro primeros con procesos formadores edafogénicos fundamentales. Asimismo, tres de los factores son asimilables con Factores Formadores de suelo tal y como fueron definidos originalmente por Jenny (1980), como son: Factor Biológico (factor orgánico-químico), Factor Material Parental (factor granulométrico) y Factor Topográfico (factor relieve).

ANÁLISIS DE CORRELACIÓN Y REGRESIÓN LINEAL SIMPLE

Si el análisis de factores nos evidencia las pautas globales de relaciones entre grupos de variables, el análisis de correlación nos permite conocer de forma

Correlación	Altitud	Pendiente	Color Hue	Color Value	Color Cromá
Altitud	1.0000				
Pendiente	0.2116*	1.0000			
Color Hue	0.1162	0.0584	1.0000		
Color Value	-0.4272**	-0.3067**	-0.0224	1.0000	
Color Cromá	-0.2638**	-0.0954	-0.2589**	-0.0801	1.0000
pH (H ₂ O)	-0.3126**	-0.0700	-0.0962	0.5205**	-0.0169
C.E.	0.0311	-0.0619	0.0580	-0.2601**	0.0188
CaCO ₃ eq.	-0.1999*	-0.1357	0.1280	0.5438**	-0.4245**
C.O.	0.3942**	0.1778	-0.0122	-0.6934**	-0.1209
N	0.5055**	0.2035*	0.0478	-0.7007**	-0.1695
C/N	-0.1044	0.0149	-0.0776	-0.0877	0.1226
Arcilla	-0.1151	-0.0438	-0.2054*	0.0027	0.3828**
Arena	-0.1319	-0.0403	0.1930*	0.2454**	-0.2644**
Limo	0.2873**	0.1026	0.0495	-0.2686**	-0.1977*
F.G.	0.1909*	0.2253*	0.0712	-0.1984*	-0.2074*

Correlación	pH	C.E.	CaCO ₃ eq.	C.O.	N	C/N	Arcilla
pH (H ₂ O)	1.0000						
C.E.	-0.5330**	1.0000					
CaCO ₃ eq.	0.5038**	-0.1803	1.0000				
C.O.	-0.5233**	0.4858**	-0.4039**	1.0000			
N	-0.5568**	0.4950**	-0.3974**	0.8322**	1.0000		
C/N	-0.0155	0.1043	-0.0651	0.2250*	-0.1050	1.0000	
Arcilla	-0.1683	-0.0875	-0.5421**	-0.1296	-0.1333	0.0024	1.0000
Arena	0.3663**	-0.1519	0.6794**	-0.2597**	-0.2543**	0.0511	-0.6500**
Limo	-0.1849*	0.2814**	-0.0517	0.4470**	0.4436**	-0.0565	-0.5586**
F.G.	0.2145*	0.0853	0.1117	0.2313**	0.2655**	-0.1150	-0.4116**

Correlación	Arena	Limo	F.G.
Arena	1.0000		
Limo	-0.2663**	1.0000	
F.G.	0.2070*	0.2935**	1.0000

Significación Estadística
* P<0,01
**P<0,001

TABLA 3. Matriz de coeficientes de correlación de las variables consideradas en el estudio.

TABLE 3. Correlations matrix between each pair of variables.

individual las relaciones entre las variables de mayor interés, aplicando un análisis lineal univariante de regresión, y cuyos resultados han puesto de manifiesto un ajuste estadísticamente significativo (Tabla 3); sólo se comentarán aquellas relaciones con especial significación estadística y edafogenética.

Al ascender en altitud hay un mayor contenido en carbono orgánico ($r = 0.3942^{**}$) y en nitrógeno ($r = 0.5055^{**}$), debido probablemente a un aumento de la precipitación con la altitud (la precipitación aumenta la producción de materia vegetal y por tanto de carbono orgánico) y a una mayor circulación interna del agua a través de los perfiles. A su vez, una mayor altitud coincide con un aumento claro de las pendientes donde están situadas las muestras ($r = 0.2116^*$). Por tanto parece existir una mejor conservación del medio natural (menor presión humana) en general, y del suelo en particular, al aumentar la cota.

Hay una correlación negativa de la altitud con el pH ($r = -0.3126^{**}$) que evidencia en este caso el efecto de los factores externos, al inducir unas condiciones climáticas concretas (temperatura y humedad del suelo) que modifican y reducen el pH, sin olvidar el efecto acidificante que tiene la materia orgánica ($r = -0.5233^{**}$). De igual modo se aprecia una evidente decarbonatación (disminución del CaCO_3 equivalente) con la altitud ($r = -0.1999^*$).

Las variables value y croma se correlacionan negativamente con el contenido en carbono orgánico, especialmente el value ($r = -0.6934^{**}$), es decir, suelos más oscuros, más ricos en materia orgánica y con mayor capacidad de retener agua, y por tanto con un estado más óptimo de conservación.

Por otra parte, la arcilla está relacionada inversamente con el color hue ($r = -0.2054^*$) y relacionada positivamente con el color croma ($r = 0.3828^{**}$) lo que confirma una vez más el hecho de que los suelos arcillosos tienen frecuentes colores rojos y vivos, especialmente aquellos que proceden de la descalcificación de las rocas calizas. Existe igualmente un efecto del contenido en CaCO_3 equivalente sobre el color, de modo que los suelos se hacen más claros a medida que son más calcáreos; de esta forma encontramos importantes correlaciones entre CaCO_3 equivalente y color value ($r = 0.5438^{**}$) y entre CaCO_3 equivalente y color croma ($r = -0.4245^{**}$).

La relación carbono orgánico-nitrógeno ($r = 0.8322^{**}$) es bien conocida, ya que estos componentes están fuertemente implicados en los procesos biológicos. Por su parte, existe una correlación negativa y fuerte entre el carbono orgánico y el contenido en CaCO_3 equivalente ($r = -0.4039^{**}$) lo que nos lleva a pensar en una mineralización intensa de los coloides orgánicos por una intensificación de la actividad biológica debida, a su vez, a un aumento directo del pH [CaCO_3 equivalente-pH ($r = 0.5038^{**}$)].

Las relaciones entre las fracciones granulométricas arena, limo y arcilla son, en principio, banales al existir entre ellas una relación todo-parte (al aumentar una fracción deben disminuir las demás), aunque también es cierto que se superpone este efecto a las relaciones funcionales que se establecen entre las variables, con importantes implicaciones edafogenéticas. En este sentido cabe resaltar la fuerte correlación negativa entre arcilla-arena ($r = -0.6500^{**}$), arci-

lla-limo ($r = -0.5586^{**}$), arena-limo ($r = -0.2663^{**}$) y arcilla-fragmentos gruesos ($r = -0.4116^{**}$), lo que nos hace ver que los materiales finos (limo y arcilla) pueden considerarse provenientes de la fracción arena, y ésta a partir de los fragmentos gruesos ($r = 0.2070^*$), a través todo ello de una meteorización física y química.

Por su parte, resultan lógicas las relaciones entre CaCO_3 equivalente y la arcilla ($r = -0.5421^{**}$) y el CaCO_3 equivalente y la arena ($r = 0.6794^{**}$), al concentrarse claramente los carbonatos en fracciones granulométricas más gruesas y relacionadas con una menor evolución edáfica.

Un aumento en el contenido de arena tiende a disminuir el contenido en carbono orgánico ($r = -0.2597^{**}$), tal vez por aumentar esta fracción la temperatura y la aireación del suelo, produciendo una mineralización de la materia orgánica más rápida; teniendo a su vez un sentido contrario la relación carbono orgánico-limo ($r = 0.4470^{**}$), donde el limo impediría una excesiva aireación del suelo.

CONCLUSIONES

Se trata de suelos, y más concretamente de horizontes orgánico-minerales, desarrollados sobre sustrato calizo, con pHs que van de neutros a básicos. El fuerte control litológico sobre el relieve de la zona hace que dominen las tipologías de suelo con escaso desarrollo edáfico tipo "Leptosol", lo que nos da idea del carácter eminentemente erosivo de los suelos.

El estudio de componentes principales muestra 4 factores realmente significativos para caracterizar el sistema suelo; pudiéndose afirmar que el medio edáfico de Sierra Mágina tiene 5 factores que lo definen plenamente (tanto a sus características como a propiedades de suelo), coincidentes tres de ellos con procesos formadores edafogénicos fundamentales.

El factor 1 o "factor orgánico-químico", está relacionado con el Factor Formador de suelo denominado "Biológico", y fundamentalmente tiene en cuenta el contenido en materia orgánica y, por tanto, evalúa la importancia de ésta en la edafogénesis. El factor 2, denominado "factor granulométrico" muy relacionado con la evolución del suelo y con el grado de dependencia de éste con el material de partida, es decir, con el Factor Formador de suelo "Material Parental". El factor 3 o "factor cromático" donde el aumento del hue supone que el material es menos rojo (mayor contenido de arena), relacionado con un menor desarrollo textural, es decir, cuanto menos rojos son los epipedones, menor es la cantidad de pigmento (menos cromas). Los factores 2 y 3 pueden interpretarse conjuntamente como un factor de evolución fersialítica. El factor 4, o "factor relieve", que en términos de Factor Formador equivale al "Factor Topográfico". La propia naturaleza de las rocas calizas, que originan relieves muy escarpados en las partes cacuminales de Sierra Mágina, apareciendo laderas de menor pendiente en los pies de los escarpes con todas las implicaciones que éste hecho tiene en la naturaleza y distribución de los suelos.

De un modo resumido podríamos concluir con que dos variables intrínsecas al suelo, carbono orgánico y contenido de arcilla y una extrínseca, la pendiente, son las que mejor explican la variabilidad de los horizontes orgánico-minerales (epipedones) de los suelos del Parque Natural de Sierra Mágina. Por tanto, La melanización (oscurecimiento del material de suelo por acumulación de carbono orgánico), la decarbonatación, y la arcillización-rubefacción, son procesos detectados en estos epipedones y cuantificados mediante análisis factorial y análisis de correlación.

REFERENCIAS

- ALVARO, M., HERNÁNDEZ, A., DEL OLMO, P., RUIZ P. (1991): Hoja geológica núm. 948 (Torres). *Mapa Geológico de España E. 1:50.000*. 1ª edición, I.G.M.E., Madrid.
- ARANDA, V. (1998): *Caracterización y análisis de la fracción orgánica de los horizontes superficiales en suelos de ecosistemas mediterráneos*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada. Inédito.
- ARKLEY, R.J. (1976): Statistical methods in soil classification research. *Advances in Agronomy*, 28: 37-70.
- COOLEY, W.W., LOHNES, P.R. (1971): *Multivariate data analysis*. 364 p., John Wiley & Sons, New York.
- DUCHAUFOUR, PH. (1977): *Atlas ecológico de los suelos del mundo*. 178 p., Toray-Masson, Barcelona.
- DUCHAUFOUR, PH (1978): *Manual de Edafología*. 476p., Toray-Masson, Barcelona.
- FAO (1977): *Guía para la descripción de perfiles de suelo*. 2ª Ed. 70 p., FAO, Roma.
- FAO-UNESCO (1988): *Soil Map of the World*. Revised Legend, 60. 119 p., FAO, Roma.
- JENNY, H. (1980): *The soil resource*. 377 p., Springer-Verlag, New York.
- JORESKOG, K.G., KLOVAN, J.E., REYMENT, R.A. (1976): *Geological factor analysis. Methods in Geomathematics*, I. 178 p., Elsevier, New York.
- LIÉBANAS, M.G. (1999): *Nematodos Doriláimidos del Parque Natural de Sierra Mágina: Taxonomía y análisis de su distribución*. Tesis Doctoral, Universidad de Jaén. Inédito.
- MAPA (1983): *Métodos oficiales de análisis de Suelos y Aguas*. 345 p., Servicio de Publicaciones del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.
- MARTÍN-GARCÍA, J.M., JIMÉNEZ ESPINOSA, R., DELGADO, G., DELGADO, R., ARANDA, V., CALERO, J., SÁNCHEZ-MARAÑÓN, M., LIÉBANAS, G.M., ARIZA, F.J., ALCALÁ, A.R., PINILLA, C., ENRÍQUEZ, C. (2000): *Mapa Geomorfoedáfico del Parque Natural de Sierra Mágina* (Jaén-España). Memoria+Mapa. Informe Científico-Técnico de la Consejería de Medio Ambiente. 133 p., Junta de Andalucía, Sevilla. Inédito.
- MUNSELL COLOR COMPANY (1994): *Munsell Soil Color Charts*. Kollmorgan Instruments Corporation, New York.
- ROLDÁN, F.J., LUPIANI, E., JEREZ, L., GARCÍA, A. (1991): Hoja geológica núm. 947 (Jaén). *Mapa Geológico de España E. 1:50.000*. 1ª edición, I.G.M.E., Madrid.
- SÁNCHEZ-MARAÑÓN, M., DELGADO, G., PÁRRAGA, J.F., DELGADO, R. (1996): Multivariate analysis in the quantitative evaluation of soils for reforestation in the Sierra Nevada (Southern Spain). *Geoderma*, 69: 233-248.

- SOIL SURVEY STAFF (SSS) (1994): *Keys to Soil Taxonomy*. Sixth Ed. 306p., USDA Handbook, Washington D.C.
- SONDHEIM, M.W., SINGLETON, G.A., LAVKULICH, L.M. (1981): Numerical analysis of a chronosequence, including the development of a chronofunction. *Soil Science Society of America Journal*, 45: 558-563.
- STSC INC. (Statistical Graphics Corporation) (1999): *Statgraphics plus v.4.1. Statistical graphics system*. STSC, Rockville, MD, USA.
- WEBSTER, R. (1977): *Quantitative and numerical methods in soil classification and survey*. 269 p., Clarendon Press, Oxford.
- WEBSTER, R. (1985): Quantitative spatial analysis of soil in the field. In: B.A. Stewart (ed.), *Advances in Soil Science*, 3: 1-70. 217p., Springer-Verlag, New York.
- WEBSTER, R., OLIVER, M.A. (1990): *Statistical methods in soil and land resource survey*. 316 p., Oxford University Press, Oxford.

Recibido / Received : 8/11/01

Aceptado / Accepted: 13/02/02