

APLICACIÓN DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA AL ANÁLISIS DEL MEDIO FÍSICO EN EL PARQUE NATURAL LOS ALCORNOCALES. APROXIMACIÓN A UNA CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA A PARTIR DE UN MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES

Lorena Martínez-Zavala / Antonio Jordán López / Patricia Illana Sanmiguel

RESUMEN

En el presente trabajo se ha realizado un análisis morfológico del medio físico del Parque Natural Los Alcornocales. Para ello se ha utilizado como fuente de información básica un modelo digital de elevaciones, a partir del cual se han estudiado distintas características topográficas, como la pendiente, el relieve local y la curvatura del terreno. El análisis integrado de estos parámetros mediante SIG ha permitido la clasificación morfológica automática del terreno.

Palabras clave: Sistema de información geográfica; Modelo digital de elevaciones; Cartografía geomorfológico; Parque Natural Los Alcornocales.

ABSTRACT

A morphological analysis of the physical way of the Natural Park Los Alcornocales has been carried out in this paper. With this goal, a digital elevation model has been used as the main source of basic information, so that different topographic characteristics have been studied, as the slope, the local relief and the curvature of the surface. The integrated analysis of these parameters by GIS has allowed the morphologic automatic classification of the area.

Keywords: Geographical information system; Digital elevation model; Geomorphological mapping; Los Alcornocales Natural Park.



Figura 1. Área de estudio.

INTRODUCCIÓN

Hasta hace relativamente poco tiempo, los estudios geomorfológicos estaban basados en el análisis de características del relieve a partir de mapas topográficos o en la medida directa de determinados parámetros en el campo. En la actualidad, el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite el estudio detallado de un gran número de variables del medio físico.

El conocimiento profundo de las características topográficas del medio constituye un punto de partida para el estudio de los suelos debido a su influencia sobre la sedimentación y arrastre de partículas, nutrientes, el movimiento del agua superficial y muchos otros aspectos importantes (Jenny, 1941; Gerrard, 1981). Sin embargo, la topografía del terreno no influye sólo sobre los procesos edáficos, sino que la variedad de formas puede reflejar cambios menos perceptibles en el sustrato, la insolación, la disponibilidad de agua o la vegetación (Schaub & Jerold, 1999; Lark, 1999; Ruiz *et al.*, 1999; Martínez-Zavala, 2001; Bellinfante *et al.*, 2002).

Un modelo digital del terreno constituye una herramienta básica en el estudio de los factores del medio físico y de su interrelación. A partir de una estructura básica, como un modelo digital de elevaciones (MDE), es posible construir otros modelos deriva-

dos mediante cálculos matemáticos más o menos simples (Doyle, 1978). La determinación automática de las formas del terreno elaborada a partir de la modelización de las características del terreno permite un conocimiento profundo del medio físico y constituye una herramienta rápida y eficaz en la gestión y planificación de los espacios naturales protegidos.

El Parque Natural Los Alcornocales (figura 1) se encuentra localizado en la provincia de Cádiz, aproximadamente entre las coordenadas 36°50'-36°00' N y 5°50'-5°20' W. El parque incluye las sierras del Aljibe y de Algeciras, constituidas por el afloramiento de estratos de arenisca silícea alternados con otros sustratos de naturaleza caliza o margosa.

El clima es de tipo mediterráneo, con una temperatura media que oscila entre 15 y 18°C. La precipitación anual es variable, ya que existe un gradiente de precipitación muy acusado que crece desde la costa hasta las sierras, y oscila entre 660 y 1.400 mm (Jordán y Bellinfante, 2000).

En el área de estudio, Jordán (2000) estableció cinco sistemas de paisaje principales:

1. Las sierras del Campo de Gibraltar y del Aljibe, que constituyen un conjunto de morfogénesis estructural denudativa, formado por afloramientos de areniscas silíceas (Oligoceno-Mioceno) fuertemente plegados. Aunque no se trata de sierras muy elevadas (la máxima elevación es la de El Aljibe, con 1.092 metros sobre el nivel del mar), la erosión diferencial de los estratos consolidados y no consolidados ha generado un relieve extraordinariamente irregular (con pendientes superiores al 70%). La presencia de capas de margas y arcillas intercaladas entre la arenisca favorece los procesos de deslizamiento, especialmente tras períodos de intensas lluvias.

2. Los valles e intercalaciones que cruzan las sierras del Aljibe y Algeciras están constituidos por materiales carbonatados como calcarenitas y margas. Los afloramientos de mayor extensión se localizan en las proximidades de Jimena de la Frontera, al norte de la sierra del Niño y en una banda alargada cruzada por el curso bajo del arroyo de la Miel (Algeciras). También son frecuentes los conjuntos alomados formados por arcillas de Facinas, principalmente en el sector oeste del área de estudio (en Tarifa o en los valles del Almodóvar y el Tiradero). En general se trata de terrenos de laderas suavemente inclinadas y de poca elevación.
3. Complejo de colinas margo-areniscosas de Jimena de la Frontera. Este sistema coincide básicamente con los valles del Guadiaro y el Genal. Se trata de un sistema de morfogénesis estructural denudativa que presenta un relieve variado y pendientes que oscilan entre el 0 y el 46%. El sustrato litológico está constituido por afloramientos alternantes, y a veces poco diferenciados, de areniscas micáceas y margas.
4. Sistema de arcillas y margas de Tarifa y Tahivilla. Otros afloramientos del *Flysch* margoso-areniscoso micáceo de Algeciras se observan también en puntos de Tarifa y Tahivilla, con una topografía y fisiografía similar, aunque predomina el sustrato arcilloso. Las lomas y colinas son de escasa elevación, pero la pendiente puede ser elevada.
5. Dentro del Parque Natural Los Alcornocales existen diversos afloramientos de calcarenitas y biocalcareniticas. Principalmente, estos afloramientos se sitúan sobre algunos puntos al sur de la porción occidental de sierra Bermeja, en Jimena de la Frontera. Se trata de materiales que datan del Eoceno y Paleoceno (Terciario), y Cretácico superior. La pendiente media de las distintas unidades es muy diversa, de hasta el 50%. Como consecuencia, el paisaje es variado, con zonas de fisiografía suave, lomas, colinas y cerros.

OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es la realización de un modelo digital del terreno que describa las características geomorfológicas del Parque Natural Los Alcornocales. Este objetivo implica los siguientes pasos:

- Realización de un modelo digital de elevaciones.
- Realización de modelos derivados (pendiente, curvatura y relieve local).
- Realización de un modelo digital morfológico del terreno.
- Descripción de las principales geoformas del área de estudio.

METODOLOGÍA GENERAL

El método utilizado en la diferenciación de las formas del terreno está basado en los procedimientos de clasificación automática utilizados por Hammond (1964), Dikau *et al.* (1991) e Iriagaray *et al.* (1997), con algunas modificaciones sugeridas por Martínez-Zavala *et al.* (2005).

Como fuente básica de información se ha utilizado un modelo digital de elevaciones con una resolución de 100 x 100 m, a partir del cual se ha obtenido información acerca de otras características del terreno, como la pendiente, la curvatura de la superficie o el relieve.

Modelo digital de elevaciones

Un modelo digital de elevaciones (MDE) se define como una estructura numérica que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. De esta forma, un MDE puede describirse mediante la siguiente ecuación (Felicísimo, 1994):

$$z = \zeta(x, y)$$

donde:

- z es la elevación del punto situado en las coordenadas x e y .
- ζ es la función que relaciona la variable z con su localización geográfica.

El MDE fue construido utilizando un método de interpolación de elementos finitos. Para ello se digitalizaron las curvas de nivel a partir de mapas topográficos (E 1:50.000), así como algunos puntos de elevación conocida (puntos geodésicos, picos, accidentes geográficos, etc.). Una vez realizada la interpolación se comprobó la exactitud del modelo mediante la comparación de la red hidrográfica real con la generada a partir del MDE.

La unidad mínima de información corresponde a una celda de 100 x 100 m de superficie. Esta precisión se considera suficiente para conseguir los objetivos formulados inicialmente.

Gráficamente, el MDE puede representarse codificando las altitudes en tonos de gris, de forma que los tonos más claros corresponden a las zonas más elevadas y las zonas más oscuras a los puntos de menor altitud.

Modelo digital de pendientes

La pendiente puede calcularse a partir del MDE, como la máxima tasa de cambio de cada celda respecto a sus vecinas. Para realizar el cálculo de la pendiente es necesario definir en primer lugar el gradiente topográfico. En un MDE se puede describir la elevación en el entorno de un punto problema como un plano de ajuste, cuya expresión matemática sería la siguiente:

$$z = a_{00} + a_{10} \cdot x + a_{01} \cdot y$$

donde los coeficientes a_{10} y a_{01} corresponden a las derivadas de la elevación con respecto a los ejes X e Y, respectivamente:

$$a_{10} = \frac{\partial z}{\partial x} ; a_{01} = \frac{\partial z}{\partial y}$$

Estos coeficientes pueden representarse mediante los vectores $V^{\#}$ y $W^{\#}$ definidos por las componentes para los ejes X, Y y Z. El producto vectorial entre estos dos vectores es otro vector, $P^{\#}$, perpendicular a ambos y al plano que los contiene, es decir, a la superficie del terreno.

$$P^{\#} = V^{\#} \times W^{\#} = \begin{bmatrix} \partial x \\ 0 \\ \partial z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \partial y \\ \partial z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\partial z \cdot \partial y \\ -\partial x \cdot \partial z \\ -\partial x \cdot \partial y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\partial z / \partial x \\ -\partial x / \partial y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_{10} \\ -a_{01} \\ 1 \end{bmatrix}$$

La pendiente en un punto del terreno se define como el ángulo existente entre el vector gradiente en ese punto, $P^{\#}$ y el eje Z (vertical). El eje Z puede expresarse también como un vector, $H^{\#}$. El ángulo (α) entre estos dos vectores puede calcularse de la siguiente manera:

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{P^{\#} \cdot H^{\#}}{\text{mod}(P^{\#}) \cdot \text{mod}(H^{\#})} \right) = \frac{1}{\sqrt{a_{10}^2 + a_{01}^2 + 1}} = \tan^{-1} \sqrt{a_{10}^2 + a_{01}^2}$$

donde $\text{mod}(P^\#)$ es el módulo del vector $P^\#$ y $\text{mod}(H^\#)$ el del vector $H^\#$

La pendiente de cada celda ha sido calculada a partir de un plano ajustado a los valores de elevación de un grupo de 3x3 celdas centrado en ella (Burrough, 1986). Debido a que esta expresión proporciona el valor de la pendiente en radianes, es necesario transformarlo a unidades porcentuales.

La pendiente se clasificó en rangos según el criterio que se muestra en la tabla 1.

CLASE	RANGO DE PENDIENTE	INCLINACIÓN DE LAS LADERAS
1	0-3%	Muy suave
2	3-8%	Suave
3	8-21%	Ondulado
4	21-41%	Escarpado
5	41-50%	Muy escarpado

Tabla 1. Clases de pendiente.

Modelo digital de curvatura

Un modelo digital de curvatura del terreno (MDC) puede usarse para describir características relativas al drenaje, lo que puede permitir el análisis de aspectos relacionados con la acumulación de escorrentía y la disponibilidad de agua (Zeverbergen y Thorne, 1987; Moore *et al.*, 1991). El MDC indica el grado de concavidad/convexidad de la celda, de modo que un valor negativo indica convexidad y un valor positivo concavidad. Un valor igual o muy próximo a cero significa que la superficie es plana (figura 2).

La curvatura puede definirse como la tasa de cambio de la pendiente, y depende, por lo tanto, de la derivada de segundo grado de la elevación (Felicísimo, 1994). De este modo, podemos decir que la curvatura del terreno equivale a la suma de las derivadas parciales de segundo orden respecto a los ejes de coordenadas (x e y):

$$C = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}$$

El MDC, por lo tanto, puede calcularse a partir de cada celda del MDE original, mediante una aproximación polinómica a una superficie de ajuste de segundo grado:

$$z = a_{00} + a_{10} \cdot x + a_{01} \cdot y + a_{11} \cdot x \cdot y + a_{20} \cdot x^2 + a_{02} \cdot y^2$$

donde las derivadas primeras de z respecto de x e y son:

$$\frac{\partial z}{\partial x} = a_{10} + 2 \cdot a_{20} \cdot x + a_{11} \cdot y$$

$$\frac{\partial z}{\partial y} = a_{01} + 2 \cdot a_{02} \cdot y + a_{11} \cdot x$$

Y, por lo tanto:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 2 \cdot a_{20}$$

$$\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 2 \cdot a_{02}$$

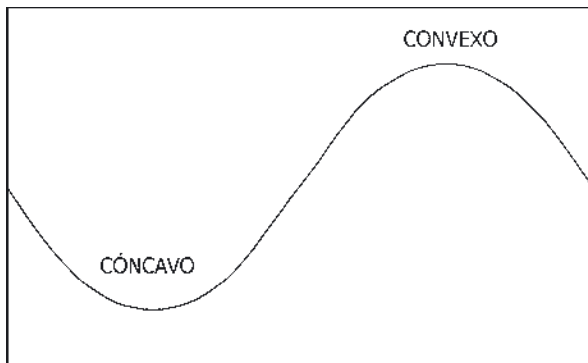


Figura 2. Concavidad/convexidad del terreno.

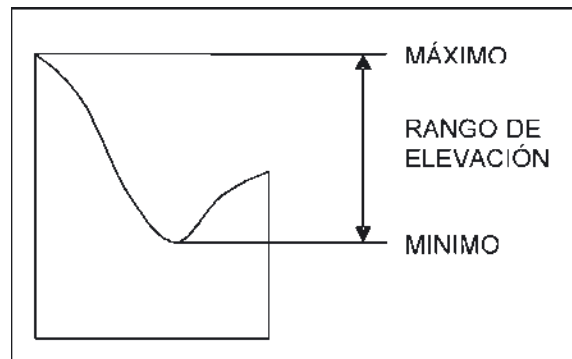


Figura 3. Determinación del relieve local en la ventana de 10.000 m².

De esta manera, la curvatura en cada celda del MDT puede calcularse de la siguiente manera:

$$C = 2(a_{20} + a_{02})$$

Según la expresión, valores negativos indican concavidad (cubetas de sedimentación, valles, etc.) mientras que valores positivos indican convexidad (macizos, domos, cumbres, partes altas de las laderas, etc.).

Relieve local del terreno

El estudio del relieve local se ha realizado directamente a partir del MDE. Para ello, se ha delimitado una ventana cuadrada de 1.000 m de lado correspondiente a cada celda (es decir, una ventana que incluye a 100 celdillas). A continuación, se ha determinado el rango de elevación en cada ventana, asignando ese valor a la celda central (figura 3). A partir de este rango de elevación se ha clasificado el relieve local, utilizando el criterio de la tabla 2.

Modelo digital de geformas

Las formas del terreno son el resultado de los procesos de modelado que actúan sobre la superficie. El modelado es, por lo tanto, función de los distintos agentes geomorfológicos que tienen lugar en la génesis del paisaje. El clima, la geología, la vegetación o el suelo son algunos de estos factores. Teniendo esto en cuenta, Hammond (1964) llevó a cabo una clasificación general de las formas del terreno en Estados Unidos, diferenciando cinco tipos principales de relieve: llanuras, mesetas, llanuras con colinas o montañas, colinas/montañas abiertas y colinas/montañas. A su vez, cada uno de estos tipos principales fue dividido en clases y subclases en función de la pendiente, el relieve local y el tipo de perfil (curvatura/convexidad de la superficie).

A su vez, y basándose en los trabajos ya citados de Hammond, Dikau et al. (1991) realizaron la clasificación automática del terreno en áreas de Estados Unidos. Iriagaray et al. (1997) y Martínez-Zavala et al. (2005) llevaron a cabo estudios similares. La misma metodología ha sido aplicada en el presente trabajo, aunque con algunas modificaciones.

CLASE	RANGO DE ELEVACIÓN	RELIEVE LOCAL
1	0-30 m	Relieve plano o casi plano
2	30-90 m	Relieve localizado
3	90-150 m	Relieve moderado
4	150-300 m	Relieve fuerte
5	300 – 900 m	Relieve montañoso
6	>900 m	Relieve montañoso muy alto

Tabla 2. Clases de relieve local.

La clasificación automática de formas principales del terreno se ha llevado a cabo a partir de la pendiente, el relieve local y la posición relativa. Para producir resultados homogéneos y comparables a los obtenidos por Hammond y Dikau, la pendiente se ha considerado “suave” por debajo del 4% (tabla 2). En la metodología utilizada por Dikau *et al.* (1991) el factor pendiente se describía según el porcentaje de la superficie con pendiente suave, y se establecía a partir de una ventana de 1.000 m de lado, generalizándose a cada celdilla de 40.000 m². En este trabajo se ha utilizado como unidad básica una celdilla de 10.000 m², lo que permite obtener resultados con una precisión más elevada.

Para ello, a cada celdilla del MDT se le ha asignado un código compuesto por tres dígitos, correspondientes a cada uno de los tres factores mencionados, tal y como se muestra en la tabla 3.

FORMAS DEL TERRENO	CLASES	CÓDIGO (ABC)
Valles	Valles	111 112
Llanuras	Llanuras suaves con relieve localizado	121 122
	Llanuras irregulares de bajo relieve	211 212
	Llanuras irregulares de relieve moderado	221 222
Mesetas	Mesetas con relieve moderado	131 231
	Mesetas con relieve considerable	141 241
	Mesetas con alto relieve	151 251
Llanuras con colinas o montañas	Llanuras con colinas	132 232
	Llanuras con colinas altas	142 242
	Llanuras con montañas bajas	152 252
Colinas y montañas abiertas	Colinas abiertas bajas	321 322
	Colinas abiertas moderadas	331 332
	Colinas abiertas altas	341 342
	Montañas abiertas bajas	351 352
Colinas y montañas	Colinas muy bajas	412
	Colinas bajas	422
	Colinas moderadas	432
	Colinas altas	441 442
	Montañas bajas	451 452

Tabla 3. Clasificación de las formas del terreno. A: pendiente; B: relieve local; C: curvatura.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo morfológico del terreno permitió diferenciar cuatro tipos principales de formas: “colinas y montañas”, “mesetas”, “llanuras”, y “valles” (figura 4).

Colinas y montañas

Las laderas corresponden a zonas de fuerte pendiente, de forma generalmente cóncava y relieve de moderado a fuerte. La actuación de los procesos erosivos es intensa, aunque la génesis de la forma esta condicionada principalmente por la presencia de estratos rocosos resistentes. La morfología de las laderas se halla caracterizada por una marcada red de drenaje encajada entre los estratos de arenisca. Las principales laderas montañosas con alto relieve se distribuyen sobre las sierras de Ojén, el Niño y de Enmedio.



Figura 4. Mapa de formas del terreno. *Map of landforms.*

En algunos casos en que el sustrato está formado por rocas carbonatadas, como la sierra de las Cabras, la forma del terreno también está condicionada por los procesos de disolución kárstica.

La zona media de las laderas de las sierras, donde la pendiente es más suave y el relieve local es moderado o alto, se ha agrupado en una clase de colinas y montañas abiertas. Esto incluye, además, algunas formaciones de lomas. Las lomas constituyen zonas de relieve más o menos accidentado, como resultado de la disección del terreno por una serie de *talwegs*. Se distinguen de otro tipo de formas de relieve acusado por su proyección vertical alargada y por la presencia de dos vertientes principales con una dirección predominante.

En el parque, las lomas corresponden a las sierras del Aljibe, debido a su morfogénesis. Las sierras de arenisca están formadas por afloramientos de estratos rocosos con una gran influencia estructural, que originan formas alargadas y orientadas según la dirección de los plegamientos tectónicos. De esta manera, en el sector central y norte las sierras siguen una dirección norte-sur (sierra del Aljibe), mientras que en el sector sur y el Campo de Gibraltar siguen una dirección dominante noroeste-sureste (sierra de Luna, sierra de Ojén o sierra de Montecoche).

Mesetas

Las mesetas constituyen porciones de terreno relativamente planas y elevadas. Normalmente están limitadas al menos en uno de sus lados por un escarpe abrupto hacia zonas más bajas. Su origen se debe a elevaciones tectónicas de terreno plano y a continuación subdivididas por la incisión de profundas gargantas o valles. La superficie topográfica recuerda una forma tabular o suavemente ondulada por la erosión (Zinck, 1988-89).

Llanuras

En este conjunto se han incluido zonas con formas de perfil también cóncavo, de pendiente algo más acusada que en el caso anterior (3-8 %) y relieve plano o localizado. En este caso aparecen ya procesos erosivos de baja intensidad.

Se trata de formas asociadas al contacto entre los valles y las bandas de piedemonte que constituyen las faldas de las sierras.

En la parte culminante de las sierras el terreno pasa a formas determinadas por la intersección de dos laderas. Cuando el perfil del terreno es redondeado o tabular se trata de una zona amplia y fácilmente delimitable. En este caso, la pendiente es generalmente baja. La diferencia entre este tipo de formas y los valles resulta del relieve más acusado y, frecuentemente, de su forma algo más convexa.

Algunos ejemplos de este tipo de formas son los llanos del Juncal (en la sierra de Luna), las crestas de la sierra de la Palma, de Ojén o de Montecoche.

Valles

Los valles constituyen formas suavizadas y cóncavas con relieve poco acusado y pendiente muy baja (0-3%) donde los procesos de sedimentación predominan frente a los procesos erosivos. En este conjunto se incluyen zonas de vega, fondos de valles, depresiones, llanuras aluviales y cubetas de sedimentación. Constituyen áreas más o menos extensas de acumulación de sedimentos procedentes de las aportaciones fluviales y la escorrentía de las sierras vecinas. Las unidades de mayor extensión de este tipo son las constituidas por la cuenca baja del Barbate y los terrenos asociados a la cubeta de sedimentación de La Janda al oeste del parque, así como el área de Castellar de la Frontera, donde se encuentra el embalse del Guadarranque o la cuenca del embalse de Charco Redondo en el límite oriental.

CONCLUSIONES

Mediante un método jerárquico de clasificación se ha dividido el Parque Natural Los Alcornocales en cuatro clases de formas geomorfológicas principales. La superficie incluida en cada clase está caracterizada por una serie de características geomorfológicas que la distinguen de las áreas vecinas.

Los resultados muestran que el método utilizado permite identificar con fiabilidad las principales formaciones del terreno, y con mucho mayor detalle, un número elevado de subclases. Como objetivo de futuras investigaciones, el uso combinado de imágenes de satélite y de cartografía geológica preexistente a una escala adecuada, puede permitir una mayor precisión en la identificación de las geoformas, en el levantamiento de nueva información, en el análisis físico de cuencas hidrográficas, o en el caso de la realización de un mapa de suelos, de riesgos geológicos o de erosión.

La clasificación de las formas del terreno propuesta en el presente trabajo refleja las principales diferencias físicas y estructurales del área estudiada. Sin embargo, los resultados obtenidos pueden ser mejorados. El uso de un MDE más detallado podría permitir la identificación de microformas que no pueden percibirse con la resolución empleada, como formas fluviales que aparecen como superficies planas.

REFERENCIAS

- BELLINFANTE, N., Jordán, A., Anaya, M., y Martínez-Zavala, L. *Propuesta metodológica para la realización de un modelo de distribución potencial de usos forestales basado en parámetros geomorfoedáficos, climáticos y topográficos* (Memoria del proyecto, no publicada), Sevilla, Universidad de Sevilla – Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía), 2002.
- BURROUGH, P. A. *Principles of Geographical Information Systems for land resources assesment*, Nueva York, Oxford University Press, 1986.
- DIKAU, R., & Schmidt, J. "Georeliefklassifikation"; En: Schneider-Sliwa, R., Schaub, D., y Gerold, G.: *Angewandte landschaftsökologie*, Stuttgart (Alemania), Springer, 1999, pp. 217-244.
- DIKAU, R., Brabb, E. E., y Mark, R. "Landform classification of New Mexico by computer", US Geological Survey, Open File Report 91/634, 1991.
- DOYLE, F. J. "Digital terrain models: an overview", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 44/12 (1978), pp. 1481-1485.
- FELICÍSIMO, A. M. *Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones a las ciencias ambientales*, Oviedo, Ediciones PENTALFA, 1994.
- GERRARD, A. J. *Soils and landforms. An integration of Geomorphology and Pedology*, Londres, George Allen & Unwin, 1981.
- HAMMOND, E. H. *Classes of landsurface form in the forty eight states USA*, Washington, Annual Association of American Geographers v54, 1964.
- IRIAGARAY, C., Fernández, T., y Chacón, J. "Aplicación de un sistema de información geográfica al análisis del medio físico en el sector de Rute (Córdoba)", *Cuatrenario y Geomorfología*, 11/1-2 (1997), pp. 99-112.
- JENNY, H. *Factors of soil formation*, New York, McGraw Hill, 1941.
- JORDÁN, A., y Bellinfante, N. "Cartografía de la erosividad de la lluvia estimada a partir de datos pluviométricos mensuales en el Campo de Gibraltar (Cádiz)", *Edafología*, 7-3 (2000), pp. 83-92.
- JORDÁN, A. *El medio físico del Campo de Gibraltar: unidades geomorfoedáficas y riesgo de erosión* (Tesis Doctoral), Sevilla, Universidad de Sevilla, 2000.
- LARK, R. M. "Soil-landform relationships at within-field scales: an investigation using continuous classification", *Geoderma*, 92 (1999), pp. 141-165.

- MARTÍNEZ-ZAVALA, L., Jordán, A., Anaya, M., Gómez, I.A., y Bellinfante, N. "Clasificación Automática de Elementos Geomorfológicos en la Cuenca del Río Tepalcatepec (México) a Partir de un Modelo Digital de Elevaciones. Clasificación Automática de Formas del Terreno", *Cuaternario y Geomorfología*. Vol. 19. Núm. 3-4 (2005), pp. 49-61.
- MARTÍNEZ-ZAVALA, L. *Análisis territorial de la comarca del Andévalo occidental: una aproximación desde el medio físico* (Tesis Doctoral). Sevilla, Universidad de Sevilla, 2001.
- MOORE, I. D., Grayson, R. B., y Landson, A. R. "Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications", *Hydrological processes*, 5 (1991), pp. 3-30.
- RUIZ, L. A., Pardo, J. E., Porres de la Haza, M. J., Fernández Sarra, A. "Relaciones entre las características de modelos digitales de elevación y texturas aplicadas al análisis de la vegetación". En: Casta, O., Quintanilla, A. (eds.): *Teledetección. Avances y aplicaciones*, Albacete, Asociación Española de Teledetección, 1999, pp. 76-79.
- ZEVEBERGEN, L. W., y Thorne, C. R. "Quantitative analysis of land surface topography", *Earth surface processes and landforms*, 12 (1987), pp. 47-56.
- ZINCK, J. A. *Physiography and soils – Soil Survey courses*, Enschede (Holanda), ITC, 1988-89.