

Lozano Parra, F.J., García Martín, R. y Pulido Fernández, M. (2010): Localización óptima de estaciones de medición de humedad del suelo mediante clasificaciones del relieve a partir de modelos digitales del terreno. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 905-916. ISBN: 978-84-472-1294-1

LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE ESTACIONES DE MEDICIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO MEDIANTE CLASIFICACIONES DEL RELIEVE A PARTIR DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

Francisco Javier Lozano Parra, Ramón García Marín y Manuel Pulido Fernández

Grupo de Investigación Geoambiental, Área de Geografía Física, Universidad de Extremadura, Avenida de la Universidad s/n, 10071 Cáceres (España) jlozano@unex.es ; rgarciama@unex.es ; mapulidof@unex.es

RESUMEN

Las formas del relieve están directamente relacionadas con los procesos ambientales que sobre ellas se desarrollan, como los hidrológicos. Para estudiar estos procesos se utilizan numerosas técnicas, como la instalación de estaciones de medición de la humedad del suelo, las cuales tienen un alto coste, tanto instrumental como asociado a su montaje. A partir de Modelos Digitales del Terreno (MDT) se han realizado una serie de análisis espaciales para obtener clasificaciones geomorfométricas de las formas del relieve. Estas clasificaciones han permitido la delimitación de áreas que pueden diferenciarse por tener una humedad edáfica distinta y por desarrollar procesos hidrológicos diferentes, según el tipo de unidad geomorfométrica que representen. De esta forma se ha facilitado la selección de zonas para la instalación de las estaciones. Los resultados se han corroborado con trabajo de campo. Esta técnica se presenta como una herramienta eficaz para la obtención de la localización potencial de zonas con distinta humedad edáfica según su posición en las áreas de estudio, lo que permite reducir el tiempo y costes asociados al trabajo de campo, y permite delimitar de antemano las áreas óptimas para la instalación de las estaciones.

Palabras Clave: MDT, Humedad del suelo, Clasificaciones del relieve, Dehesa, Geomorfometría

ABSTRACT

Landforms are directly related to environmental processes that are developed on them, such as hydrology. To study these processes many techniques are used, as installation of monitoring stations for soil moisture, which have a high cost associated with both instrumental and assembly. From Digital Terrain Models (DTM) spatial analyses have been conducted in order to obtain geomorphometric landform classifications. These classifications have allowed the delimitation of areas of different soil moisture content and hydrological processes, according to the type of geomorphometric units. This has facilitated the selection of sites for the installation of soil moisture monitoring stations. Results have been verified by fieldwork. This technique appears as an effective tool for obtaining the potential location of different soil moisture content areas reducing time and economical costs associated with fieldwork and allow defining in advance the optimal areas for soil moisture monitoring installation.

Key words: DTM, Soil moisture, Landform classification, Dehesa, Geomorphometry.

INTRODUCCIÓN

El agua del suelo es uno de los principales factores limitantes en los ambientes mediterráneos, por lo que la comprensión de su dinámica espacio-temporal justifica su estudio. La disponibilidad hídrica del suelo está relacionada con la tipología de las formas del relieve. Así, de forma general, las zonas de vaguada tienen un comportamiento hidrológico diferente a las zonas de ladera (Ceballos y Schnabel, 1998). Igualmente ocurre cuando se cambia de escala, las zonas culminantes suelen ser hidrológicamente más variables que las más bajas. Si se pretende estudiar los procesos hidrológicos de una zona, se debe seleccionar primero qué tipo de procesos se han de analizar y su relación directa con el relieve donde se desarrollan.

Hasta el desarrollo de los ordenadores en las últimas décadas no se ha dispuesto de la tecnología adecuada que permita la elaboración de cartografía a partir de información digital basada en datos espacialmente referenciados. A través de esta información se generan modelos digitales del terreno (MDT) con los cuales se pueden realizar complejos análisis cuantitativos de la variable espacial tratada. Un MDT es una estructura numérica de datos (normalmente una matriz) que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua, y que permite su tratamiento por medios informáticos (Felicísimo, 1994). Algunos de estos análisis son las clasificaciones del relieve en unidades cuantitativamente homogéneas o clasificaciones geomorfométricas con base conceptual en la Geomorfometría, ciencia que analiza el relieve de forma cuantitativa (Hengl y Reuter, 2008).

Mediante análisis geomorfométricos se pueden delimitar zonas que en principio desarrollan comportamientos hidrológicos similares o muy parecidos, de esta forma se evita un exhaustivo trabajo de campo, seleccionando de antemano las unidades de estudio, lo que podría suponer el ahorro de un gran coste económico y temporal.

Los objetivos del trabajo son los siguientes:

- Evaluar la utilidad y validez que tienen los MDT para la clasificación de las formas del relieve.
- Definir/delimitar unidades homogéneas del relieve a partir de información altimétrica y mediante la aplicación de algoritmos que realizan clasificaciones no supervisadas.
- Escoger zonas idóneas para la instalación de estaciones de medición de humedad del suelo y diferenciar zonas donde se desarrollan distintos procesos hidrológicos determinados por su relieve.
- Usar esta metodología como criterio de selección de zonas óptimas de muestreo para estudios ambientales.

ANTECEDENTES

Durante los últimos años han sido propuestas varias estrategias metodológicas para estudiar las formas del relieve a partir de MDT. Uno de los trabajos pioneros fue realizado por Franklin (1987), que sentaba las bases de la geomorfometría. Posteriormente, diversos autores han continuado con esta temática de trabajo, como, por ejemplo, Barracedo Cano y Bosque Sendra (1996), Pike (2000), Bolongaro-Crevenna et al. (2005), Etzelmüller et al. (2007) o Tagil y Jennes (2008).

En esta línea se han desarrollado trabajos que relacionan la geomorfometría con diferentes temáticas, como su aplicación a los riesgos naturales (Ioannilli y Paregiani, 2008) o la relación de la clasificación del relieve con la distribución de la vegetación (Hörsch, 2003; Adediran et al., 2004; Abbate et al., 2006). De esta forma, se han llevado a cabo estudios que relacionan los procesos hidrológicos con las formas del relieve clasificadas a partir de modelos, como los llevados a cabo por Tarboton (1997) y por Tarboton y Ames (2001).

ÁREA DE ESTUDIO

Aunque el trabajo se llevó a cabo en 10 fincas privadas representativas de los ecosistemas de dehesas y pastizales que se encuentran repartidas por toda la región de Extremadura, este estudio se centra sólo en una de las fincas, llamada Parapuños de Doña María.

Esta finca se encuentra en el centro-sur de la provincia de Cáceres (Extremadura), y se localiza al suroeste del término municipal de Monroy. Tiene una superficie de 1002 hectáreas, y una de sus principales características físicas es que limita con el río Almonte, afluente del río Tago por su margen izquierda, formando parte de la cuenca de drenaje de dicho afluente (Fig. 1).

Se encuadra dentro del ecosistema de dehesa caracterizado por el aclarado del bosque mediterráneo original y control de la densidad vegetal para un mejor manejo del terreno. Se trata de un sistema multifuncional con usos agrosilvopastoriles. Dentro de estos usos predomina el ganadero, sobre todo la cría del cerdo (con la montanera), seguido del uso agrícola, con la siembra de cereal y pastizal para el ganado. También tiene usos forestales, como la recogida de madera o la producción de picón, y otros como la producción de miel.

Esta zona forma parte de la superficie de erosión (Gómez Amelia, 1982) o penillanura originada sobre materiales del zócalo hercínico centroibérico, formado principalmente por pizarras y esquistos (también denominado Complejo Esquisto Grauváquico o CEG). Este sustrato da lugar a una topografía ondulada de bajas pendientes, con una elevación media de 354 metros sobre el nivel del mar y unas cotas que se sitúan entre los 435 y los 230 metros. Además, sobre el sustrato del CEG se conservan los restos de un viejo pedimento, formado por capas sedimentarias del Paleoceno y Plioceno, que dan lugar a las partes culminantes del área de estudio y a una morfología fundamentalmente plana. Las zonas donde se encuentran las elevaciones más bajas es en el límite sur de la finca, perteneciente a los *riberos*, que son formas fluviales de desecación que dan lugar a cauces encajados con grandes pendientes sobre la base de la penillanura. Las pendientes de la finca varían desde 0° hasta 102,3° en las vertientes más fuertes y riberos.

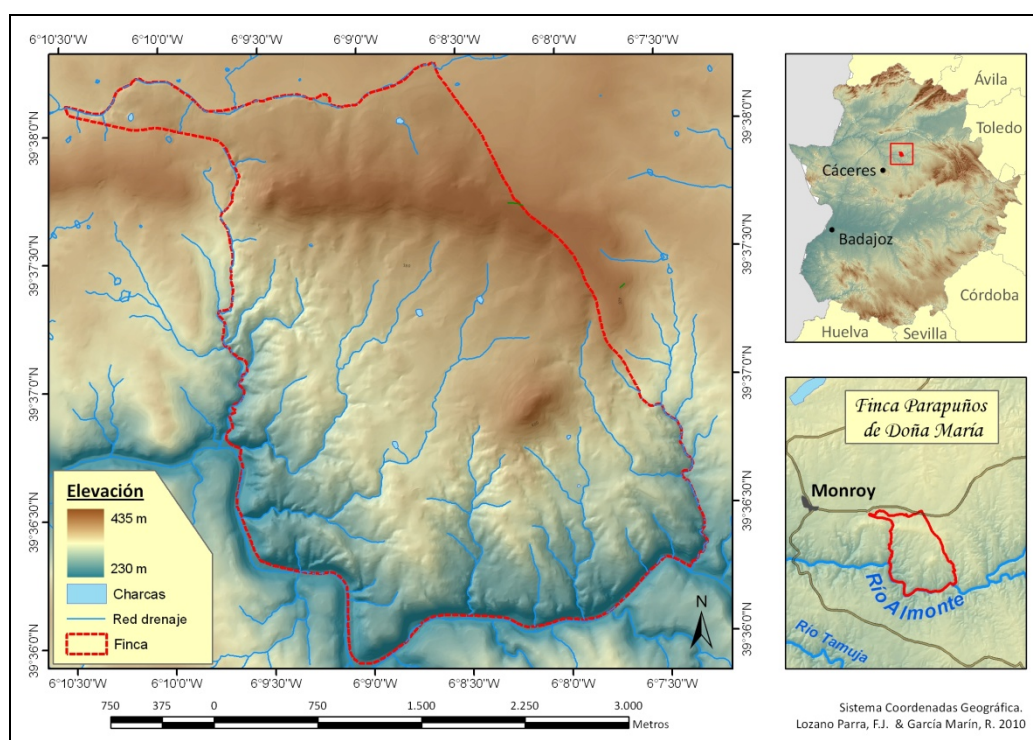


Figura 1. Ubicación y mapa físico del área de estudio Parapuños de Doña María.

Los suelos del área de estudio son generalmente recientes, con poco contenido en materia orgánica y elevada acidez. Su potencia es variable y está relacionada con la zona donde se desarrollan. De esta manera podemos encontrar los suelos más delgados en las vertientes y los más profundos en el pedimento y las vaguadas. Según la clasificación de suelos de la FAO (1998) aparecen: Acrisoles en el pedimento, Leptosoles y Cambisoles en las vertientes y zonas llanas sin sedimentos, y Regosoles en zonas cóncavas o vaguadas.

El clima es mediterráneo con influencias atlánticas y continentales. Su característica más destacable es la marcada estación seca que se da en los meses estivales (Fig. 2). Las temperaturas medias mensuales oscilan entre 7,9 °C en enero y 26 °C en julio, y la temperatura media anual es de 16,1 °C. La precipitación media anual es de 596,2 mm. La evapotranspiración potencial es de 834,9 mm, por lo que se da un gran déficit hídrico. En estos ambientes la precipitación tiene una alta variabilidad anual e interanual, por lo que los periodos de sequías se dan con frecuencia.

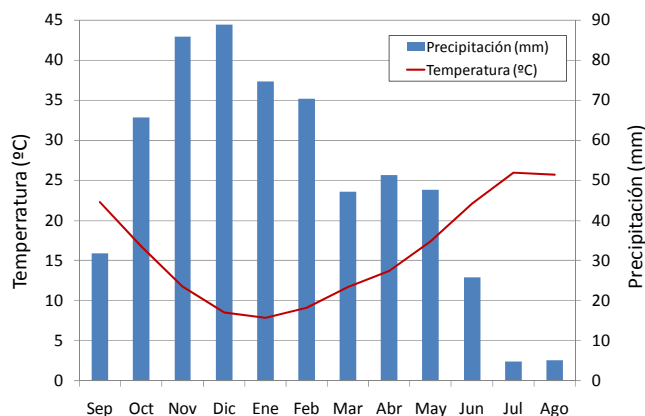


Figura 2: Climograma de Parapuños de Doña María a lo largo de un año hidrológico completo.

La vegetación de la zona es típica de los ambientes mediterráneos, y está adaptada a las características físicas y climáticas del medio mediante diversas adaptaciones como la esclerofilia, el enraizamiento profundo o el ciclo de crecimiento anual (plantas terófitas). El estrato vegetal puede ser dividido en tres estructuras básicas: vegetación arbórea, dominado por encinas (*Quercus ilex*); vegetación arbustiva, dominado por retamas (*Retama sphaerocarpa*), escobas (*Cytisus multiflorus*), jaras (*Cistus ladanifer*) y cantuesos (*Lavandula stoechas*); y vegetación herbácea, dominada por plantas terófitas.

MATERIAL Y MÉTODOS

El principal material utilizado ha sido una selección de hojas de mapas topográficos digitales (Mapa Topográfico Nacional 1/10.000). A partir de sus datos altimétricos (contorno de líneas y puntos de elevación) se han generado los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) con una resolución de 5 metros (este tamaño de píxel viene determinado por la distancia mínima entre curvas de nivel para evitar la pérdida de información). Normalmente, cuanto mayor sea la complejidad del relieve de la zona estudiada mayor resolución deberá tener su MDE, con el fin de discriminar mejor las características topográficas del área de estudio. Para generar el modelo se utilizó el algoritmo *Topo to raster* como método de interpolación (Hutchinson, 1993), el cual viene implementado en el programa informático ArcGis 9.0 (ESRI Inc., <http://www.esri.com>). Este interpolador está especialmente diseñado para obtener MDE a partir de contornos, crea un modelo hidrológicamente correcto con una red de drenaje conexa, elimina los sumideros (sinks), y permite utilizar como entrada contornos como la red de drenaje y/o curvas de nivel. La calidad del modelo también fue analizada y su error cuadrático medio fue estimado en 0,66 m.

A partir del MDE se extraen una serie de modelos que representan variables morfométricas derivadas de la elevación: pendiente (MDP), curvatura (MDC), y rugosidad (MDR).

La pendiente (MDP) representa la tasa de cambio de la elevación o el ángulo que forman el vector normal a la superficie en un punto y la vertical. Es calculada como la pendiente máxima del píxel problema con sus 8 vecinos. En nuestro caso está expresada en grados.

La curvatura (MDC) puede definirse como la tasa de cambio de la pendiente, es decir, la derivada segunda de la elevación. En términos morfológicos la curvatura expresa la concavidad o convexidad de una determinada área. Se calcula con una superficie de ajuste polinómica de cuarto orden (Zevenbergen y Thorne, 1987) donde los coeficientes son obtenidos utilizando una ventana de 3x3.

La rugosidad (MDR) puede definirse como la variabilidad de la pendiente en una determinada zona. Aunque se disponen de diferentes métodos para su cálculo no existe un procedimiento estandarizado

(Felicísimo, 1994), por lo que en este trabajo se ha optado por utilizar el método basado en el valor de la suma y la dispersión de los vectores perpendiculares en el entorno del punto problema (Hobson, 1972), con un tamaño de ventana de 5x5. Para calcular la rugosidad se ha utilizado una rutina desarrollada por Ángel M. Felicísimo, (disponible en: www.etsimo.uniovi.es/~feli/Utilidades.html) que calcula la varianza esférica de los vectores normales a la superficie del terreno como estimador de la rugosidad. Debe ejecutarse en el módulo Grid de ArcInfo.

Los modelos obtenidos son utilizados como entrada para el algoritmo de clasificación no supervisada con el que se obtiene la cartografía de las unidades geomorfológicas del área de estudio. El algoritmo utilizado en este trabajo fue *Iterative Self Organizing Data Analysis Technique* (IsoData Cluster, (Duda y Hart, 1973)), y su funcionamiento es el siguiente: compartimenta el espacio multidimensional en tantos ejes coordenados como variables, en nuestro caso modelos digitales del terreno (MDT), se desean utilizar. Posteriormente el algoritmo divide cada eje en un número de clases k (correspondiente a las unidades de relieve, o unidades geomorfológicas) determinado por el usuario, y agrupa los datos homogéneos según el número de k determinadas. En este último proceso también se utiliza otro algoritmo de agrupamiento de datos llamado *K-medias* o *K-means clustering algorithm* (Mac Queen, 1967).

Algunos de los requerimientos que exige *IsoData Cluster* para la entrada de datos es que todos los MDT utilizados deben presentar un rango de valores similar y con un valor medio diferente a 0. Por lo tanto, fue necesaria la transformación (o normalización) de los valores de los MDT, ajustando su rango de valores de 0 a 1000. Para ello se aplica a cada modelo la siguiente ecuación:

$$P_v = \frac{(O_v - O_{\min})(N_{\max} - N_{\min})}{O_{\max} - O_{\min}} + N_{\min}$$

Donde:

P_v = es el valor transformado de cada píxel en el nuevo modelo.

O_v = es el valor original de cada píxel

$O_{\min}$ y $O_{\max}$ = son, respectivamente, los valores mínimos y máximos del modelo original

$N_{\max}$ y $N_{\min}$ = son los valores máximos y mínimos del modelo transformado

Antes de ejecutar el algoritmo de clasificación se definió otro importante parámetro: el número de clases k o unidades geomorfológicas en que se clasificará el relieve. Como el valor óptimo de k (k_{op}) es desconocido existen varias metodologías en la literatura que han sido propuestas para estimar k_{op} .

En este trabajo se ha seguido el siguiente esquema para determinar k_{op} :

- Definir los límites de interpretación del relieve, es decir, el número máximo y mínimo de unidades del relieve que pueden ser delimitadas en el área de estudio. En este trabajo, los límites interpretativos fueron definidos entre 5 y 11, por lo que durante esta parte de estudio fue necesario el trabajo de campo.
- Ejecutar el algoritmo para los valores situados entre $k=5$ y $k=11$.
- Analizar la distancia mínima entre clases.
- Seleccionar k_{op} donde la clasificación presente el valor más alto para la distancia mínima entre clases. Este proceso asegura la separación máxima entre clases.

Los análisis fueron desarrollados utilizando análisis multivariantes implementados en el software comercial ArcGis 9.2 ((ESRI Inc., <http://www.esri.com>) usando como cartografía de base para la realización de los MDT las hojas del MTN a escala 1:10.000 suministradas por la Consejería de Fomento de la Junta de Extremadura.

RESULTADOS

Unidades geomorfométricas

Los 4 modelos que sirven de entrada al algoritmo *IsoData* para la clasificación geomorfométrica (MDE, MDP, MDC y MDR) se representan en la Figura 3, en la que también aparecen sus valores transformados o normalizados al rango entre 0 y 1000.

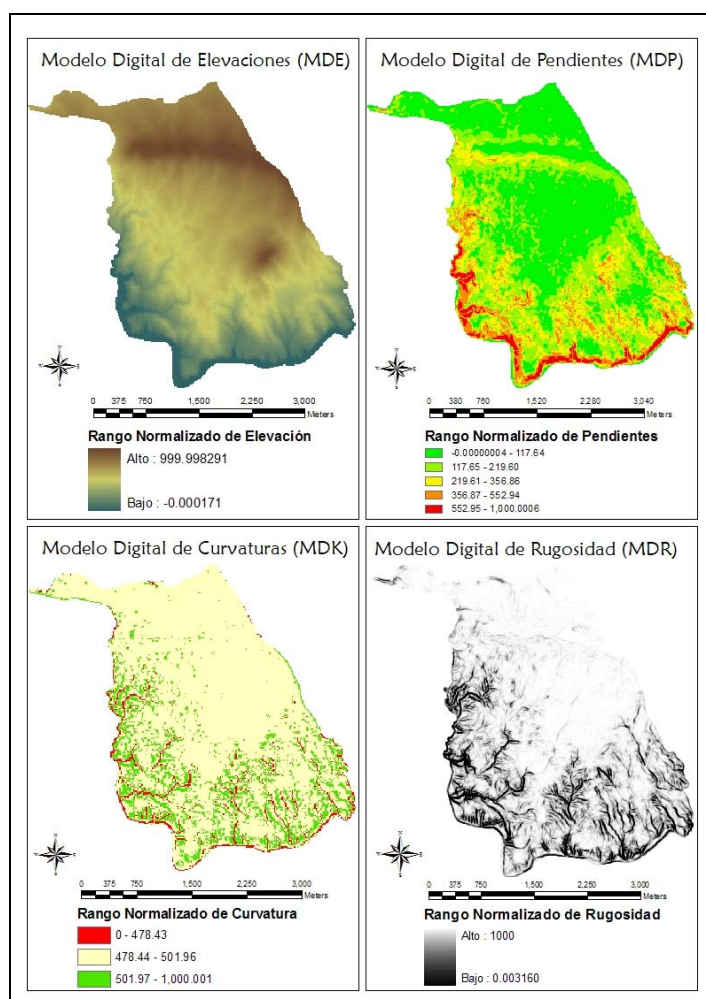


Figura 3: Modelos Digitales del Terreno utilizados en la clasificación geomorfométrica con sus valores normalizados.

El máximo valor de la distancia mínima entre clases utilizado para definir el número óptimo (k_{op}) de unidades geomorfométricas se determinó para una clasificación de 5 k (Fig. 4).

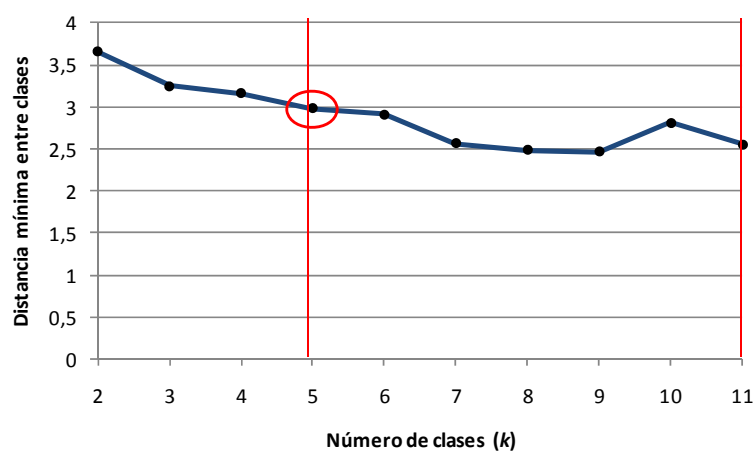


Figura 4: Valor óptimo de unidades (k_{op}) donde se maximiza la distancia mínima entre clases, entre los límites interpretativos del relieve.

Interpretación del relieve y su relación con los procesos hidrológicos.

La figura 5 muestra la cartografía resultante con el área de estudio dividida en 5 unidades (5 k) geomorfométricas.

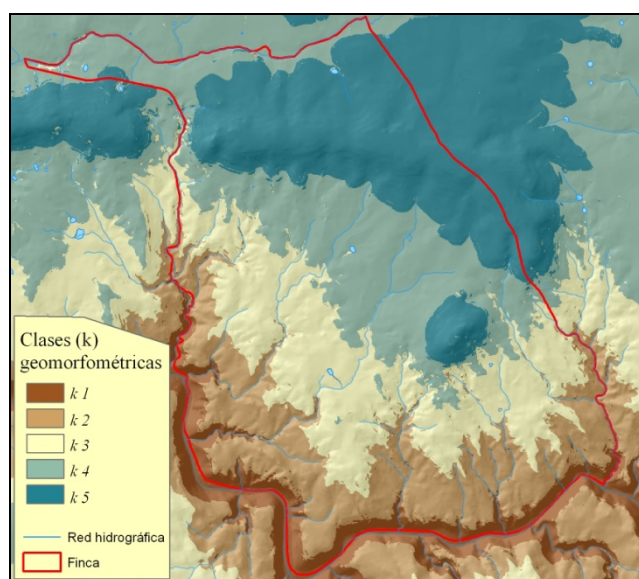


Figura 5: Cartografía resultante de la clasificación geomorfométrica

Las 5 unidades geomorfométricas resultantes fueron interpretadas usando sus estadísticas de altitud, pendiente, curvatura y rugosidad (Fig. 6).

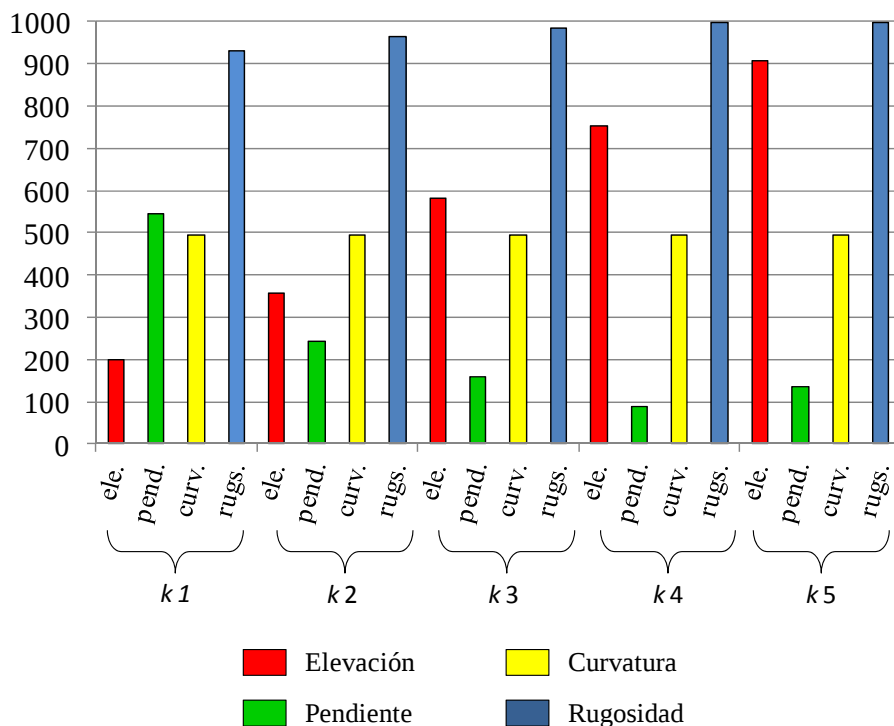


Figura 6: Valores de elevación, pendiente, curvatura y rugosidad de cada unidad geomorfológica resultante.

1. k 1: Zonas más deprimidas con grandes pendientes.

La unidad 1 (81.9 ha) fue asociada a la zona de riberos. Se trata de la zona con menor elevación pero es, con diferencia, la zona que presenta mayores pendientes. El valor de la curvatura es el cuarto más bajo, por lo que se puede afirmar que son zonas cóncavas o con tendencia a la concavidad. La rugosidad tiene el valor más bajo.

Al tratarse de la zona más baja de la finca y con cierta concavidad debe tratarse de una zona de acumulación de flujos. Si además tiene valores de muy elevada pendiente evidencia que se trata de una zona de laderas abruptas. En esta zona es posible que la humedad edáfica sea baja, ya que la pendiente es alta, los suelos delgados, la vegetación densa, y la exposición a solana es mayor. Esto se corroboró con mediciones directas de humedad del suelo en el terreno mediante técnicas TDR (*Time Domain Reflectometry*, (Hoekstra y Delaney, 1974; Topp et al., 1980)), que mostraron de forma general valores muy bajos de humedad.

2. k 2: zonas contiguas a los riberos:

La unidad 2 (212,0 ha) presenta la segunda menor elevación del área de estudio, por lo que debe ser contigua a la clase 1. Además la pendiente es la segunda más elevada, pero difiere bastante de la anterior y se asemeja más a las clases restantes, lo que evidencia que la clase 1 pertenece a riberos. La curvatura es la más baja, coincidiendo por lo tanto con las zonas con mayor concavidad. En esta zona también se da una muy baja rugosidad.

Los parámetros morfométricos podrían indicar que se trata de una zona donde se articula definitivamente la red de drenaje para confluir en el cauce de los riberos.

3. *k 3: zonas onduladas de transición:*

La clase 3 (263,5 ha) tiene elevaciones medias, con el tercer mayor valor en las pendientes (que podrían considerarse como medias o bajas) pero con irregularidades en el terreno debido al valor de la rugosidad, más alto que en clases anteriores. También se trata de la zona con mayor valor en la curvatura por lo que, en general, es una zona que tiende a la convexidad.

Si clasificamos esta zona como ondulada de transición podríamos considerar que desarrolla procesos hidrológicos de ladera, intercalados con procesos de vaguada en las zonas cóncavas. Posiblemente los flujos en esta zona no estén articulados en su totalidad y se den mayoritariamente procesos de escorrentía laminar.

4. *k 4: penillanura*

En esta clase (289,5 ha) las elevaciones son considerables, siendo la segunda zona donde se registran mayores altitudes. Según los parámetros morfométricos esta zona está muy relacionada con la clase 5, y es contigua a la clase 3. El valor de la pendiente es el más bajo de toda la finca, por lo que también se trata de una zona llana. Este hecho también lo corrobora la curvatura, que tiene un valor intermedio. En cambio la rugosidad es elevada, por lo que debería tratarse de una zona con ondulaciones. Los bajos valores de pendiente y curvatura que tiene esta clase dan a entender que puede tratarse de una zona llana.

Al clasificarse como zona de penillanura pueden darse todo tipo de procesos hidrológicos, desde procesos de vertiente en las laderas de las ondulaciones, a procesos asociados a vaguada en las zonas cóncavas. La humedad del suelo es muy variable en esta zona, por lo que la instalación de estaciones de medición en un sitio u otro dependerá del proceso que se quiera estudiar. Las zonas cóncavas suelen sufrir procesos de encharcamiento y pueden estar saturadas durante varias semanas al año. Según las mediciones con TDR, estas zonas registran una humedad edáfica más constante que el resto de zonas.

5. *k 5: Cumbres llanas con escasa pendiente.*

La clase 5 (176,4 ha) es la que tiene mayor elevación, por lo que se trata de la zona más alta de la finca. Tiene mayor pendiente que la clase 4, pero en general su valor es bajo por lo que éstas no deben ser excesivas, pudiéndose considerar una zona con escasa pendiente. La curvatura tiene el segundo valor más elevado, por lo que se trataría de una unidad que tiende a la convexidad. En cambio el valor de la rugosidad es el más elevado.

Esta clase se corresponde con la zona de pedimento ya que es una estructura llana ubicada sobre la penillanura, en la que los suelos son los más profundos del área de estudio y la vegetación es típica de sistema adehesado. Por lo tanto la humedad del suelo es muy variable, cambiando sobre todo a través de la profundidad del suelo. Según las mediciones realizadas con TDR es la zona que más rápidamente pierde humedad, debido sobre todo a su posición culminante en el área de estudio, a las propiedades físicas del suelo y a la interceptación del arbolado, más denso que en las demás zonas.

CONCLUSIONES

La clasificación del relieve mediante MDT es una técnica en auge y con resultados aplicables a una gran variedad de campos. Este proceso de clasificación no debería ser considerado sustitutivo o independiente de otros sino que debe ser complementario a otras técnicas como el trabajo de campo, fotointerpretación, o las consultas cartográficas.

Esta metodología presenta una serie de ventajas:

- a) Es una técnica que ahorra costes, ya que las clasificaciones mediante MDT no requieren desplazamiento de personal al área de estudio para estudiar las características del terreno.
- b) Constituyen una técnica muy potente para hacer clasificaciones de relieve de cualquier tipo de área de estudio, permitiendo realizar una clasificación tan solo disponiendo de datos altimétricos de la zona, sin necesidad de tener ningún tipo de información complementaria.

- c) Permiten realizar clasificaciones objetivas ya que se basa en datos cuantitativos. La lectura de los resultados también es objetiva porque igualmente se basa en datos cuantitativos y estadísticos.
- d) Puede ser la única alternativa a la clasificación del relieve de una determinada zona cuando no exista la posibilidad de visitarla y no se dispone de ningún otro tipo de información sobre ésta que no sean datos altimétricos.

E inconvenientes:

- a) La calidad de los resultados depende de la resolución y tamaño del píxel.
- b) Estas técnicas sólo se basan en datos cuantitativos y no tienen en cuenta aspectos cualitativos del terreno que son totalmente imprescindibles, ya que tienen influencia directa sobre el relieve y los procesos hidrológicos, como la litología o la cobertura vegetal.
- c) Parámetros cuantitativos como la rugosidad, que tiene unos valores muy similares para cada clase de relieve, pueden crear cierto “ruido” en el proceso de clasificación y puede dar lugar a confusiones en la interpretación de los resultados, por lo que su inclusión podría ser prescindible.
- d) No hay un método que permita concluir el proceso sin que el analista tenga que tomar siempre la última decisión sobre las clases a elegir, por lo tanto la clasificación final podría considerarse subjetiva.

Las unidades clasificadas tienen relación con los procesos hidrológicos que sobre ellas se desarrollan, dándose unos procesos u otros según la clase geomorfométrica que represente la unidad. La selección de la ubicación de las estaciones de medición de humedad del suelo puede ser establecida de antemano mediante la clasificación geomorfométrica, dependiendo de los procesos hidrológicos que se quieran estudiar. La clasificación del relieve en unidades ayuda a distinguir los procesos que pueden darse en distintas zonas, por lo que se facilita la elección del área, ahorrando en costes de tiempo, desplazamiento, y trabajo de campo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación ha sido posible gracias al soporte económico del Ministerio de Ciencia y Tecnología (CLG2008-0121/BTE), de la Junta de Extremadura (PRI06A281) y del Plan FEDER y al trabajo, tanto de campo como de gabinete, de los miembros del GIGA: Susanne Schnabel, Joaquín Francisco Lavado Contador, Álvaro Gómez Gutiérrez, Silvia Nadal Chillemi y Ángel Jariego García.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbate, G., Cavalli, R. M., Pascucci, M., Pignatti, S., Poscolieri, M., 2006. Relations between morphological settings and vegetation covers in a medium relief landscape of Central Italy. *Annals of Geophysics* 49, 153-165.
- Adediran, A. O., Parcharidis, I. M., Pavlopoulos, K., 2004. Computer-assisted discrimination of morphological units on north-central Crete (Greece) by applying multivariate statistics to local relief gradients. *Geomorphology* 58, 357-370.
- Barracedo Cano, J. I., Bosque Sendra, J., 1996. Delimitación de unidades homogéneas del relieve a partir de un modelo digital de elevaciones. *Estudios Geográficos* 225, 615-643.
- Bolongaro-Crevenna, A., Torres Rodríguez, V., Sorani, V., Frame, D., Arturo Ortiz, M., 2005. Gemorphometric analysis for characterizing landforms in Morelos, Mexico. *Geomorphology* 67, 407-422.
- Ceballos, A., Schnabel, S., 1998. Hydrological behaviour of a small catchment in the dehesa landuse system (Extremadura, SW Spain) *Journal of Hydrology* 210, 146-160.

- Duda, R. O., Hart, P. E., 1973. *Pattern classification and scene analysis*, John Wiley and Sons, Nueva York, Estados Unidos.
- Etzel Müller, B., Romstad, B., Fjellanger, J., 2007. Automatic regional classification of topography in Norway. *Norwegian Journal of Geology* 87, 167-180.
- FAO, 1998. *World Reference Base for Soil Resources, World Soil Resources Reports* 84, FAO, Roma, Italia.
- Felcísimo, Á. M., 1994. *Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*, Oviedo, España.
- Franklin, S. E., 1987. Geomorphometric processing of Digital Elevation Models. *Computers & Geosciences* 13, 603-609.
- Gómez Amelia, D. (1982). La penillanura cacereña : estudio geomorfológico. Tesis Doctoral. Cáceres, Universidad de Extremadura: 419.
- Hengl, T., Reuter, H. I., 2008. *Geomorphometry: concepts, software, applications. Developments in Soil Science.*, Elsevier,
- Hobson, R. D., 1972. Surface roughness in topography: a quantitative approach, En: Chorley, R. J. (Eds.), *Spatial analysis in Geomorphology*. pp. 221-231.
- Hoekstra, P., Delaney, A., 1974. Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies. *Journal of Geophysical Research* 79, 1699-1708.
- Hörsch, B., 2003. Modelling the spatial distribution of montane and subalpine forests in the central Alps using digital elevation models. *Ecological Modelling* 168, 267-282.
- Hutchinson, M. F., 1993. Development of a continent-wide DEM with applications to terrain and climate analysis, En: Goodchild, M. F., Parks, B. O., Steyaert, L. T. (Eds.), *Environmental Modeling with GIS*. Oxford University. Nueva York, Estados Unidos, pp. 392-399.
- Ioannilli, M., Paregiani, A., 2008. Automated unsupervised geomorphometric classification of earth surface for landslide susceptibility assessment. *Lecture Notes in Computer Science* 5072 LNCS, 268-263.
- Mac Queen, J., 1967. Some methods for classification and analysis of multivariate observations, En: Le Cam, L. M., Neyman, J. (Eds.), *Proceedings 5th Berkley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*. University of California Press. pp. 281-297.
- Pike, R. J., 2000. Geomorphometry - diversity in quantitative surface analysis. *Progress in Physical Geography* 24, 1-20.

- Tagil, S., Jennes, J., 2008. GIS-Based automated landform classification and topographic, landcover and geologic attributes of landforms around the Yazoren Polje, Turkey. *Journal of Applied Sciencies* 8, 910-921.
- Tarboton, D. G., 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research* 33, 309-319.
- Tarboton, D. G., Ames, D. P. (2001). Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data. *World Water and Environmental Resources Congress*, Orlando, Florida, Estados Unidos.
- Topp, G. C., Davis, J. L., Annan, A. P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research* 16, 574-582.
- Zevenbergen, L. W., Thorne, C. R., 1987. Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms* 12, 47-56.