

Moreno Brotóns, J., Alonso Sarría, F. y Romero Díaz, A. (2010): Clasificación geomorfométrica a partir de datos LIDAR en un área minera degradada. 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. 930-941. ISBN: 978-84-472-1294-1

CLASIFICACIÓN GEOMORFOMÉTRICA A PARTIR DE DATOS LIDAR EN UN ÁREA MINERA DEGRADADA

Moreno Brotóns, J.¹, Alonso Sarría, F.¹ y Romero Díaz, A.²

(1) Instituto Universitario del Agua y del Medio Ambiente. Universidad de Murcia. Campus de Espinardo 30100, Murcia. jesusmb@um.es

(2) Departamento de Geografía. Universidad de Murcia. Campus de La Merced 30001, Murcia. arodi@um.es

RESUMEN

Las características del cualquier entorno varían considerablemente en función de la topografía, siendo un factor indispensable a tener en cuenta en cualquier estudio, y más concretamente en la Sierra Minera de Cartagena - La Unión; zona de clima semiárido en la que históricamente ha tenido lugar una gran actividad de minería extractiva que ha modificado todos sus componentes morfológicos (relieve, pendiente, etc.), resultando por tanto de especial interés la clasificación de los elementos geomorfológicos allí presentes.

En este estudio se ha utilizado un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de 4 metros de resolución espacial obtenido a partir de un vuelo LiDAR (Light Detection and Ranging) con el objetivo de hacer una clasificación geomorfométrica. Para ello, se realiza una primera aproximación a la realidad de la zona de estudio mediante una clasificación no supervisada, utilizando como técnica cluster el algoritmo ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique), e introduciendo los atributos topográficos derivados directamente del MDE para caracterizar las clases. Asimismo, se realiza una clasificación supervisada basada en áreas de entrenamiento de los principales elementos geomorfológicos.

Palabras Clave: LIDAR, geoforma, clasificación, MDE, geomorfometría

ABSTRACT

The characteristics of any environment vary widely in relation with the topography, being an indispensable factor to take into account in any study, and more specifically in the mining range of Cartagena - La Unión. It is a semiarid area in which, historically, large mining activity has changed all its morphological components (relief, slope, etc..), being of special interest the classification of its geomorphological elements.

The data used in the classifications were derived from a four-meter grid LIDAR- DEM. Firstly, we perform an approximation to the reality of the study area by unsupervised classification, using the ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) algorithm cluster technique, introducing the topographic attributes derived directly from the DEM to characterize classes. Also a supervised classification based on training areas of the main geomorphological elements is performed.

Key Words: LIDAR, landform, classification, DEM, geomorphometry.

INTRODUCCIÓN

Las actividades mineras son una de las fuentes de degradación del suelo más persistentes del planeta, generando enormes volúmenes de residuos que se acumulan a lo largo de extensas áreas, modificando severamente la geomorfología del terreno. En el distrito minero de Cartagena – La Unión (SE España), este proceso comenzó hace más de 2.5000 años, donde el paisaje resultante que podemos observar hoy día es producto de la intensiva extracción mineral que en él tuvo lugar, el cual fue especialmente severo durante el último siglo, en el que podemos distinguir dos periodos distintos con diferentes impactos paisajísticos y ambientales. El primero de ellos coincide con la explotación subterránea del distrito, donde las formas resultantes provienen esencialmente de la acumulación de los estériles de minería. Posteriormente, en el segundo de estos periodos, la explotación tuvo lugar a cielo abierto, lo que conllevó un mayor impacto en el paisaje que el periodo anterior. En muchas zonas ha tenido lugar una “inversión paisajística”, ya que colinas y montañas, profundamente excavadas con objeto de la extracción del mineral, son ahora grandes depresiones (conos invertidos), así como en las zonas tradicionalmente deprimidas, debido a la acumulación de material, presentan cotas superiores a las originales (Moreno et al., 2009) .

Se trata por tanto de una zona de estudio única debido a sus características geomorfométricas, a las peculiares geoformas presentes, así como por sus elevadas tasas de erosión, siendo por ello interesante su clasificación geomorfométrica mediante técnicas SIG, utilizando como información principal un Modelo Digital de Elevaciones (MDE).

Actualmente existen diferentes modos de obtener la información necesaria para la construcción de un MDE, pero en los últimos años se están imponiendo nuevas tecnologías de medición de información espacial con aplicación en la modelización del terreno. Una de las más ampliamente utilizadas es el LIDAR (*Light Detection and Ranging*), ya que se ha convertido en una de las mejores herramientas para la medición directa del terreno con gran precisión, así como en la fuente de información principal para la realización de clasificaciones numéricas del paisaje, pudiendo obtener una extracción detallada de las geoformas allí presentes.

ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se centra en el distrito minero de Cartagena – La Unión, el cual se ubica en el extremo oriental de la Región de Murcia (en el sureste peninsular ibérico), entre Cabo de Palos y Cartagena (Figura 1) y ocupa una extensión que alcanza los 50 km². Se trata de un área muy afectada por la minería a cielo abierto y en la que se encuentran diversas balsas o pantanos de estériles que suelen ser focos de emisión de materiales, tanto por erosión eólica como por erosión hídrica.

Predominan los suelos poco evolucionados, destacando por su extensión los litosoles, que aparecen en zonas de mayor pendiente donde predominan fenómenos de erosión y presentan la roca madre en la superficie. En zonas de umbría, al ser el microclima más húmedo, pueden aparecer suelos más evolucionados debido a la presencia de vegetación forestal. En las llanuras sedimentarias aparecen suelos más desarrollados, sometidos a cultivo desde antiguo. Estos suelos, formados sobre sedimentos cuaternarios calizos, corresponden principalmente al tipo de los xerosoles, formados bajo un régimen de precipitación árido.

Desde el punto de vista fisiográfico, la Sierra de Cartagena-La Unión se trata de una sierra litoral, cuya morfología la componen un conjunto de cumbres de altura media y vertientes desnudas, con un rápido descenso hacia el mar en dirección Sur, lo cual da lugar a la formación de una costa muy escarpada, salpicada de calas y promontorios rocosos. Hacia el Norte las pendientes son más suaves y forman la planicie del Campo de Cartagena.

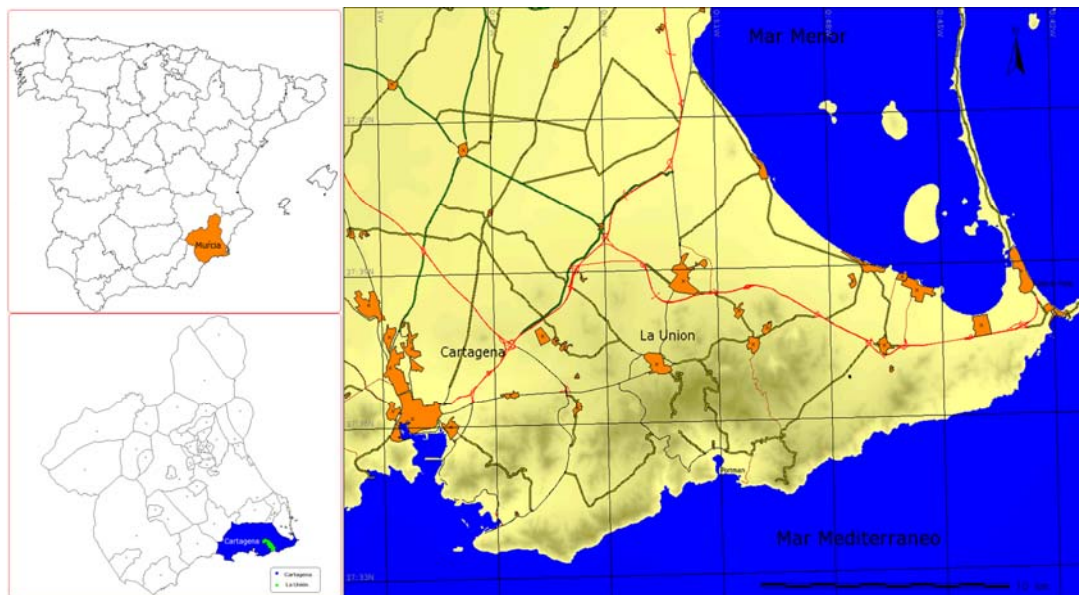


Figura 1: Área de estudio.

Como ya se ha comentado, la morfología de la zona ha sido profundamente modificada, donde los procesos de modelado más importantes resultantes de las explotaciones mineras a cielo abierto (López Bermúdez, 1987) son los desmontes, el aplanamiento de relieves, arranque de materiales (perforaciones y voladuras) y escombreras de rocas de extracción minera, dando lugar a una topografía muy compleja y totalmente antropizada.

ANTECEDENTES

Información y atributos topográficos

La altimetría de partida está formada por un MDE de elevada resolución espacial (4 metros) derivado de un sensor LIDAR. A partir de dicho MDE se han obtenido directamente los parámetros básicos relacionados con la morfología del terreno, distinguiendo si estos parámetros son calculados local o regionalmente. Los parámetros locales son, como su propio nombre indica, calculados para cada punto, y suelen estar relacionados con la geometría del terreno y con los estadísticos derivados de ella. Dentro de ellos, podemos distinguir como parámetros primarios aquellos que se derivan de las primeras derivadas parciales de la función matemática que representa de forma genérica la elevación en un MDE:

$$z=f(x,y)$$

Si tomamos a la elevación como un campo escalar, podemos estimar fácilmente el vector gradiente, del cual se pueden obtener sus dos propiedades geométricas principales como son la longitud (o módulo) y la dirección, que geomorfométricamente hablando, corresponden con dos de los parámetros principales de la superficie terrestre: pendiente y orientación.

Por su parte, el otro tipo de parámetros locales, son los que se derivan de las segundas derivadas parciales de la función anteriormente descrita. Estos están relacionados con la concavidad y convexidad del terreno, por lo que dentro de la geomorfometría el parámetro más importante es la curvatura. Pueden estimarse diferentes curvaturas en función de la dirección que se tome en consideración, pero en nuestro caso tan solo utilizaremos tanto la curvatura horizontal como la vertical, ya que explican a la perfección los fenómenos de convergencia-divergencia de las líneas de flujo, así como la aceleración-deceleración de dichos flujos.

El otro gran grupo, los parámetros regionales, necesitan considerar otras extensiones del MDE diferentes al punto exacto que ha de ser calculado. Normalmente, estos parámetros se definen por el movimiento de flujos ladera abajo y con las relaciones que se presentan con el resto de celdillas, por lo que estamos añadiendo el efecto gravitacional a los conceptos puramente geométricos del análisis local. Ejemplos de estos parámetros suelen ser modelos físicos o índices empíricos que caracterizan la variabilidad espacial de un proceso que tiene lugar en un paisaje determinado (Moore et al., 1991; Wilson y Gallant, 2000), expresando el papel desempeñado por la topografía en la distribución de materia y energía, como es el caso de los flujos hídricos o la radiación solar recibida en la superficie terrestre. Para este estudio tan solo se ha utilizado un parámetro de este tipo, como es el área drenada, ya que en ella se relacionan fenómenos gravitacionales como es el escurrimiento con la propia geometría de la superficie terrestre, dando un sentido geomorfológico a la clasificación resultante.⁷

Problemas de escala

La representación precisa de la superficie del terreno siempre ha constituido un reto para científicos e ingenieros en la geografía, la geomorfología, la ingeniería civil, la geología y la topografía, entre otras; ya que esta puede ser representada de diferentes maneras. Un MDE, al igual que un mapa topográfico, tiene asociada una escala que va a condicionar la representación y análisis de las superficies de terreno. Mediante dicha escala se establece la relación matemática que existe entre las dimensiones reales y las que representa la realidad sobre un mapa. La escala es un viejo problema en las ciencias de la tierra, el cual ha sido abordado ampliamente por investigadores de diferentes disciplinas como la geomorfología, hidrología, ciencias ambientales, oceanografía, edafología, biología, biofísica, ciencias sociales, etc (Atkinson y Tate, 2000; Bian y Walsh, 1993; de Boer, 1992; Lark, 1999; Quattrochi y Goodchild, 1997; Stewart et al., 1998; Walsh et al., 1998).

Centrándonos únicamente en el término de escala espacial (también la hay temporal), es un concepto que en diferentes ámbitos puede significar varias cosas, pero que atendiendo exclusivamente a la modelización del terreno, *escala* puede significar (Zhilin, 2008):

- Grado de abstracción
- Grado de detalle
- Ratio de distancia o ratio cartográfico
- Magnitud del área de estudio

Así pues, la superficie de la Tierra es continua en la mayoría de los lugares y los elementos naturales del terreno varían en una amplia gama de escalas y tamaños. Aunque Evans (2003) ha demostrado que hay límites en el comportamiento fractal de los paisajes, el concepto de las dimensiones fractales, acuñado inicialmente por Mandelbrot (1967), lleva a la constatación de que "lo que ves depende en gran medida de cómo de cerca se mira"(MacMillan y Shary, 2009). Lo que se percibe en la observación y clasificación del terreno por lo tanto depende de una combinación del tamaño o extensión de la zona visualizada y del nivel de detalle de la superficie modelizada, la cual aparece controlada por la resolución horizontal y vertical de los datos de elevación utilizados para representarla.

Las técnicas de caracterización morfométrica de un MDE están altamente condicionadas y limitadas por la resolución del modelo, siendo por tanto muy dependientes de esta. La información derivada utilizando estas técnicas es únicamente relevante para la escala que la resolución del MDE lleva implícita, por lo que, desde una perspectiva geomorfológica, resultaría absurdo el considerar exclusivamente las variaciones de la superficie en una escala fija cuando se desea realizar un análisis de todo un paisaje (Fisher et al., 2004; Wood, 1996).

A la hora de realizar las operaciones y cálculos morfométricos necesarios para la obtención de los parámetros y variables topográficas derivadas del terreno, la mayoría de los algoritmos utilizados trabajan mediante operadores de vecindad, un tipo de operador de álgebra de mapas que estima el valor de cada celdilla de la capa de salida en función de los valores de una matriz regular de celdillas (de dimensiones conocidas) situadas en torno a ella, conformando una vecindad. Pues bien, estas vecindades constituyen, como se ha comentado en la sección 2.2, uno de los puntos de inflexión en todo análisis morfométrico, convirtiéndose en un problema clave el establecer la extensión óptima de la ventana de análisis, ya que no es

posible establecer una ventana de análisis de dimensiones fijas capaz de capturar la amplia variedad de geoformas que se encuentran anidadas a varias escalas en cualquier área de interés, ya que las geoformas no son perfectamente uniformes, presentando menor o mayor grado de variación (MacMillan y Shary, 2009).

Si bien es cierto, no existe una resolución óptima con la que calcular los parámetros del terreno para su posterior clasificación y representación (Hengl, 2006). La resolución seleccionada tiene que ser adecuada para captar y describir las características de la superficie de interés para una aplicación particular. Para ello, el enfoque aquí propuesto se centra en la investigación explícita de la variación en un rango de escalas calculando los parámetros de la superficie del terreno aumentando la resolución espacial, tal y como propuso Wood (1996).

Clasificación

Una geoforma (*landform*) es una unidad de terreno formada por procesos naturales o antrópicos de tal forma que puedan ser reconocidas y descritas en términos geomorfométricos independientemente de donde se encuentre (Lobeck, 1939; Weaver, 1965; Hammond, 1965; Pike, 2000). La clasificación de estas geoformas esta basada en las ideas de varios geomorfólogos, pero principalmente en Pike (1988), que desarrolló el concepto de la signatura geométrica, la cual se puede definir como “un conjunto de medidas que describen la topografía lo suficientemente bien como para ser distinguidas entre un conjunto desordenado de paisajes”.

Cuando se plantea un análisis geomorfológico, uno de sus fundamentos son las correlaciones espaciales de las diferentes categorías de la superficie, es decir, obtener una clasificación que compartimente el relieve, obteniendo así unidades cuyos rasgos distintivos son su homogeneidad fisionómica o fisiográfica (De Pedraza, 1996), teniendo como propósito principal la clasificación objetiva de cada unidad de territorio (Hammond, 1965).

Así pues, teniendo varias variables describiendo cada una de las celdillas del modelos, mediante técnicas de clasificación se busca identificar un número de grupos o clases de celdillas con características similares en un espacio n -dimensional, donde n es el número de variables (Brown et al., 1998). Los métodos de clasificación pueden ser divididos en supervisados y no supervisados, en función de si el clasificador posee un conocimiento a priori antes de realizar la clasificación. En este estudio se han implementado ambos tipos.

En el caso de la clasificación no supervisada, se definen las clases espectrales presentes en la información de partida, ya sean las bandas de una imagen de satélite o los parámetros de un MDE, sin que ello implique ningún conocimiento del área de estudio, por lo que la intervención humana se centra en la interpretación de los resultados.

La formación del relieve es un proceso que depende de muchos factores, no únicamente los relativos a la morfometría local. Combinando algunos de los parámetros que hemos visto hasta el momento, pueden establecerse clasificaciones a partir de técnicas de clasificación no supervisada o *clustering*, en los que se utilizan algoritmos de clasificación automática multivariante donde los individuos más próximos se van agrupando formando clases. Uno de los más habituales es el *clustering* jerárquico.

La clasificación supervisada se basa en un conocimiento previo de la zona de estudio, donde se parte de un conjunto de clases (clases informacionales) conocido a priori. Este conocimiento permite al intérprete delimitar sobre la imagen (en nuestro caso sobre el MDE) unas áreas suficientemente representativas de cada una de las categorías que componen la leyenda, las cuales son conocidas como áreas de entrenamiento, ya que sirven para “entrenar” al clasificador en el reconocimiento de las diferentes categorías, es decir, mediante dichas áreas se caracterizan cada una de las clases presentes en la clasificación final, en la que el clasificador asignará una clase u otra a cada píxel en función de su similitud con los valores extraídos como referencia.

METODOLOGÍA

Todos los análisis metodológicos que a continuación se detallan, han sido realizados mediante software libre, utilizando GRASS como Sistema de Información Geográfica, R como software estadístico y PostgreSQL como sistema gestor de bases de datos.

Los atributos topográficos derivados del MDE son la pendiente, las curvaturas horizontal y vertical y el área drenada. Su cálculo ha sido realizado mediante GRASS, calculando las correspondientes derivadas parciales del MDE para los parámetros locales, y el área drenada estimada regionalmente con el algoritmo de enrutamiento D8 sobre la información altitudinal contenida en el MDE.

Con objeto de solventar los problemas de escala asociados a las geoformas de la superficie terrestre, se han estimado todas las variables con tamaños de vecindades que van desde 3 hasta 21, siendo este elegido como el techo de las dimensiones tal y como recomienda Pike (1988).

Una vez obtenidos dichos parámetros, se procede a una ordenación estadística de los mismos mediante un Análisis de Componentes Principales (ACP). Esta técnica suele utilizarse cuando se pretenden estudiar las relaciones entre p variables correlacionadas (que miden información común) (Jolliffe, 1986). El conjunto original de variables, se puede transformar en otro conjunto de nuevas variables no correlacionadas entre sí (que no tenga redundancia en la información) llamado conjunto de componentes principales. Las nuevas variables son combinaciones lineales de las anteriores y se van construyendo según el orden de importancia en cuanto a la variabilidad total que recogen de la muestra. Además, el uso de esta técnica resulta apropiado para nuestros datos, puesto que es una técnica matemática que no requiere la suposición de normalidad multivariante de los datos (Shaw, 2003). Una vez obtenidos los componentes principales de nuestras variables se procede a su clasificación.

Ambos tipos de clasificaciones, supervisada y no supervisada, han sido estimadas. Para la no supervisada, se ha utilizado el algoritmo ISODATA (*Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique*) (Tou y González, 1974). Este algoritmo realiza un proceso iterativo en el que a los grupos o clusters, k , previamente definidos por el usuario, se les asigna una media arbitraria dentro del espacio multidimensional, utilizando técnicas de mínima distancia, normalmente euclidiana. Cada iteración recalcula las medias y reclasifica los píxeles con respecto a esa nueva media. Este proceso continúa hasta que se ha alcanzado un número de clases igual al número de clases que había sido establecido a priori o cuando se ha alcanzado un umbral de distancia entre clases por encima del cual no debe continuarse.

Con respecto a la clasificación supervisada, se han realizado una serie de áreas de entrenamiento en las que las clases introducidas, concuerdan con las establecidas por Conacher y Dalrymple (1977) y que se suele tomar como ejemplo en estudios de este tipo cuando se pretende dar un enfoque genético al análisis geomorfométrico. Estas clasificaciones genéticas se basan en premisas histórico-naturales, pretendiendo definir “unidades geomorfológicas” en función de un agente, su ambiente o medio, o sus productos, basándose en patrones gravitacionales que constituyen la base para la cartografía geomorfológica en la que representar de manera óptima unidades y elementos geomorfológicos.

Así pues, las clases introducidas en las áreas de entrenamiento son: cauce, pendiente de transporte, cresta, pendiente eluvial, piedemonte y llanura. Una descripción detallada de las mismas se encuentra en Conacher y Dalrymple (1977).

Una vez obtenidas las firmas geométricas mediante ambas técnicas, se procede a la asignación de clases temáticas a cada uno de los píxeles. Para ello se ha utilizado el método de clasificación de máxima verosimilitud o de máxima probabilidad, donde se estima la probabilidad de que un píxel cualquiera pertenezca a cada una de las clases, asignándose finalmente a la clase a la que es más probable que pertenezca.

RESULTADOS

Atributos topográficos

Partiendo de un MDE (figura 2) obtenido mediante tecnología LIDAR, se han estimado 4 parámetros (figura 3), 3 de ellos basados en propiedades geométricas locales, como son la pendiente y las curvaturas horizontal y vertical. El parámetro restante es el área drenada.

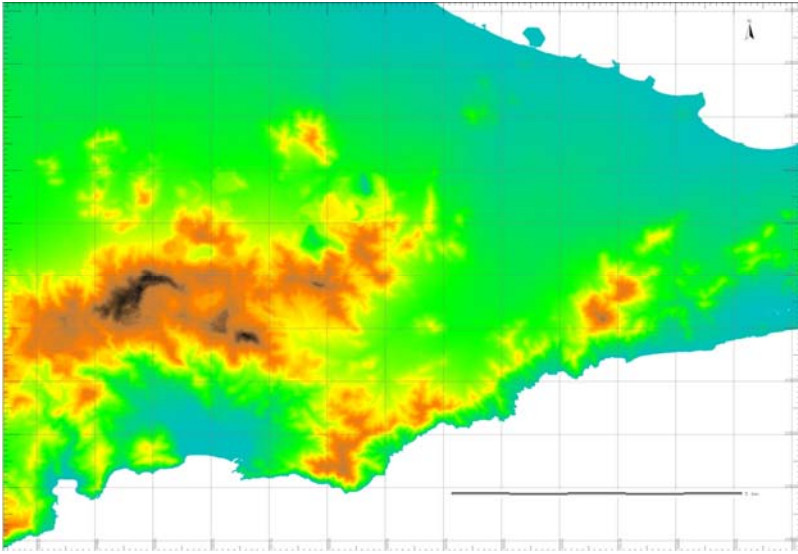


Figura 2: Modelo Digital de Elevaciones

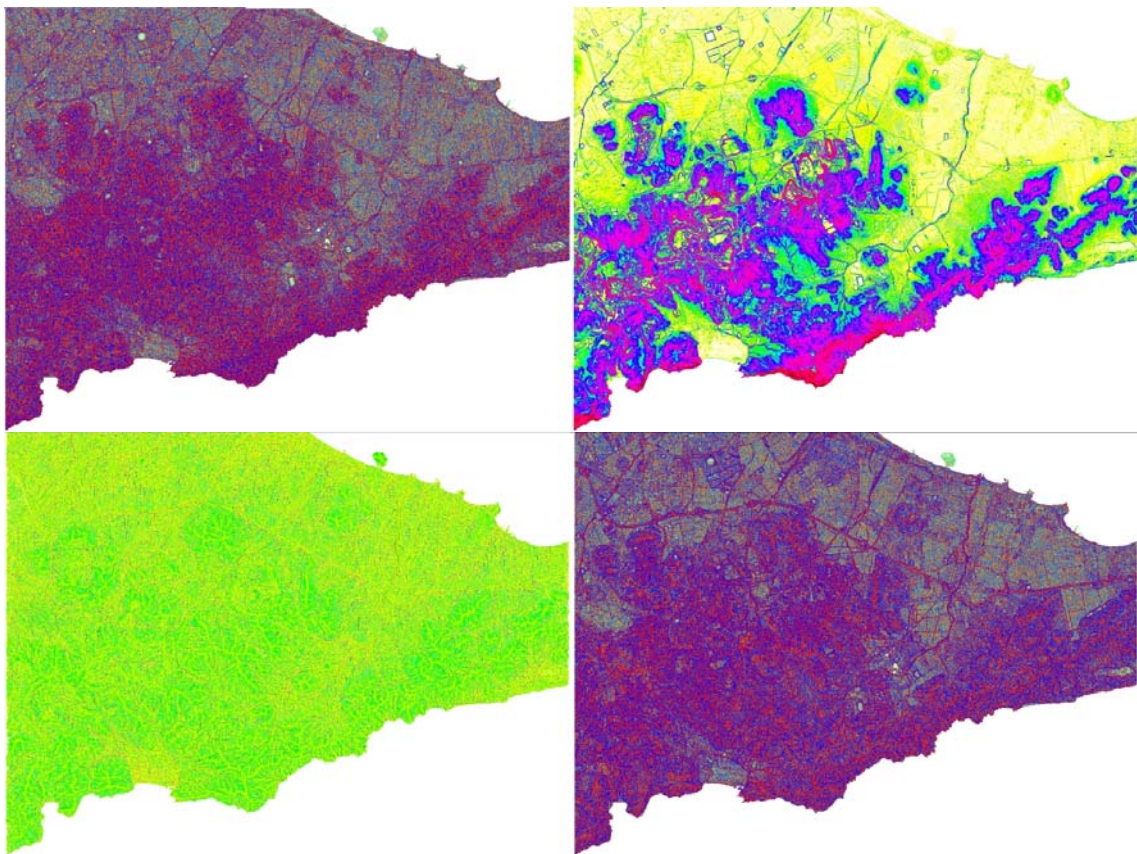


Figura 3: Atributos topográficos estimados. Curvatura horizontal, pendiente, área drenada y curvatura vertical (de izquierda a derecha, comenzando por la parte superior).

Análisis de componentes principales

Las capas estimadas con los diferentes umbrales de vecindad (3x3 – 21x21), las cuales no se muestran por cuestiones de espacio, tras someterse al ACP, han dado como resultado 17 capas de información, una por

cada componente (Tabla 1), siendo los tres primeros componentes los que mayor variabilidad explican, concretamente un 97% de la misma, por lo que estos son los elegidos para la realización de las posteriores clasificaciones.

Tabla 1: Análisis de componentes principales

Componentes	Valores propios	% Explicado
PC1	9121.63	59.02%
PC2	4908.66	31.76%
PC3	961.38	6.22%
PC4	166.47	1.08%
PC5	157.26	1.02%
PC6	44.82	0.29%
PC7	33.29	0.22%
PC8	20.78	0.13%
PC9	12.00	0.08%

Clasificaciones

Tras la clasificación de los 3 componentes principales obtenidos en el ACP, se realizó un cluster jerárquico de 20 clases. Se ha estimado la matriz de distancia de los centroides resultantes de cada clase, con objeto de construir un dendrograma (figura 4) con el que analizar los resultados y poder reclasificar clases redundantes.

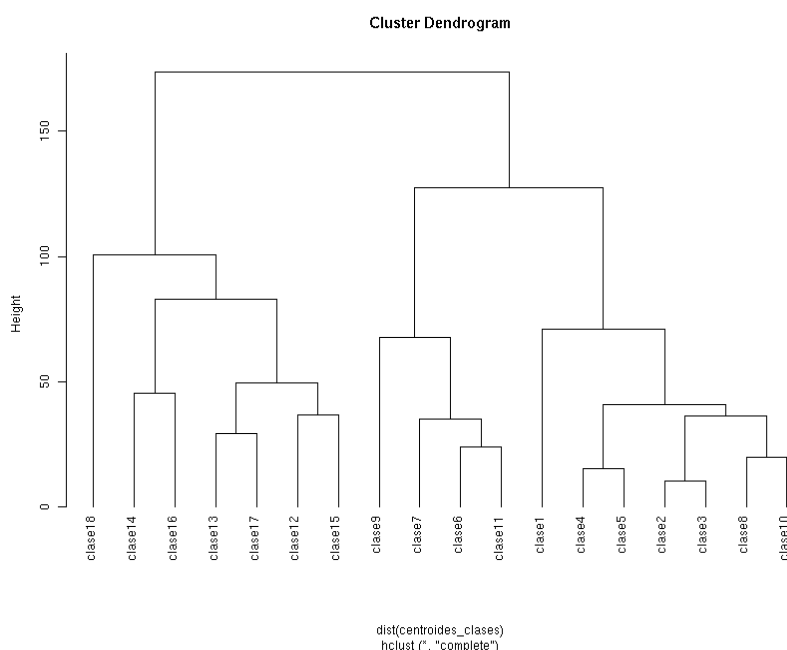


Figura 4: Dendrograma con las clases resultantes de la clasificación no supervisada

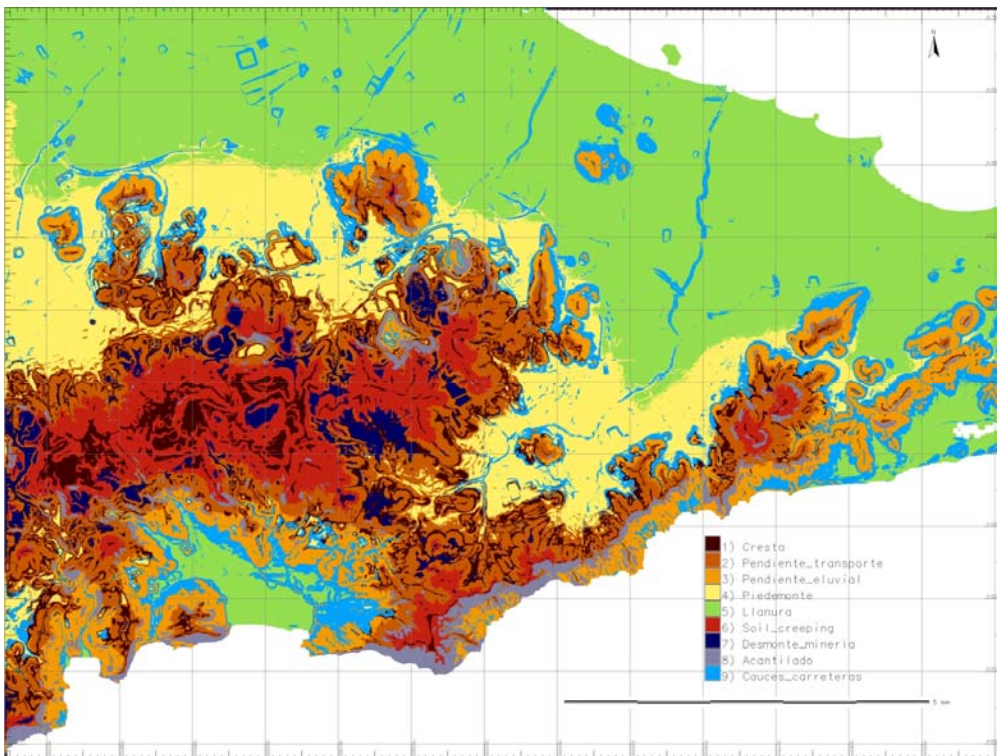


Figura 5: Clasificación no supervisada

Tras el análisis, se ha reclasificado en 9 clases con sentido geomorfológico y que a su vez concuerdan con las clases establecidas a priori en la clasificación supervisada (figura 5). En la clasificación supervisada se han obtenido un total de 6 clases, que concuerdan con las 6 clases introducidas a priori en las áreas de entrenamiento.

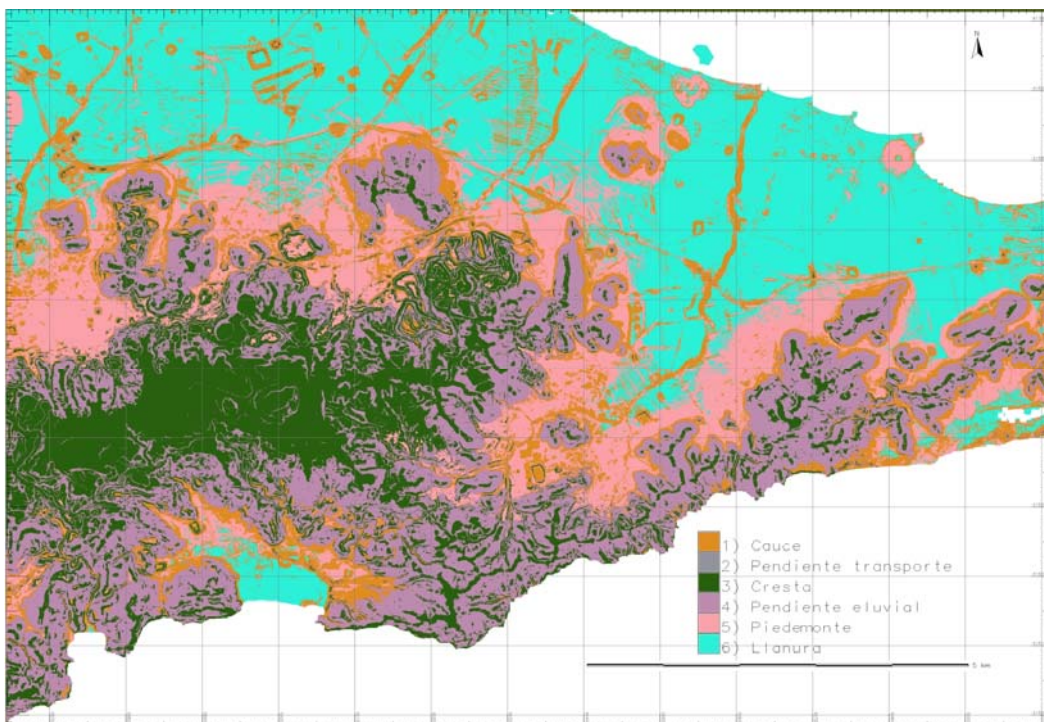


Figura 6: Clasificación supervisada

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En la clasificación supervisada se observan una serie de irregularidades, la mayoría producto de la alta resolución del MDE, y por tanto, de la elevada cantidad de información introducida en el clasificador. Se observa que los cauces son correctamente clasificados, aunque diversos elementos artificiales (carreteras, infraestructuras de agricultura tales como balsas y casetas), y los propios abancalamientos de las zonas de cultivo son confundidos con ellos, debido a sus similares propiedades geométricas. Asimismo, esta clase suele confundirse con falsos piedemontes.

De igual modo, las clases correspondientes a pendiente de transporte y pendiente eluvial suelen estar poco definidas en cuanto a sus límites, aún a pesar de ajustarse bastante bien a la realidad.

La clasificación no supervisada, la cual se realizó como una primera aproximación a la realidad de la zona de estudio, resulta ser mucho más satisfactoria en cuanto a la discretización de las clases, ya que es capaz de distinguir tres clases adicionales de las que se habían establecido previamente, como son los acantilados, pendientes con *soil creeping* o arrastre de suelo y zonas de desmonte y desbroce minero, que se caracterizan por ser superficies amesetadas con una relativa elevación. Estas zonas coinciden en su mayoría con balsas de lodos de flotación, escombreras mineras, etc.

En contrapartida, y debido al estado inicial de la presente investigación, la clase cauce es nuevamente confundida con carreteras, caminos e infraestructuras agrícolas, así como con falsos piedemontes, todos ellos por su similitud geométrica.

La clase llanura abarca gran cantidad del área de estudio, debido a la proximidad al mar y a la gran producción agrícola de la zona. En ella además se incluyen todo tipo de playas, inclusive aquellas que se encuentran encañonadas en la base de los acantilados en la zona sur de la Sierra Minera.

La estimación de las variables a con diferentes vecindades, y su integración mediante un análisis de componentes principales, demuestra ser una herramienta de gran utilidad para la ordenación de la información geomorfométrica, siendo capaz de identificar geoformas de diferente escala espacial.

Como se puede observar, la semi-automatización de este tipo de clasificaciones proporcionan un resultado con elevado significado geomorfológico, eliminando el sesgo que se producía con las técnicas cartográficas clásicas.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se ha desarrollado en el marco del Proyecto de Investigación denominado "Modelización Hidrológica en Zonas Semiáridas, Subproyecto Modelización Numérica de Procesos Hidrológicos y Sistemas de Recursos Hídricos", financiado por la Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua (IEA), gracias al cual ha sido posible su consecución.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atkinson, P. M. y Tate, N. J. (2000): Spatial scale problems and geostatistical solutions: a review. *Professional geographer*, 52:607-623.
- Bian, L. y Walsh, S. J. (1993): Scale dependencies of vegetation and topography in a mountainous environment of Montana. *Professional Geographer*, 45:1-11.
- Brown, D.; Lusch, D. y Duda, K. (1998): Supervised classification of types of glaciated landscapes using digital elevation data. *Geomorphology* 21(3-4):233-250.
- Conacher, A.J. y Dalrymple, J.B. (1977): The nine-unit landsurface model: an approach to pedogeomorphic research. *Geoderma* 18(1-2), 1-54.

- De Boer, D. H. (1992). Hierarchies and spatial scale in process geomorphology: a review. *Geomorphology*, 4(5):303-318
- De Pedraza, J. (1996): *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones*. Editorial Rueda.
- Evans, I. S. (2003). Scale-specific landforms and aspects of the land surface. En: I. S. Evans; R. Dikau; E. Tokunaga; H. Ohmori y M. Hirano (Eds.), *Concepts and Modelling in Geomorphology: International Perspectives*, págs. 61-84. TERRAPUB, Tokyo.
- Fisher, P.; Wood, J. D. y Cheng, T. (2004). Where is Helvellyn? Fuzziness of multi-scale landscape morphometry. *Transactions of the Institute of British Geographer*, 29(1):106-128.
- Hammond, E. (1965): What is a landform? Some further comments. *The professional geographer* 17(3), 12-13.
- Hengl, T. (2006). Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences*, 32(9):1283-1298.
- Jolliffe, I. T. (1986): *Principal Component Analysis*. Springer-Verlag
- Lark, R.M. (1999): Soil-landform relationships within-field scales: an investigation using continuous classification. *Geoderma*, 92:141-165.
- Lobeck, A. (1939): *Geomorphology: An introduction to the study of landscapes*. McGraw-Hill, New York, 731 págs.
- López Bermúdez, F. (1987). Morfología derivada de la minería a cielo abierto en la Sierra de Cartagena. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 7, 33-144.
- MacMillan, R.A. y Shary, P.A. (2009). Landforms and Landform Elements in Geomorphometry. En: T. Hengl y H. I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry- Concepts, Software, Applications* págs. 227-254. Elsevier
- Mandelbrot, B. (1967). How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 156:636-638.
- Moore, I.; Grayson, R. y Ladson, A. (1991): Digital Terrain Modelling: A review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrological Processes*, 5, 3-30.
- Moreno, J.; Romero, A.; Alonso, F. y Belmonte, F. (2010): Wind erosion on mining waste in Southeast Spain. *Land Degradation and Development* 21:196-209.
- Pike, R. (1988): The Geometric Signature: Quantifying landslide-terrain types from digital elevation models. *Mathematical Geology*, 20, 491-511.

- Pike, R. (2000): Geomorphometry – diversity in quantitative surface analysis. *Progress in Physical Geography*, 24(1):1-20.
- Quattrochi, D.A. y Goodchild, M.F. (Eds.) (1997). *Scale in Remote Sensing and GIS*. Lewis Publishers, Boca Raton.
- Shaw P.J. (2003): *Multivariate statistics for the Environmental Sciences*, Hodder-Arnold.
- Stewart, J. B.; Engman, E. T.; Feddes, R. A. y Kerr, Y. H. (1998). Scaling up in hydrology using remote sensing: summary of a Workshop. *International journal of remote sensing*, 19(1):181-194.
- Tou, J. Y González, R. (1974): *Pattern Recognition Principles*. Addison – Wesley. 377 págs.
- Walsh, S.J.; Butler, D.R. y Malanson, G.P. (1998). An overview of scale, pattern, process relationships in geomorphology: a remote sensing and GIS perspective. *Geomorphology*, 21(3-4):183-205
- Weaver, G. (1965) What is a landform? *The professional geographer* 17(1), 11-13.
- Wilson, J.P. y Gallant, J.C. (2000): Digital Terrain Analysis. En: Wilson, J.P. y Gallant, J.C. (eds), *Terrain Analysis, Principles and Applications*. Jhon Wiley & Sons, New York. 1-27
- Wood, J.D. (1996): *The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Models*. Tesis doctoral, Department of Geography. University of Leicester, Leicester, UK.
- Zhilin, L. (2008). Multi-Scale Digital Terrain Modelling and Analysis. En: Q. Zhou; B. Lees y G. Tang (Eds.), *Advances in Digital Terrain Analysis*, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, págs. 59-83. Springer Berlin Heidelberg.