

Análisis del relieve kárstico mediante el modelo digital de elevaciones. Aplicación a la Sierra de las Nieves (provincia de Málaga)

E. Pardo-Iguzquiza⁽¹⁾, J.J. Durán⁽¹⁾, J.A. Luque-Espinar⁽²⁾ y S. Martos-Rosillo⁽²⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Ríos Rosas 23, 28003 Madrid

e.pardo@igme.es; jj.duran@igme.es

(2) Oficina del IGME en Granada

ja.luque@igme.es; s.martos@igme.es

RESUMEN

La disponibilidad de modelos digitales de elevaciones (MDE) de alta resolución ha permitido un tratamiento cuantitativo del relieve impensable hace tan sólo un par de décadas. En particular, los algoritmos de eliminación de depresiones permiten la identificación y cuantificación de las mismas. Dichas depresiones son las geoformas más características del exokarst a escala métrica (simas, uvalas y poljes) además de ser importantes por su función geomorfológica e hidrogeológica entre otros. En este trabajo se ha extendido la metodología de la detección y delimitación de depresiones kársticas a la detección y delimitación de mogotes kársticos. La metodología es completamente general y se podría detectar otro tipo de depresiones como cráteres o lagos o de relieves positivos como conos volcánicos o drumlins, por ejemplo. Se muestra la potencialidad de la metodología en el cálculo de índices morfométricos ofreciendo unos ejemplos calculados en el acuífero kárstico de la Sierra de las Nieves en la provincia de Málaga en el Sur de España.

Palabras clave: dolina, MDE, mogote kárstico, modelo ráster, SIG, tamaño de celda.

Analysis of karst terrains using the digital elevation model. Application to the Sierra de las Nieves (province of Málaga)

ABSTRACT

The availability of high resolution digital elevation models (DEM) has allowed the quantitative analysis of reliefs that was unworkable a few decades ago. In karst terrains in particular, the numerical analysis of the DEM allows the identification and delineation of the most typical landforms of the exokarst, at a metric scale, in the form of negative reliefs, i.e. depressions such as dolinas, uvalas and poljes and positive reliefs such as hills; as well as the morphometric characteristics of these geoforms. In this paper we show an extension of the method for identifying and mapping hills and other positive karst geoforms. The potential of the method is illustrated with the Sierra de las Nieves karst aquifer in the province of Malaga in southern Spain. The method is general for detecting and delineating any kind of depressions such as craters and lakes.

Key words: cell size, DEM, doline, GIS, karst hill, raster.

ABRIDGED ENGLISH VERSION

Introduction and methods

The digital elevation model (DEM) can be considered as the modern topographic map with the main advantage that it is especially suitable for numerical analysis. Terrain analysis can be carried out by using DEMs and geographical information systems (Burrough, 1998). The DEMs have found many applications such as obtaining digital terrain models (slope, curvature, orientation, etc.) and surface hydrologic modelling

amongst others. In surface hydrology modelling, the DEMs are used to delineate drainage networks, watersheds and many parameters related with flow and runoff. It is in this hydrologic application where a great deal of research effort has been done for developing algorithms for pit removal. When these algorithms are applied to DEMs they produce pit-free DEMs and the delineation of the drainage network can be done without problems. In karst terrains however, one of the most distinctive features of the landform is the presence of depressions which size may cover several orders of magnitude. Amongst the medium to large scale (from a few meters to hundreds of meters) depressions there are the dolines, uvalas and poljes. The identification and delineation of those depressions is one of the many tasks of geomorphology mapping (Siart et al., 2009). The identification of karst depressions is also important for analyzing risks related with potholes, erosive models and so on to obtain neo-tectonic information and hydrogeology studies. It is important to have an automatic method of depression identification and delineation to complement field work in different circumstances, such as when the study area is very large, some zones are inaccessible or areas covered by vegetation. It is also important to delineate the karst hills as a positive relief (in contrast the depressions are negative reliefs). Both kinds of relief can be delineated using the same algorithm.

The idea proposed in this paper is to identify and delineate the depressions by using the Jenson and Domingue (1988) pit removal algorithm in order to have depression-free MDEs and the depressions are simply the result of applying an algebra-map operation of subtracting the depression-free DEM from the original DEM with depressions. The details of the algorithm may be found in Jenson and Domingue (1988). The algorithm has a spatial iterative character, using region growing operations and it uses 8-connectivity, where two cells are connected if they share one side or one corner (Fig. 1). The same algorithm is proposed in this paper for mapping karst hills. It is sufficient to apply the algorithm to the MDE with the sign reversed, that is, multiplied by minus one.

Results and Discussion

The method has been applied to the Sierra de las Nieves karst aquifer (Fig. 2) in the province of Malaga in southern Spain. The DEM shown in Figure 2 has a spatial resolution of 5 m, that is, the length of the side of the raster cell square is 5 m. The maps of mapped depressions are represented in Figure 3A. Each depression has a map of depths relative to the rim of the depression, as may be seen in Figure 3B, that shows a zoom of a part of Figure 3A. Figure 3 shows a strong structural control on the form of the dolines, which are developed mainly on the intersection of the fractures. In fact, the main directions of the geometry of the dolines are coincidental with the directions of the geologic faults (Pardo-Iguzquiza et al., 2013). Figures 4 and 5 show detailed maps of different dolines. In Figure 5 shows how some depressions appear in relation to the streams of the drainage network. These small depressions are considered artifacts of the streams and thus a threshold size of 10 cells (i.e. 250 m²) has been applied. Thus, only depressions with a size larger than the threshold are considered genuine karst depressions. After applying the size filter, the number of depressions remaining is 324 which occupy a surface of 1.1 km² and constitute 1% of the total surface of the aquifer. To have the mapped depression on a DEM implies that they are suitable for morphometric analysis. Many morphometric indexes are shown in Pardo-Iguzquiza et al., (2013) and here for completeness we show a few more. In particular the histogram of depression size is shown in Figure 6. The fact that more than half of the depressions have a surface smaller than 700 m² but very few have more than 2000 m² can be seen. Nevertheless, the size of the depressions follow a fractal law as may be seen in the log-log graph of Figure 7. Figure 7 shows a linear relation between the surface of the depressions versus the probability of the depression having a surface larger than that value. Arnold (2010) has shown the same fractal relationship in other karst areas but the line has a different slope. This may imply that the fractal relation could be used for comparing depression fields from different karst terrains.

Another result is that the important karst landscape of captured depressions (Fig. 8) cannot be detected by this procedure. With respect to the mapping of karst hills, Figure 9 shows the mapped hills in an area of Sierra de las Nieves and Figure 10 shows the map of depressions and hills together in the same figure. The strong structural control in the disposition of depressions and hills is clearly visible. The mapped depressions and hills can be included in the geomorphology map of the Sierra de las Nieves and is also a very interesting layer of information for hydrogeological modelling.

To sum up, it may be said that the automatic identification and delineation of karst depressions and hills is of great practical interest for geomorphology and hydrology, amongst other geosciences. Combining the use of DEMs with field data and traditional sources of information, such as images from maps and satellites, allows a more efficient mapping of depressions that, with the assistance of a geographic information system, can improve the capabilities of analysis of the Earth scientist.

Introducción

Tradicionalmente la cartografía geomorfológica se ha hecho mediante mapas topográficos convencionales, fotografías aéreas y trabajo de campo. Aunque estas herramientas seguirán siendo importantes en un futuro, la aparición del modelo digital de elevaciones (MDE) ha venido a incrementar las posibilidades del análisis del relieve, especialmente su análisis numérico o cuantitativo (Ford and Williams, 2000). En el MDE de tipo ráster, el terreno se puede considerar dividido exhaustivamente en una malla regular de celdas, generalmente cuadradas, para las que se conoce el valor de la altura (media) del terreno para cada una de ellas. La longitud del cuadrado de la celda se considera como la resolución del MDE. Por ejemplo, la resolución del MDE que se utilizará en el caso de estudio de este trabajo es de 5 m lo que significa que se conoce el valor medio de la altura para cada celda de 5m x 5m. La resolución del MDE limita los elementos del relieve que se pueden detectar. Por ejemplo, no se podrán detectar rasgos de un tamaño considerablemente menor a 5 m como son por ejemplo las acanaladuras (karren) de tamaño centimétrico o decimétrico. Por otra parte, consideraremos que los errores planimétrico y altimétrico son conformes a las técnicas de procesado que respetan los estándares de calidad cartográfica y que no afectan significativamente a los resultados obtenidos. De este modo el MDE puede ser tratado como la realidad vista con una determinada resolución. El procesado numérico de los MDE ha encontrado amplias aplicaciones en ciencias de la Tierra e ingeniería. Los MDE se usan extensivamente en análisis del terreno (Deng, 2007) aprovechando las posibilidades tecnológicas que ofrecen los sistemas de información geográfica (SIG), (Burrough, 1998). Además de la obtención de modelos digitales derivados del terreno (modelos de pendientes, modelos de orientaciones de ladera, modelos de curvatura del terreno, etc.), la principal aplicación de los MDEs ha sido en hidrología de superficie para la delimitación de redes de drenaje, cuencas vertientes y otros parámetros hidrológicos relacionados con el flujo y la esorrentía. Precisamente es en el uso de los MDEs en hidrología de superficie donde se ha dedicado un enorme esfuerzo en la investigación de algoritmos para eliminar las depresiones ("pit removal") que dificultan la delineación de la red de drenaje. Sin embargo, en los terrenos kársticos, que son el objetivo de interés de este trabajo, una de las morfologías más distintivas del paisaje kárstico superficial es la presencia de depresiones cerradas cuyas dimensiones abarcan varios órdenes de magnitud (Ford and Williams, 2000). Dichas depresiones van desde el orden

milimétrico y centimétrico de las kamenitzas al orden kilométrico de los poljes, pasando por los órdenes decamétrico y hectométrico de dolinas y uvalas. La identificación y cartografía de dichas depresiones es uno de los objetivos principales de la cartografía geomorfológica de terrenos kársticos (Siart et al., 2009). Además la cartografía de depresiones se ha realizado con el propósito de identificar riesgos asociados a simas (USGS, 2011), modelos erosivos (López-Vicente et al., 2009), para obtener información neotectónica (Faivre and Reiffsteck, 1999) y para estudios hidrogeológicos (Valois et al., 2011). La importancia de las depresiones en el karst, debido al papel que juegan en la recarga, en hidrogeología y en la evolución del propio sistema kárstico, contrasta con el tratamiento de las depresiones en las aplicaciones hidrológicas del MDE en terrenos no kársticos donde las depresiones constituyen un problema para la generación automática de redes de drenaje, como se ha dicho con anterioridad. Por este último motivo se ha dedicado un gran esfuerzo para generar MDEs libres de depresiones (Arnold, 2010). Sin embargo, como se ha dicho, en los terrenos kársticos la detección de depresiones y su adecuada delimitación geométrica es muy importante. La detección automática de depresiones es ventajosa sobre la delineación manual en muchas ocasiones como cuando se trata de estudiar áreas de gran extensión, cuando el área es inaccesible o para áreas cubiertas de vegetación. Además de las depresiones, esto es, relieves negativos, es interesante el cartografiar los relieves positivos en el karst, es decir los mogotes y escarpes kársticos, que son o vestigios de roca entre depresiones que todavía no han sido enrasados por la disolución hídrica o rasgos morfoestructurales debido a la consistencia de las rocas carbonatadas. Ambos tipos de relieves, negativos y positivos, pueden ser detectados por el mismo algoritmo de detección de depresiones tal y como se describe en el siguiente apartado.

Metodología

La idea que aquí se propone para la detección y delineación de depresiones kársticas es simple pero muy eficiente. Se trata de utilizar los algoritmos existentes de generación de MDE sin depresiones ("pit removal") y obtener el mapa de depresiones por una operación de álgebra de mapas simple como es calcular la diferencia entre el MDE libre de depresiones y el MDE original. Existen muchos algoritmos capaces de generar MDEs libres de depresiones. En este sentido, el trabajo de Jenson y Domingue (1988) ha propuesto el procedimiento fundamental, implementado en

muchos programas informáticos de SIG y en el que se han basado gran parte de las variantes posteriores más modernas (Grimaldi et al., 2004; Grimaldi et al., 2007). Jenson and Domingue (1988), proporcionan un algoritmo básico de relleno de depresiones que se puede resumir en los siguientes pasos:

- 1) Relleno de depresiones constituidas por una única celda.
- 2) Calcular direcciones de flujo para cada celda.
- 3) Delinear las cuencas vertientes de flujo indefinido y definir una tabla de puntos de drenaje.
- 4) Encontrar el valor umbral para las cuencas vertientes de flujo indefinido e incrementar la elevación de todas las celdas de dichas cuencas que tienen una altitud inferior al valor umbral.

Dos características adicionales del algoritmo son

- 1) Su carácter espacial iterativo, esto es, utiliza procedimientos de crecimiento de regiones con lo que el algoritmo va más allá de la operación de vecindad simple.
- 2) La adyacencia que utiliza es la llamada conectividad-8 donde dos celdas se consideran adyacentes si comparten un lado o una esquina (Figura 1).

Por consiguiente, las depresiones de una celda calculadas con conectividad-8 son aquellas celdas cuya altitud es menor que las ocho celdas vecinas (las cuatro

que comparten lado y las cuatro que comparten esquina). Todo el procedimiento está descrito en detalle en Jenson and Domingue (1988).

El mismo algoritmo se propone aquí por vez primera para la detección de mogotes kársticos (en el caso del karst) o geoformas de relieve positivo en general. Para ello es suficiente con utilizar el simple artificio de cambiar de signo el MDE y los mogotes pasarán a ser depresiones con lo que se puede aplicar el algoritmo anterior de detección de depresiones.

Resultados de la aplicación a la Sierra de las Nieves

El procedimiento descrito en la metodología se ha aplicado al MDE de la Sierra de las Nieves (Figura 2) en la provincia de Málaga, en el sur de España. En la figura 2 se muestra los límites del acuífero carbonatado que ha sido estudiado desde el punto de vista hidrogeológico por Liñan-Baena (2005), desde el punto de vista geomorfológico por Delannoy and Guendon (1986) y desde el punto de vista geológico por Martín-Algarra (1987). El MDE de la figura 2 tiene una resolución de 5 m y lo ha elaborado el Instituto Geográfico Nacional (IGN) de España. Este MDE de 5 m se ha obtenido por restitución fotogramétrica a partir de fotografías aéreas del Plan Nacional de Ortofotografía

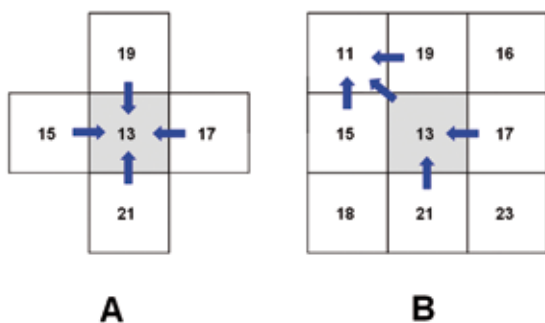


Figura 1. A. Conectividad-4 y una depresión unicelda de acuerdo a este tipo de conectividad. **B:** Conectividad-8; de acuerdo a este tipo de conectividad la celda central ya no es una depresión unicelda ya que la celda de la esquina superior izquierda tiene una altitud menor (11 m) que la celda central (13 m) y por consiguiente el flujo que llega a la celda central se desaloja por la esquina superior izquierda.

Figure 1. A. 4-connectivity and a single cell depression according to this kind of connectivity. **B:** 8-connectivity; according to this kind of connectivity the cell in the center is not a depression because the cell of the upper left corner has smaller altitude (11 m) than the central cell (13 m) and thus it is the outlet of the flow that arrives to the central cell.

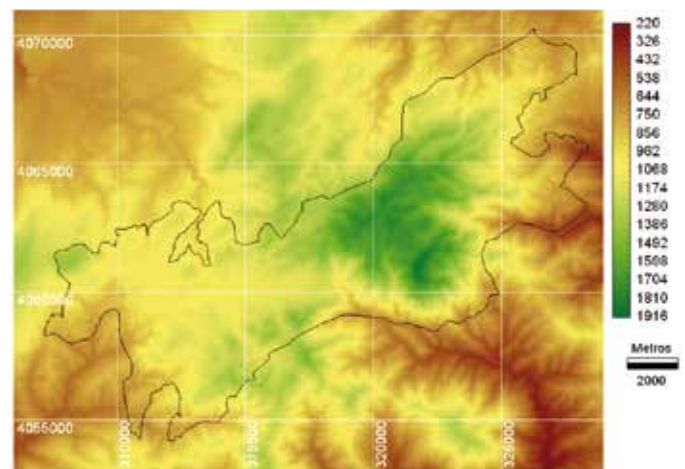


Figure 2. Modelo digital de elevaciones (mapa de altitudes topográficas con respecto al nivel medio del mar) con un tamaño de celda cuadrada de 5 m de lado. La línea negra representa el límite del acuífero carbonatado de la Sierra de las Nieves.

Figure 2. Digital elevations model (map of altitudes with respect to mean sea level) with a cell size of 5 m of length on a side. The black line represents the border of the karst aquifer of Sierra de las Nieves.

Aérea – PNOA. El IGN es el responsable de mantener el sistema geodésico de España utilizando los estándares de calidad cartográfica más elevados y por consiguiente el MDE disponible se considera como el producto final sobre el cual operar sin necesidad de ningún tratamiento de corrección de errores. Al aplicar el procedimiento explicado en la metodología al MDE de la figura 2 se obtiene el mapa de depresiones mostrado en la figura 3A. Cada depresión tiene información de su profundidad relativa con respecto a su borde tal y como se muestra en la figura 3B para la parte oeste del acuífero. En la figura 3 se observan los campos o grupos de dolinas y uvalas así como el fuerte control estructural de las depresiones que suelen desarrollarse a favor de la intersección de fracturas. En efecto, puede mostrarse como las direcciones de la geometría elongada de las depresiones es plenamente coincidente con las direcciones de las fallas geológicas de escala cartográfica tal y como se muestra en Pardo-Iguzquiza et al. (2013). La figura 4 muestra una ampliación de las dos dolinas centrales (dolina del Águila y polje del Navasillo en la toponimia local) de la figura 3 para poder observar el gran detalle de delimitación y batimétrico que se obtiene mediante la metodología presentada. Otro detalle de dos dolinas (dolinas de Conejeras y de los Bloques) se muestra en la figura 5; en este caso para notar las pequeñas depresiones que se detectan alineadas según el curso de cauces de drenaje y originadas como artefactos del MDE debido al encajamiento del cauce. Es por ello

que para eliminar dichas depresiones espurias se ha establecido un valor umbral de 10 píxeles (esto es 250 m²) de tal manera que no se consideran las depresiones con una superficie menor a dicho valor umbral. Este valor umbral se ha establecido por ensayo y error para eliminar las depresiones espurias que aparecen a lo largo de cauces y de modo que se minimice el número de depresiones verdaderas eliminadas. De todos modos por trabajo de campo se ha podido determinar que las depresiones muy pequeñas no son abundantes y por la aplicación del anterior filtro no se alteran los resultados del estudio morfométrico. De este modo se han identificado, después de eliminar dichas depresiones espurias, 324 depresiones que se han mostrado en la figura 3A en un mapa binario con valores 1 para depresión y 0 para no depresión. La superficie total ocupada por depresiones es de 1.1 km², lo que supone el 1% de la superficie el acuífero.

Una particularidad de las depresiones detectadas y delineadas en este entorno SIG es su adecuación para realizar el análisis morfométrico. Los parámetros morfométricos referentes a la relación del tamaño de las depresiones con respecto a la altitud así como a la orientación de las depresiones se muestran en Pardo-Iguzquiza et al. (2013). Aquí presentamos, por completitud, nuevos resultados en el estudio morfométrico de las depresiones de la Sierra de las Nieves. En particular calculamos el histograma de distribución de la superficie de las depresiones así como el carácter

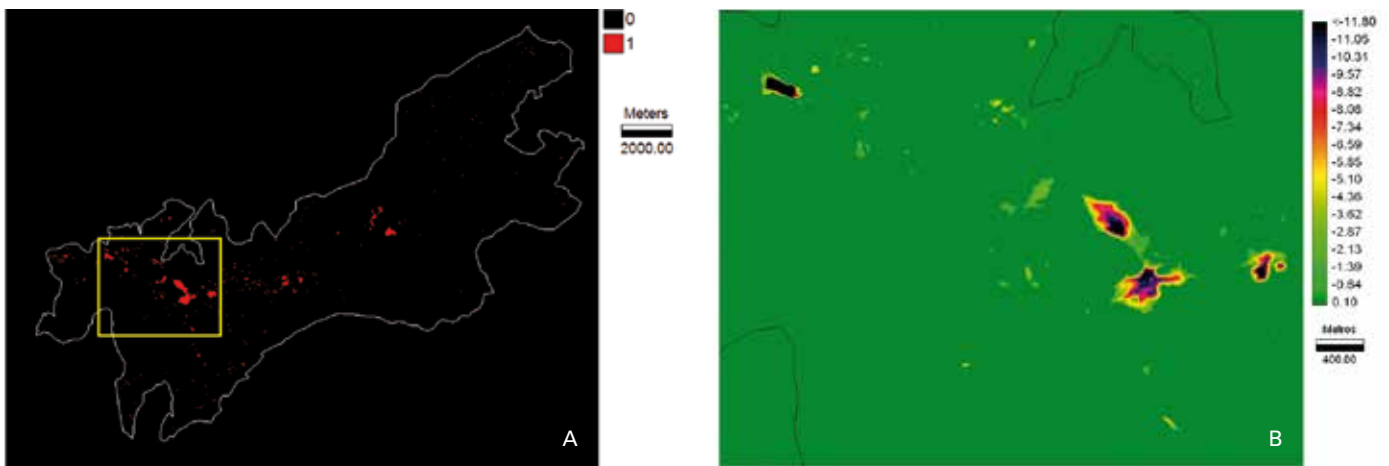


Figura 3. A: Depresiones detectadas y delimitadas en Sierra de las Nieves. Se han detectado 324 dolinas con una superficie mayor a 250 metros cuadrados. La línea blanca representa el borde del acuífero. B: Detalle de las dolinas (con profundidad con respecto al borde de cada dolina) identificadas en la parte oeste del acuífero (cuadrado amarillo en A). La línea negra representa el límite del acuífero carbonatado. La depresión de la esquina superior izquierda corresponde a una cantera.

Figure 3. A: Detected and delimited depressions in the Sierra de las Nieves. 324 dolines with a surface larger than 250 square meters each have been detected. The white line represents the border of the aquifer. B: Detail of the dolines (depth with respect to the rim of the doline) identified in the west part of the aquifer (yellow square in A). The black line represents the limit of the carbonate aquifer. The depression of the upper left corner corresponds to a quarry.

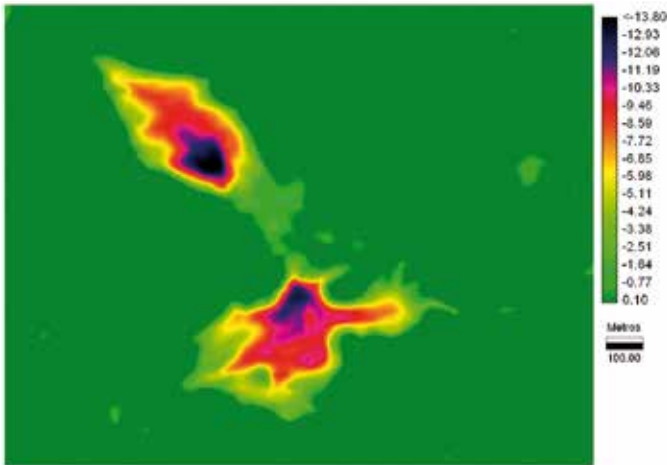


Figura 4. Detalle de uvalas formada por coalescencia de dolinas que se han desarrollado con un claro control estructural. Puede observarse como las dolinas presentan elongaciones para direcciones coincidentes con las direcciones principales de las fallas geológicas en este sector.

Figure 4. Detail of uvalas formed by coalescence of dolines and with a clear structural control. It may be seen how the dolines present elongations that are coincidental with the geological faults in this sector.

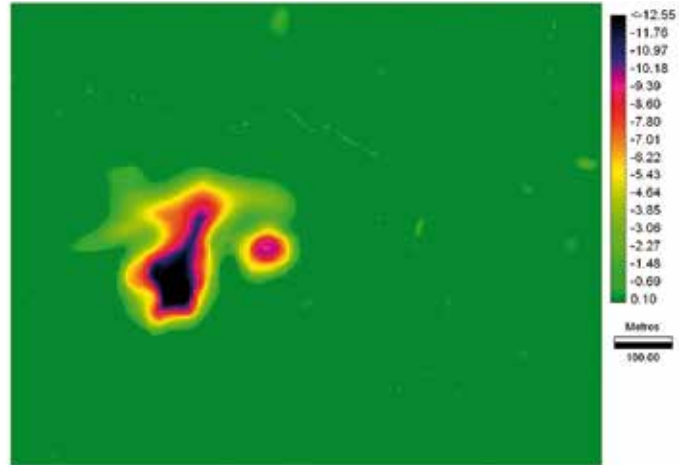


Figura 5. Detalle de las dolinas de Conejeras y de los Bloques así como depresiones espurias de poca superficie que aparecen alineadas a lo largo de la red de drenaje.

Figure 5. Detail of dolines of Conejeras and Bloques as well as spurious depressions of small surface that occur along the drainage network.

fractal de las mismas. El histograma del área de las 324 dolinas puede verse en la figura 6 donde también se han representado los estadísticos básicos del tamaño (superficie) de las depresiones. Se observa la gran asimetría del histograma de la superficie de dolinas con muchas dolinas de tamaño medio (más de la mitad de las dolinas tienen un área menor a 700 m²) y

muy pocas dolinas tienen un área mayor a 2000 m². Sin embargo la distribución de tamaños de dolina sigue una relación fractal como se puede ver al representar en un gráfico log-log (Figura 7) la relación entre la superficie de una dolina y la probabilidad de superar dicha superficie, esto es, el número de dolinas cuya superficie es mayor a dicho valor. Esta misma

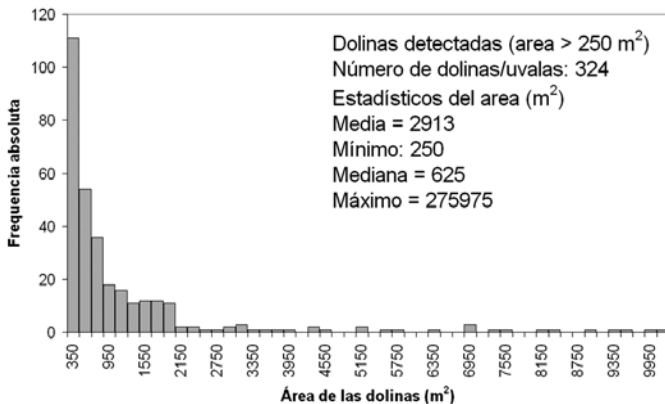


Figura 6. Histograma de la superficie de las 324 dolinas detectadas y delineadas. Se puede observar la gran asimetría del histograma.

Figure 6. Histogram of the surface of the 324 dolines. It can be noted the high asymmetry of the histogram.

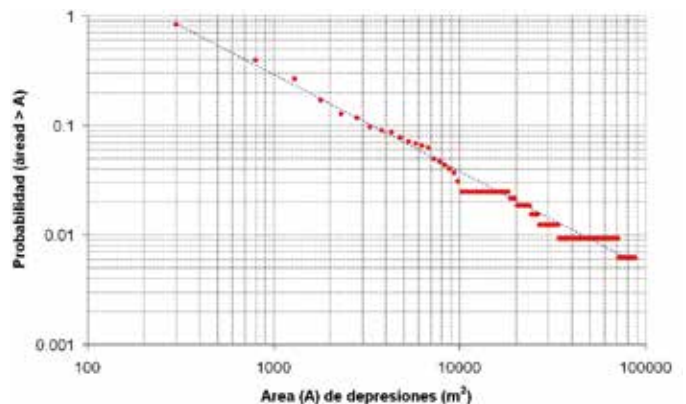


Figura 7. Representación en escala logarítmica del área frente a la probabilidad de que las depresiones de la Sierra de las Nieves superen dicha área. La relación lineal en escala logarítmica implica que esta relación de distribución se ajusta bien a una ley potencial, esto es, una ley fractal.

Figure 7. Representation in logarithmic scale of the area versus the probability that the depressions in the Sierra de las Nieves have a larger area. The lineal relationship in the log plot implies that the relation fits a power laws and thus a fractal law.

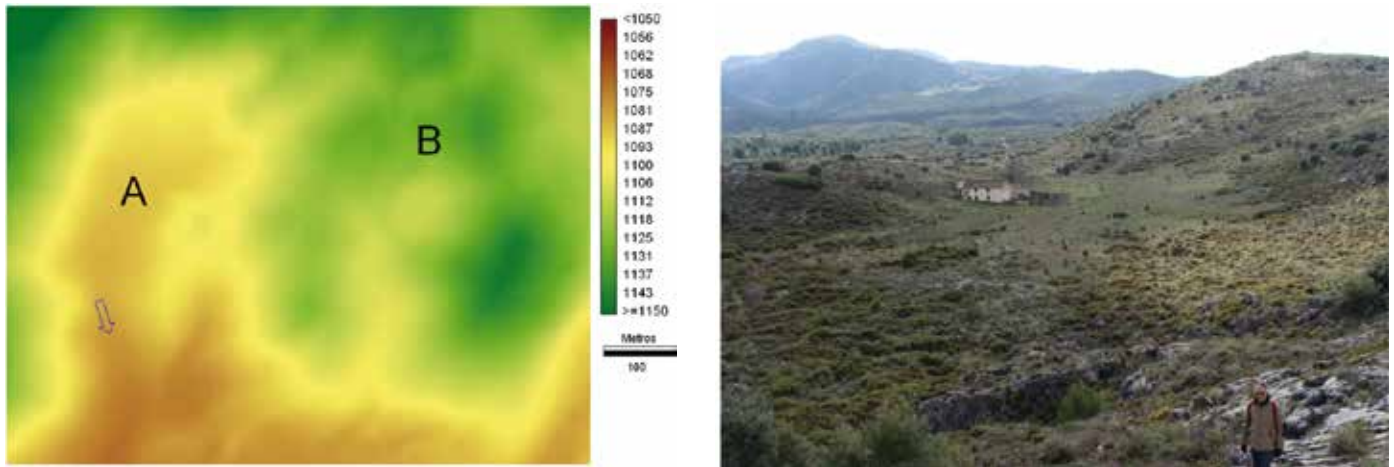


Figura 8. Izquierda: Dolina capturada del Cortijo de Rajete (A) indicando la dirección del cauce que ha hecho la captura y B: dolina a punto de estar capturada. Derecha: fotografía de la dolina A desde la parte norte.
Figure 8. Left: Captured doline in the Cortijo de Rajete (A) with indication of the direction of the stream that has captured the doline. Right: photograph the captured doline from its North part.

relación ha sido presentada, para un área de estudio diferente, por Arnold (2010) aunque las pendientes de las rectas son distintas lo que puede indicar que este parámetro podría servir para caracterizar campos de dolinas de terrenos kársticos diferentes. Por otra parte las dolinas capturadas ya no forman depresiones cerradas y por consiguiente no pueden ser detectadas por el procedimiento descrito. Así en la Figura 8 se muestra un detalle del área del Cortijo del Rajete, situado en una antigua dolina capturada por la red fluvial, que no ha sido detectada por el procedimiento automático. Sin embargo, el algoritmo sí ha permitido detectar otras dolinas del entorno mucho más sutiles de poca profundidad (menos de un metro y medio).

En cuanto a la cartografía de mogotes kársticos, se sigue el mismo procedimiento que para las depresiones pero aplicando la metodología propuesta al MDE cambiado de signo de modo que los mogotes pasen a ser depresiones. El resultado se muestra en la figura 9 donde se han representado los mogotes, y otros relieves kársticos de mayor envergadura, y la figura 10 donde se representan conjuntamente depresiones negativas (dolinas y uvalas) y positivas (mogotes). Tanto en figura 9 como en figura 10 se observa la alineación de depresiones y mogotes a lo largos de pasillos con un marcado control estructural en relación a las fracturas de escala cartográfica que en esta zona presentan las típicas direcciones de las fracturas cartografiadas (Pardo-Iguzquiza et al., 2013).

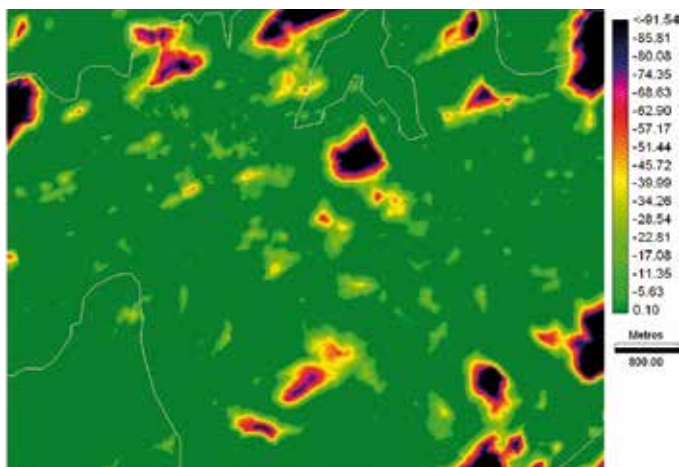
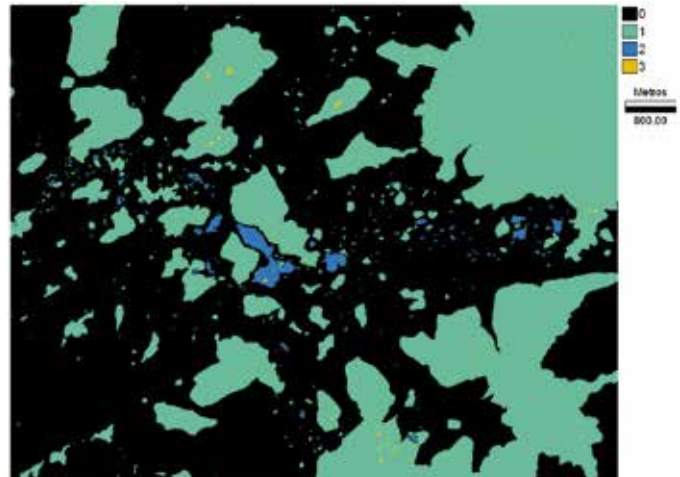


Figura 9. Mogotes kársticos identificados por el procedimiento expuesto en la metodología en la parte oeste del acuífero. La línea blanca representa el límite del acuífero carbonatado.
Figure 9. Karst hills identified in the west part of the aquifer by the procedure explained in the methodology. The white line represents the border of the aquifer.

Figura 10. Mogotes (1) y depresiones (2) en el mismo mapa. (3) representa o bien mogotes dentro de las depresiones (color naranja dentro del azul) o depresiones dentro del macizo kárstico (color naranja dentro del verde).

Figure 10. Karst hills (1) and depressions (2) in the same map. (3) represents or a hill inside a depression (orange color inside the blue color) or depressions inside a karst massif (orange inside the green color).



La cartografía de las dolinas y mogotes kársticos de la Sierra de las Nieves se puede incluir en la cartografía geomorfológica y además es una capa de información muy útil en el modelado matemático de la hidrogeología de dicha área.

Conclusiones

La detección automática de depresiones resulta de gran interés como una herramienta eficiente y rápida para la cartografía geomorfológica de ciertos elementos característicos de los terrenos kársticos, como son las depresiones kársticas. En este sentido el método propuesto permite delinear y delimitar dolinas, uvalas y poljes. Adicionalmente en este trabajo se presenta una extensión del método de cartografía de depresiones (relieves negativos) para la cartografía de mogotes kársticos (relieves positivos). Mediante su uso combinado con otras técnicas complementarias tradicionales, como el análisis del mapa topográfico, la fotografía aérea o la fotografía de satélite y con el imprescindible apoyo del trabajo de campo, la detección automática permite poner de manifiesto la presencia de depresiones que podrían pasar desapercibidas, bien por la inaccesibilidad de ciertas áreas, por la cubierta vegetal, por la escasa impronta morfológica o por las grandes dimensiones del área de estudio. Los falsos positivos son sencillos de determinar. Por lo general, corresponden a depresiones antrópicas fácilmente identificables o están relacionadas con encajamientos fluviales que para el caso de estudio presentado se han eliminado tomando un valor umbral para el área de las depresiones detectadas. En cualquier caso, una vez hecho el censo de depresiones (positivas y/o negativas) están listas para su

análisis morfométrico como se ha ilustrado para la distribución de la superficie de dolinas a partir de su histograma y de su gráfico log-log para determinar su distribución fractal. Se pueden calcular muchos más índices geomorfométricos y en cualquier caso las depresiones y mogotes delimitados pueden integrarse en el mapa geomorfológico.

Agradecimientos

Trabajo financiado por el proyecto de investigación CGL2010-15498, KARSTINV, del Ministerio de Economía y Competitividad. Quisiéramos agradecer a los revisores por sus comentarios constructivos que han servido para mejorar la versión final de este trabajo.

Referencias

- Arnold, N. 2010. A new approach for dealing with depressions in digital elevation models when calculating flow accumulation values. *Progress in Physical Geography*, 34 (6), 781-809.
- Burrough, P.A. & R. A. McDonnell. 1998: *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, pp. 333, Oxford (UK).
- Delannoy, J.J. y Guendon, J.L. 1986. *La Sierra de las Nieves (Málaga). La Sima G.E.S.M. Etude géomorphologique et spéléologique*. Karstologia Mémoires, 1, 71-85.
- Deng, Y. 2007. New trends in digital terrain analysis: landform definition, representation, and classification. *Progress in Physical Geography*, 31 (4), 405-419.
- Ford, D. and Williams, P. 2007. *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley and Sons, Chicester (UK), 562 p.
- Favre, S. and Reiffsteck, P. 1999. Spatial distribution of dolines as an indicator of recent deformations on the

- Velebit mountain range – Croatia. *Geomorphologie: relief, precessus, environment*, 5 (2), 129-142.
- Grimaldi, S., Teles, V., Bras, V.L. 2004. Sensitivity of a physically based method for terrain interpolation to initial conditions and its conditioning on stream location. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 587-597.
- Grimaldi, S., Nardi, F., Di Benedetto, F., Istanbuluoglu, E. y Bras, R. L. 2007. A physically-based method for removing pits in digital elevation models. *Advances in Water Resources*, 30 (10), 2151-2158.
- Jenson, S.K. y Domingue, J. O. 1988. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54 (11), 1593-1600.
- Liñan-Baena, C. 2005. *Hidrogeología de acuíferos carbonatados en la unidad Yunquera-Nieves (Málaga)*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas nº 16. Madrid, 322 p.
- López-Vicente, M., Navas, A. y Machín, J. 2009. Geomorphic mapping in endorheic catchments in the Spanish Pyrenees: An integrated GIS analysis of karstic features. *Geomorphology*, 111 (1-2), 38-47
- Martín-Algarra, A. 1987. *Evolución geológica alpina del contacto entre las Zonas Internas y las Zonas Externas de la Cordillera Bética*. PhD thesis, University of Granada.
- Pardo-Igúzquiza, E., Durán J.J. and Dowd P.A. 2013. Automatic detection and delineation of karst terrain depressions and its application in geomorphological mapping and morphometric analysis. *Acta Carsologica*, 42/1, 17-24.
- USGS (United States Geological Survey) 2011. *Using GIS Techniques to Identify and Delineate Karst Features in Tennessee. Geohazards Impacting Transportation in the Appalachian Region*. 11th Annual Technical Forum, Chattanooga, TN.
- Siart, C., Bubenzer, O. y Eitel, B. 2009. Combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: A multi-component case study on Mediterranean karst in Central Crete. *Geomorphology*, 112 (1-2), 106-121.
- Valois, R., Camerlynck C., Dhemaied, A., Guerin R., Hovhannissian, G., Plagnes V., Rejiba, F. and Robain, H., 2011. Assessment of doline geometry using geophysics on the Quercy plateau karst (South France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 36, 1183-1192.

Recibido: febrero 2014

Revisado: mayo 2014

Aceptado: junio 2014

Publicado: septiembre 2014

