



IDENTIFICACIÓN AUTOMÁTICA DE CÁRCAVAS A PARTIR DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN Y OTRAS FUENTES DE DATOS

Paula González¹, Adolfo Peña^{1*}, José Javier Guerrero² y Antonio Hayas³

¹Depto. de Ingeniería Rural, Construcciones Civiles y proyectos de Ingeniería. ETSIAM. Universidad de Córdoba, Edif. Da Vinci, Ctra. Madrid km 396, 14071 Córdoba. **e-mail:** ir1peala@uco.es, z82gogap@uco.es, web: <https://www.uco.es/investiga/grupos/agr-127/>

²Depto. de Agronomía. ETSIAM. Universidad de Córdoba, Edif. Da Vinci, Ctra. Madrid km 396, 14071 Córdoba. **e-mail:** g62gucrj@uco.es, web: <https://www.uco.es/investiga/grupos/agr-127/>

³ Instituto de Agricultura Sostenible. IAS-CSIC. **e-mail:** antonio.hayas@gmail.com, web:

<https://www.ias.csic.es/investigacion/departamentos/agronomia/manejo-y-conservacion-del-agua-y-el-suelo/>

RESUMEN. Los fenómenos de precipitación de carácter torrencial tienen lugar cada vez con mayor frecuencia. Si se une la intensificación de la agricultura en zonas como la campiña sur de España, se obtiene un aumento de la erosión y la degradación del suelo, potenciando la formación de regueros y cárcavas. Los métodos actuales para detectar cárcavas comprenden la aplicación de diferentes técnicas, como la fotointerpretación directa de ortofotos o herramientas basadas en Aprendizaje Automático que carecen de fundamento físico y son ajenas a los procesos de formación de las cárcavas. Los modelos de detección de cárcavas más extendidos y aceptados, por su fundamentación física y empírica, son los basados en umbrales relacionados con la topografía del terreno, partiendo de Modelos Digitales de Elevación, que cumplen con la necesaria conectividad de la red hidrográfica con las ventajas que supone que, en este trabajo, como novedad, se aplica a nivel de parcela agrícola.

ABSTRACT. Torrential precipitation phenomena occur with increasing frequency. If the intensification of agriculture in areas such as the southern Spanish countryside is added, an increase in erosion and soil degradation is obtained, promoting the formation of rills and gullies. The current methods to detect gullies will include the application of different techniques, such as direct photointerpretation of orthophotos or tools based on Machine Learning that lack physical foundation and are alienated to gully formation processes. The most widespread and accepted gully detection models, due to their physical and empirical fundamentals, are those based on thresholds related to the topography of the terrain, based on Digital Elevation Models, which meet the necessary connectivity of the hydrographic network. It in this work, as a novelty, it is applied at the farm scale.

1.- Introducción

El suelo es el recurso natural sobre el que se sustenta la vida. Sin embargo, en el marco temporal que ocupa la vida humana, este es un recurso no renovable, lo que se debe a su lenta formación a partir de las rocas y minerales que constituyen su material parental, frente a los procesos degradativos que puede sufrir a consecuencia de fenómenos naturales y de la actividad antropogénica.

No obstante, en los últimos años se ha determinado que entre el 60 y el 70% de los suelos en Europa no están sanos (EC, 2021), por su degradación a consecuencia de la intensificación de la actividad agrícola y de procesos de erosión, desertificación, salinización y sellado. Por ello es preciso estimular la formación del suelo, y eliminar, o, al menos, reducir los procesos de pérdida, o de deterioro de su calidad, entre ellos, la erosión.

La pérdida de suelo por la erosión en cárcavas, que es el tipo de erosión más importante (Vanmaercke et al. 2021), no sólo supone la merma de la capacidad de producir alimentos y otros servicios, como la diversidad de la vida en el planeta, sino también la rápida dispersión de los sedimentos y de los productos agroquímicos adsorbidos en ellos. Por esto constituye una grave amenaza agraria y ambiental en todo el planeta. La erosión, sin embargo, es uno de los procesos del ciclo geológico, erosión, transporte y sedimentación, consecuentemente, un proceso natural. El problema ocurre cuando este proceso se acelera por la intervención humana, como han estimado, entre otros, Wilkinson y McElroy (2007), para quienes la intensidad media de denudación del planeta ascendió desde los 16 hasta unos 62 m por millón de años desde la aparición del hombre.

Una cárcava se origina cuando el esfuerzo cortante de una corriente superficial de agua, como la escorrentía generada por el exceso del agua de lluvia que no se infiltra, vence a la resistencia de las partículas del suelo, o agregados, a ser desplazadas por aquella (e.g.



Dey 2014, Cap. 4). Si la corriente arrastra las partículas dejando una depresión alargada, surco o reguero, esta forma lineal puede crecer tanto en longitud como en profundidad por socavación del cauce, dejando unos bordes o paredes inestables que, a su vez, pueden deslizarse acumulando partículas sólidas en el cauce, y ensanchándolo.

Aunque el estudio de las cárcavas ha despertado mucho interés entre los investigadores (e.g. Castillo y Gómez 2016, Vanmaercke et al. 2021), hay muchos aspectos poco conocidos que necesitan un estudio más profundo para poder controlarlas.

La caracterización de las cárcavas incluye la geometría de su ramificación superficial. La introducción de nuevas técnicas como la de los vehículos aéreos no tripulados con las siglas inglesas UAV, o, más sencillamente drones, aviones e incluso satélites dotados de varios sensores, permite un trazado más preciso de estas redes (e.g. di Stefano et al. 2019). Con la ayuda de cartografías sucesivas se puede interpretar la evolución de la red al modo iniciado por Howard (1997). Es posible que los principios de uso óptimo de la energía aplicado a la evolución de redes fluviales por Rodríguez-Iturbe et al. (1992) puedan servir para comprenderla mejor. Otro aspecto de importancia es la geometría de la sección transversal del canal, con las formas típicas de U o V mencionadas por Bull y Kirkby (1997).

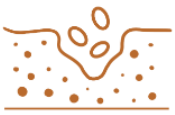
Los métodos que se utilizan en la actualidad para la detección de cárcavas comprenden técnicas que van desde la fotointerpretación directa a través de ortofotos (Martínez-Casasnovas, 2003; Frankl et al., 2011; Hayas et al., 2017b), la modelización del terreno mediante técnicas de *Structure from Motion* a partir de imágenes obtenidas mediante UAV (Kaiser et al., 2014; Koci et al., 2017), la delimitación directa sobre Modelos Digitales de Elevación (MDE) obtenidos a partir de datos LiDAR (*Light Detection And Ranging*) (Perroy et al., 2010), el Aprendizaje Automático (Conoscenti et al., 2018; Arabameri et al., 2018, 2019; Roy et al., 2020) o la aplicación de modelos empíricos con base física (Montgomery and Dietrich, 1994; Vandaele et al., 1996; Vandekerckhove et al., 2000; Daggupati et al., 2011; Torri y Poesen, 2014; Hayas et al., 2017a). Comparados con otras, las técnicas de fotointerpretación de cárcavas tienen el inconveniente de no poderse automatizar y estar sujetas a la subjetividad del fotointerpretador. Por su parte, las herramientas desarrolladas mediante Aprendizaje Automático funcionan como cajas negras sin fundamento físico, ajenas a los procesos que determinan la formación de las cárcavas, ello determina que en muchos casos los resultados de dichos modelos no cumplan con la necesaria conectividad de la red hidrográfica. Además, en la mayor parte de los casos la validez de los modelos desarrollados mediante Aprendizaje Automático se limita a las zonas de entrenamiento del modelo. Los modelos de detección de

cárcavas más extendidos y aceptados, por su fundamentación física y empírica, son los basados en umbrales relacionados con la topografía del terreno, bien sea a través de umbrales del área vertiente acumulada a la cárcava, umbrales de pendiente o una combinación de ambos (Vanmaercke et al., 2021). Entre estos últimos destacan el *Compound Topographic Inex* (CTI) (Thorne et al., 1986) y el *Topographic Threshold* (TT) propuesto por (Patton and Schumm, 1975). Ambos índices se formulan a través de la combinación de la pendiente local y el área de contribución a un punto dado del terreno, aunque los resultados de dichos modelos presentan notables diferencias. Mientras que los resultados del TT conservan la conectividad de la red, los obtenidos mediante el CTI no tienen por qué mantener la conectividad de la red. Sin embargo, la conectividad de la red resulta fundamental para la identificación de los tramos de una red de cárcavas y la subsecuente formulación de las propuestas correctoras más adecuadas.

La extracción automática de propiedades asociadas a subcuencas y a la red de desagüe a partir de datos digitales de elevación representa un procedimiento rápido y eficiente para parametrizar una cuenca. La obtención de atributos asociados a una cuenca, no solo primarios como la longitud de canales, sino de otros más complejos derivados de aquellos como la densidad de avenamiento, ha merecido la atención de numerosos autores, constituyendo el trabajo de Jenson y Domingue (1988) el punto de partida del desarrollo alcanzado en la actualidad en el análisis de los Modelos Digitales de Elevación (MDE) y la obtención automática de información geomorfológica de la cuenca. El estudio a nivel de cuenca, que es el habitual, permite tomar decisiones en el ámbito de la planificación hidrológica, con múltiples aplicaciones como mostraron Moore y col., 1992, y como por ejemplo aplicaron con éxito Peña et al. (1999) para obtener automáticamente el Hidrograma Unitario Geomorfológico de una cuenca a partir de su MDE.

Estos mismos principios pueden ser aplicados a la determinación de la "red de cárcavas" de una cuenca, como han mostrado recientemente Liu y col. (2022), Omran et al. (2022), Amatulli et al. (2022) y Jiao et al. (2022) entre otros, que desarrollan nuevos procedimientos para el análisis automático de cárcavas. Utilizando los mismos principios, también se puede obtener la red de cárcavas de una parcela o de una zona particular de estudio, orientado a los problemas de un agricultor o de los que se generan entre varios de ellos que comparten una misma cárcava.

Este trabajo se centra en la determinación automática de las cárcavas existentes en una determinada parcela agrícola a partir de productos cartográficos digitales de acceso abierto. La dificultad añadida sobre las



soluciones descritas anteriormente es doble. Por una parte, la escala de trabajo es mayor que la utilizada en el estudio de cuencas hidrográficas, por lo que se requiere utilizar MDE de alta resolución, como los proporcionados por el PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) que genera nube de puntos 3D procedentes de vuelos LiDAR y permiten generar el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) en formato ráster con resolución espacial 2x2 m. Por otra parte, es necesario analizar la parcela con detalle ya que en ella pueden existir cárcavas pertenecientes a diferentes subcuencas que vierten hacia diferentes extremos de la parcela. El reto es realizar el análisis sin acudir previamente al estudio completo de las cuencas de las que forman parte las cárcavas en la parcela de estudio, lo que reducirá el tiempo de cálculo y evitará la necesidad de disponer de grandes volúmenes de almacenamiento para alojar redes completas a escala de cuenca hidrográfica.

2.- Materiales y métodos

2.1.- Fuentes de datos y tratamiento de los productos digitales

Los datos de elevación utilizados para la identificación automática de cárcavas proceden de Modelos Digitales de Elevación (MDE) con distintas resoluciones. Concretamente se han utilizado aquellos con un tamaño de píxel de 5x5 m y de 2x2 m que se encuentran disponibles en el Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) al que se puede acceder siguiendo la url:

<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/buscadorCatalogo.do?codFamilia=LIDAR>.

Para su descarga, es necesario conocer la hoja u hojas del MDE donde se encuentra la parcela o conjunto de parcelas catastrales objeto de estudio, así como la superficie del terreno que vierte sobre la misma y de la que se quiere identificar su red de cárcavas. Por ello, en primer lugar, se procede a la descarga de los datos espaciales de dichas parcelas, que se encuentran disponibles en formato *.gml* desde el visor cartográfico de la Sede Electrónica del Catastro.

Una vez descargados los archivos vectoriales de las parcelas en formato *.gml*, estos se transforman en un solo polígono y se guardan en formato *.shp* mediante el software QGIS.

A continuación, desde el Centro de Descargas del IGN, se realiza una búsqueda por archivo, proporcionando la parcela en formato *.shp* y descargando las hojas del MDT02 y/o del MDT05 (MDE con paso de malla de 2 y 5 m, respectivamente) que cubren la misma, así como la superficie circundante donde se localiza el área de estudio.

Los MDE con un paso de malla de 2 m se encuentran disponibles como producto MDT02 en formato *.asc* y son descargables por hojas del MTN25. Este modelo se ha obtenido por interpolación a partir de la clase terreno de los vuelos LIDAR de la segunda cobertura del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), desarrollada desde 2015, por lo que la cobertura nacional aún se encuentra incompleta.

Al igual que el MDE con paso de malla de 2 m, este MDE con un tamaño de píxel de 5 m también se encuentra disponible como producto MDT05 en formato *.asc* y es descargable por hojas del MTN50. Sin embargo, este se obtuvo por interpolación a partir de la clase terreno de vuelos LIDAR de la primera cobertura del PNOA, por lo que la cobertura nacional se encuentra completa para su descarga.

Los datos de elevación deben estar corregidos, es decir, en él no deben existir zonas deprimidas o de remanso, conocidas como sumideros, y que gráficamente son celdas del MDE que tienen una cota inferior a las 8 celdas que le rodean. La necesidad de corregir estas zonas se debe a la continuidad que debe presentar el flujo en todo el modelo.

La corrección del MDE descargado del IGN se realiza mediante el software de código abierto QGIS. Para ello, la capa ráster que contiene los datos de elevación se corrige mediante el Proceso de SAGA denominado Fill Sinks (Wang & Liu, 2006), del que se obtiene un MDE corregido sin sumideros, que se almacena en formato *.tif*.

La herramienta diseñada para la identificación automática de cárcavas a partir de MDE corregidos, se compone de un programa de código en lenguaje Python. El lenguaje de programación Python (<https://www.python.org>) ha sido utilizado para el desarrollo de esta herramienta ya que se trata de un lenguaje de alto nivel ampliamente utilizado en diversas áreas de la ciencia y la investigación. Además, este lenguaje permite el uso de múltiples tipos de variables que facilitan el manejo de grandes volúmenes de datos. Una de las principales ventajas reside en que softwares como QGIS, diseñados para el manejo y el procesamiento de datos espaciales, utilizan dicho lenguaje, por lo que una gran cantidad de programas para el manejo de información geográfica se encuentran escritos en Python.

Otra de las ventajas esenciales es la existencia de una gran cantidad de librerías específicas desarrolladas por la comunidad de usuarios de Python que permite disponer de un amplio abanico de funciones para multitud de aplicaciones concretas. En este trabajo, se ha utilizado Python en el entorno de Anaconda con el editor de código Spyder. Ambos facilitan la instalación y la sincronización de la mayoría de las librerías utilizadas para el desarrollo del programa como *NumPy* para manejar grandes volúmenes de datos matriciales,



Rasterio que permite trabajar con conjuntos de datos de tipo Ráster almacenados en archivos en formato GeoTIFF, *Fiona* que permite leer y escribir archivos geométricos de tipo vectorial y, por lo tanto, facilita la incorporación al código de archivos espaciales vectoriales como los polígonos de las parcelas en formato Shapefile de ESRI (.shp), *Matplotlib.pyplot* que permite representar datos en gráficos e imágenes a través de la pantalla de una forma sencilla e intuitiva y *PIL* que permite la edición de imágenes desde Python.

2.2.- Obtención automática de redes de cárcavas a partir de Modelos Digitales de Elevación (MDE)

En la Figura 1 se presenta la metodología aplicada, basada en los trabajos previos descritos en Peña (1997), pero incorporando el análisis a escala de parcela agrícola.

A partir de un MDE corregido (Fig.1 *MDE corregido*) a partir de los MDE de PNOA con diferentes resoluciones se pueden calcular directamente numerosos atributos del paisaje, usando solo los valores de la elevación en un conjunto de puntos del terreno y aplicando métodos de interpolación local.

Además, las redes de desagüe obtenidas aplicando direcciones simples ofrecen una aproximación suficiente, como ha sido mostrado por Jenson (1992), ya que, con resoluciones de celdas adecuadas, cabe esperar que solo una pequeña proporción de ellas requieran direcciones múltiples (Peckham, 1995) no afectando al resultado de forma significativa.

Bajo estos supuestos, la base del trabajo consiste en calcular, para cada celda, la pendiente con respecto a las ocho celdas vecinas, asignándole la dirección de flujo hacia la celda con la que presente la mayor pendiente descendente (O'Callaghan y Mark, 1984; Jenson y Domingue, 1988; Martz y Garbrecht, 1993). Posteriormente, partiendo de la matriz de direcciones de vertido y especificando la celda que representa la salida de la cuenca, puede obtenerse la superficie que desagua cada celda o, lo que es lo mismo, el número de celdas que descargan en cada una, y se definirán los límites de la cuenca mediante la identificación de todas las celdas que pertenecen a ella y cuyo patrón de flujo concluye en la celda de salida (Fig.1 *CUENCA*). Finalmente, partiendo de la matriz de direcciones de vertido y de la matriz de superficies acumuladas, todas las celdas que superen una superficie de desagüe adoptada como umbral, formarán parte de la red de cárcavas (Fig.1 *REDDESA*), definida continua y unidireccionalmente, pudiendo identificar tramos y cuantificar cada uno de ellos sus magnitudes asociadas como el número para cada orden, la superficie desaguada o la longitud de cada tramo (Fig.1 *NUDRED, ANRED, LATRED*).

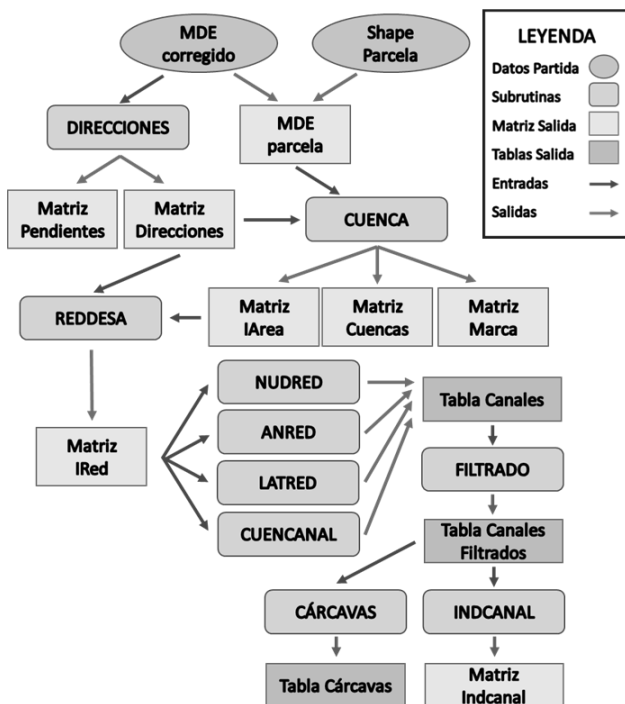


Fig. 1. Metodología para la obtención automática de la red de cárcavas de una parcela agrícola a partir de su MDE.

El criterio de que toda el agua que escurre por una celda lo haga en una sola dirección, conocido como D-8, fue establecido por O'Callaghan y Mark (1984), existiendo otros criterios para definir las trayectorias de flujo a lo largo del MDE (Fig.1 *DIRECCIONES*).

2.2.- Obtención automática de redes de cárcavas a escala de parcela agrícola

Todo el procedimiento descrito anteriormente puede aplicarse en sucesivas reiteraciones sobre una determinada parcela agrícola que puede ser identificada por su referencia catastral, importando el archivo en formato .shp con el polígono de la parcela objeto de estudio, sobre el que se realiza una máscara al MDE corregido, que servirá para almacenar en un nuevo MDE los valores elevación de las celdas que pertenecen a la parcela (Fig.1 *MDE parcela*).

La metodología mostrada en la Figura 1 se aplica para determinar todas las subcuencas cuyos puntos de salida se encuentran en los bordes de la parcela objeto de estudio mediante el siguiente procedimiento iterativo:

1. Partiendo del MDE que contiene los datos de elevación de la parcela, se determina el punto de menor elevación que, al trabajar con un MDE corregido, se encontrará en el borde de la parcela.
2. Una vez se conoce el primer punto de salida se determinarán las celdas que pertenecen a dicha cuenca y la superficie desaguada por cada una de



ellas.

3. Tras determinar la primera subcuena, se eliminan los valores de elevación de las celdas que la componen, del MDE que contiene la elevación de la parcela y se vuelve al paso 1.
4. En el momento en que todas las celdas pertenecientes a la parcela han sido estudiadas, perteneciendo cada una de ellas a alguna de las subcuenas determinadas, finalizará este proceso.

Durante la determinación automática de las cuencas se almacenan tanto el valor de la superficie que desagua cada celda, como las celdas que pertenecen a cada cuena, cuyo punto de salida se encuentra en los bordes de la parcela. Este procedimiento permite conocer la superficie total que contribuye a la parcela en estudio, compuesta por las diferentes subcuencas que existen en dicha superficie, de las cuales se obtienen también sus divisorias y sus puntos de salida.

Una vez identificadas todas las subcuencas de la parcela de estudio, puede aplicarse a cada una de ellas los procedimientos descritos en la Figura 1 para extraer la red de cárcavas y cada uno de sus atributos.

3.- Resultados

3.1.- Parcela de estudio

Para la aplicación de los procedimientos descritos, se ha seleccionado una parcela situada en el noreste del Término Municipal (T.M.) de Jaén (Figura 2). En la selección de la finca se tuvieron en cuenta distintos criterios, como la presencia del cultivo del olivar, su situación en una zona de campiña con pendientes moderadas y su proximidad a cursos fluviales, que pudiesen dar lugar a la formación de cárcavas.

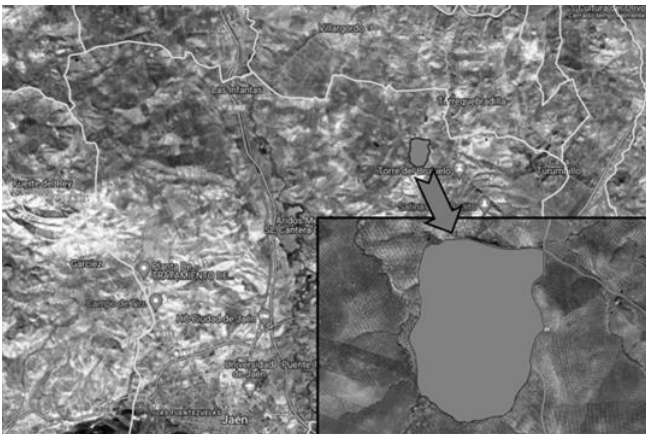


Fig. 2. Situación y detalle de la parcela en el T.M. de Jaén

La parcela seleccionada, que se encuentra en el paraje

"Pozo" y que tiene una superficie de 101 hectáreas, se sitúa a unos 3 km del núcleo de Torrequebradilla perteneciente al T.M. de Villatorres, actuando como linde por el este la carretera que une este municipio con la ciudad de Jaén. Además, por el oeste, se localiza a escasos metros de la parcela el Arroyo de las Cañadillas, al cual desembocan las subcuencas que desaguan a través de la parcela.

El 80% del suelo de la parcela se ha formado a partir de margas blancas y arenosas (albarizas); el 20% restante, en la zona suroeste de la parcela se ha formado a partir de una alternancia de arenas, areniscas calcáreas, arcillas y margas, predominando el cultivo del olivar dispuesto en marco rectangular, a excepción del tercio suroeste, donde el cultivo parece estar dispuesto según curvas de nivel.



Fig. 3. Límites de la parcela sobre el Mapa de Google Satellite Hybrid

Esta disposición puede estar relacionada con una mayor pendiente en esta zona, que favorece la formación de cárcavas que vierten sobre el arroyo de las Cañadillas y que se pueden observar a simple vista sobre la imagen satélite. Por otra parte, en la zona noreste de la parcela, se distingue una isla de vegetación de 2,5 ha de matorral (Figura 3).

3.2.- Obtención del MDE de la parcela

Desde el Centro de Descargas del IGN se obtuvieron en formato *.asc* la hoja 0926 del MDT05, que se corresponde con el MDE de 5 m de paso de malla (MDE-05) y las hojas 0926-3 y 0926-4 del MDT02, que se corresponden con el MDE de 2 m de paso de malla (MDE-02) y que en ambos casos cubren al completo la superficie de la parcela.

A continuación, se corrigieron los sumideros y zonas deprimidas de las mismas mediante el paquete de SAGA Fill Sinks (Wang & Liu, 2006), almacenando las hojas corregidas en formato *.tif*.

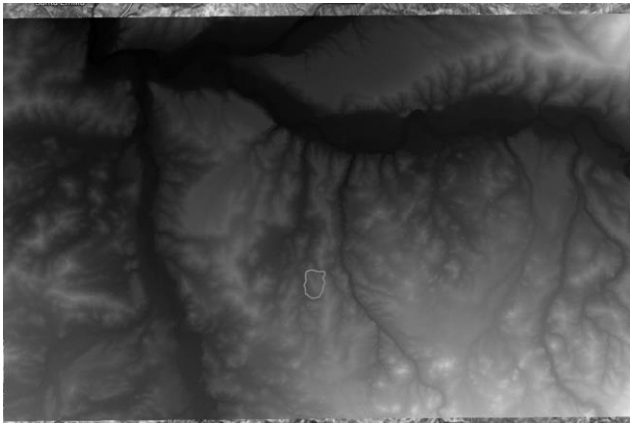


Fig. 4. Límites de la parcela sobre el MDE de la hoja 0926 con paso de malla de 5 x 5 m

La superficie cubierta por el MDE representado en la Figura 4, se corresponde con la hoja 0926 del MTN50.

Tanto el MDE corregido en formato *.tif*, que cubre la superficie de la parcela, como el archivo *.shp* de la misma se cargan en el programa de identificación de cárcavas diseñado para obtener el MDE de la parcela, que se guarda en formato *.tif*. Este archivo, donde solamente se conserva la elevación de las celdas pertenecientes a la parcela, se utiliza en la identificación de los puntos de salida de las cuencas que vierten a través de la parcela de estudio.

3.3.- Obtención automática de la red de cárcavas de la parcela a distintas resoluciones

Aplicando la metodología descrita, se obtuvieron las diferentes matrices de interés para el estudio.

En las Figuras 5 y 6 se presentan para el MDE-05 y para el MDE-02, respectivamente, su matriz "idf", donde se representa la dirección de vertido (1 a 8) de cada celda del MDE corregido que es analizado, mostrando sobre él los límites de la parcela objeto de estudio.

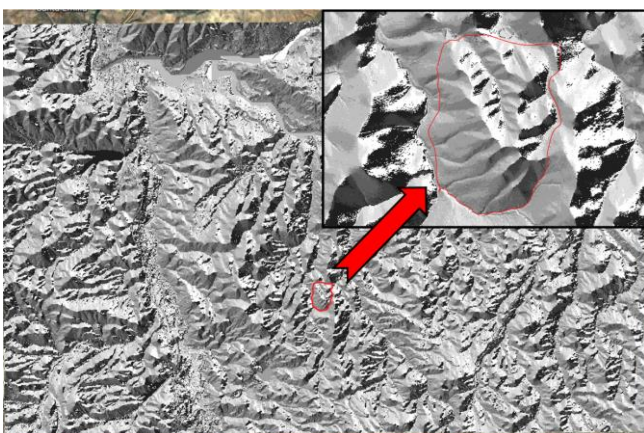


Fig. 5. Matriz "idf" obtenida a partir del MDE con celdas de 5 x 5 m. Detalle de la parcela de estudio

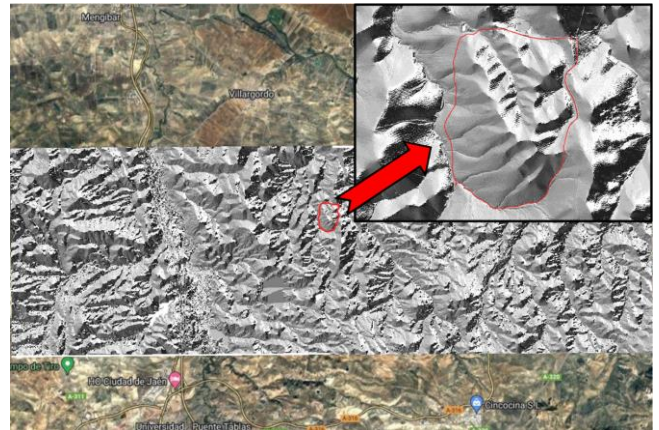


Fig. 6. Matriz "idf" obtenida a partir del MDE con celdas de 2 x 2 m. Detalle de la parcela de estudio

Analizando las Figuras 5 y 6, a simple vista no se observan diferencias entre las direcciones de vertido para ambos tamaños de celda. Sin embargo, existen elementos, como la red de carreteras, que afectan a los patrones de flujo debido a su diseño en el que se emplean obras de drenaje y cunetas, pero que, debido a su escasa anchura, solo son identificados con precisión cuando se utiliza el MDE-02.

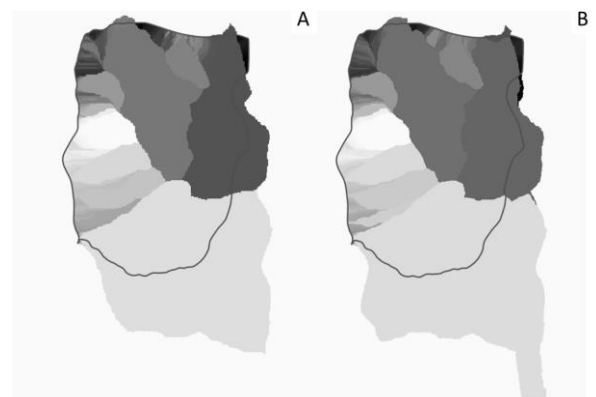


Fig. 7. Matriz "Cuencas" en formato ráster. A. Matriz "Cuencas" a partir de MDE con paso de malla de 5 m. B. Matriz "Cuencas" a partir de MDE con paso de malla de 2 m.

A partir de la matriz "idf" y del MDE de la parcela de estudio, se obtienen las cuencas cuyos puntos de salida se encuentran en los límites de la misma. Para ello se ejecuta la Subrutina *CUENCAS*, que determina en cada ejecución la cuenca compuesta por aquellas celdas que vierten a través de la celda de cota mínima del MDE de la parcela o celda de desagüe de la cuenca en estudio. Del mismo modo, durante la ejecución de la Subrutina se determina el área acumulada en las celdas que componen cada subcuenca, que define junto a la dirección de vertido, los patrones de flujo de las cuencas que vierten a través de la parcela (Figura 7).

En la Figura 7, donde se representa la matriz "Cuencas" en formato ráster para los MDE-05 y MDE-02, se observa



como la superficie ocupada por las cuencas que vierten a través de la parcela de estudio es diferente en función del MDE utilizado. De forma concreta, se obtuvo una superficie de 149 ha para el MDE-05 y de 156 ha para el MDE-02, lo que resulta en una diferencia de 7 ha, que se debe principalmente a la variación que se obtiene al determinar las direcciones de vertido con dos MDE distintos. Cuando esto ocurre, se obtienen patrones de flujo distintos y cuencas con distintas divisorias, como ocurre con la cuenca que ocupa el tercio sur de la parcela.

Otra consecuencia de utilizar dos MDE con distinta resolución, es la obtención de un número distinto de cuencas, que para el MDE-02 fue de 898, frente a las 404 obtenidas con el MDE-05. El elevado número de cuencas obtenido en ambos casos y de forma más acusada con el MDE-02, está justificado por los tamaños de celda utilizados, que identificaron un gran número de cuencas próximas a los límites de la parcela, en los cuales desaguan, tal y como se observa en la figura 8, donde se representan las subcuencas determinadas para cada resolución en formato vectorial.

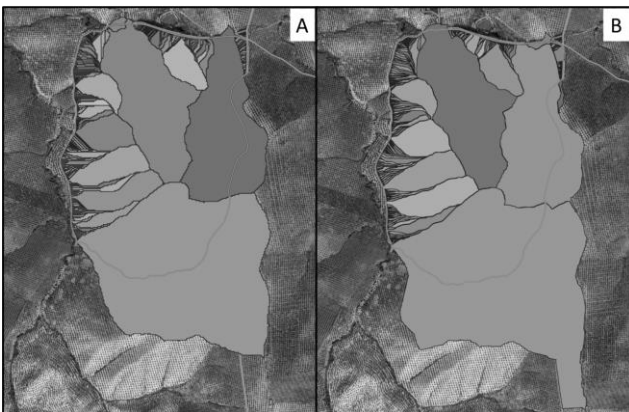


Fig. 8. Cuencas en formato vectorial A. A partir de MDE con paso de malla de 5 m. B. A partir de MDE con paso de malla de 2 m.

No obstante, para los MDE-05 y MDE-02, tan solo 38 y 40 cuencas, respectivamente, presentaron una superficie superior al umbral de área acumulada establecido para la consideración de una celda como canal (1200 m^2). En consecuencia, y debido a la naturaleza del programa desarrollado, las cuencas que no superan esta superficie no poseen ningún canal, por lo que no se espera que originen problemas de erosión en la parcela de estudio. A pesar de ello, cuando se analicen parcelas aguas abajo a la de estudio, cuencas que en el análisis no presentan ningún canal, podrán formar parte de cuencas con una mayor superficie, cuyas celdas den lugar a canales.

Finalmente, una vez que se conocen tanto las subcuencas que vierten a través de la parcela de estudio, como el área acumulada en cada una de las celdas que conforman dichas subcuencas, se recorren los patrones de flujo con el objetivo de determinar la red de desagüe a través de esta. De esta

forma, habiendo establecido en 1200 m^2 el umbral de área acumulada en una celda para que esta sea considerada como perteneciente a un canal, se determinan las redes de canales existentes en cada subcuenca, que vierten en última instancia a través de sus puntos de desagüe. Para ello, se ejecuta la Subrutina *REDDESA*, que determina en cada ejecución la red de canales de cada cuenca, partiendo de la celda de desagüe de la misma.

En la figura 9 se representa tanto para el MDE-05, como para el MDE-02 el ráster de la matriz "ired", donde las celdas que en cada caso pertenecen a un canal, almacenan su valor de orden hortoniano, para todos los canales que componen dicha red. En esta figura se observa como los canales obtenidos a partir del MDE-05 presentan una anchura superior a los obtenidos con el MDE-02, debido al menor tamaño de celda de este último, que se ajusta mejor a la anchura real de las cárcavas sobre el terreno y definen su trazado con mayor precisión.

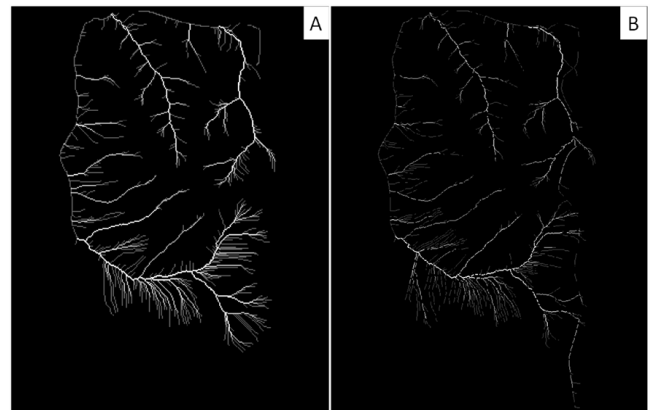


Fig. 9. A. Red de canales en formato ráster. A. A partir de MDE con paso de malla de 5 m. B. A partir de MDE con paso de malla de 2 m

Por otro lado, en ambos casos se observa cómo sobre el límite oeste de la parcela, próximo al arroyo de las Cañadillas, existe un elevado número de canales de orden 1 que en la mayoría de las cuencas ocupan la celda de salida y alguna más, vertiendo inmediatamente al exterior de la parcela sin ocasionar problemas de erosión en la misma. Sin embargo, al igual que ocurre en la determinación de las cuencas descrita en el apartado anterior, en parcelas situadas aguas abajo a la de estudio, estos canales de orden 1 serán cabeceras de cárcavas que confluirán formando canales de orden mayor que pueden provocar problemas de erosión en parcelas vecinas. De acuerdo con ello, los canales de orden 1 que vierten al exterior de la parcela no se tendrán en cuenta durante el análisis de la red de canales o cárcavas presentes en esta parcela.

A continuación, tras aplicar las Subrutinas *NUDRED*, *ANRED*, *LATRED* y *CUENCANAL* sobre la matriz "ired" correspondiente a cada MDE, se llevó a cabo el filtrado de

los canales. En este proceso se descartaron los de orden 1 que vierten al exterior de la parcela y en una nueva tabla, se conservaron los atributos del resto de los canales que eran de interés para el estudio. Tras el filtrado, se ejecutó la Subrutina *INDCANAL*, que resulta en una matriz del mismo nombre, donde se localizan los canales filtrados. Finalmente, ambas matrices "ired" e "indcanal", se poligonizaron mediante QGIS y se combinaron obteniendo, tanto para el MDE-05, como para el MDE-02, el archivo vectorial que se observa en la Figura 10 donde se representan los canales filtrados según su orden hortoniano, sobre las cuencas a través de las que vierten.

Cuando se utilizó el MDE-05 se obtuvo una red compuesta por 477 canales que formaban parte de 15 subcuencas distintas. Sin embargo, cuando se utilizó el MDE-02, la red se compuso de 469 canales pertenecientes a 13 cuencas. En ambos casos, el mayor orden hortoniano obtenido para un canal fue 5, encontrándose en la cuenca que ocupa el tercio sur de la parcela en estudio.

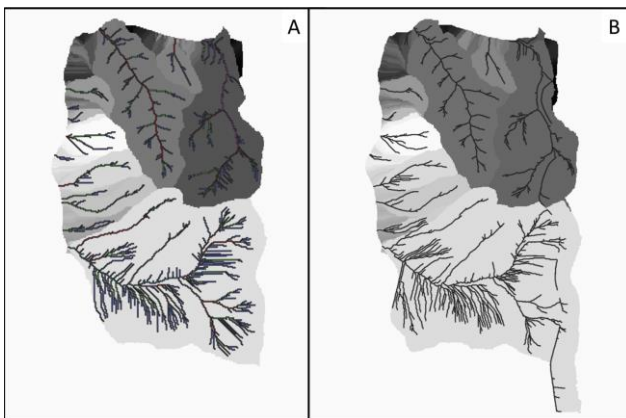


Fig. 10. Canales filtrados según orden hortoniano sobre cuencas. A. A partir de MDE con paso de malla de 5 m. B. A partir de MDE con paso de malla de 2 m

4.- Conclusiones

Se han desarrollado con éxito procedimientos para extraer automáticamente la red de cárcavas de una parcela agrícola a partir de Modelos Digitales de Elevación (MDE) obtenidos de vuelos LIDAR del PNOA, a distintas resoluciones. Los resultados son precisos y robustos, aunque debe continuarse profundizándose en esta línea de trabajo para establecer relaciones de conectividad entre parcelas que compartan una misma cárcava, que permita a los agricultores establecer medidas colaborativas de prevención y corrección que resulten realmente eficaces.

Agradecimientos. Este trabajo forma parte del Proyecto de investigación orientado a los retos de la sociedad "CARCAVA. Influencia Climática y Agronómica en la formación y evolución de la Red de Carcavas en la campiña Andaluza", financiado por la Consejería de Universidad,

Investigación e Innovación de la Junta de Andalucía.

5.- Bibliografía

- Amatulli, G., Garcia Marquez, J., Sethi, T., Kiesel, J., Grigoropoulou, A., Üblacker, M. M., Shen, L. Q., y S. Domisch, 2022. Hydrography90m: a new high-resolution global hydrographic dataset, *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 4525–4550.
- Arabameri, A., Pradhan, B., Lombardo, L., 2019. Comparative assessment using boosted regression trees, binary logistic regression, frequency ratio and numerical risk factor for gully erosion susceptibility modelling. *CATENA* 183, 104223.
- Arabameri, A., Rezaei, K., Pourghasemi, H.R., Lee, S., Yamani, M., 2018. GIS-based gully erosion susceptibility mapping: a comparison among three data-driven models and AHP knowledge-based technique. *Environ Earth Sci* 77, 628.
- Bull, L.M. y M.J. Kirkby, 1997. Gully processes and modelling. *Progr. Phys. Geogr.* 21:354-374.
- Castillo, C. y J.A. Gómez, 2016. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. *Earth Sci. Rev.* 160:300-319.
- COMISIÓN EUROPEA (CE), 2021. Comunicación de la comisión al parlamento europeo, al consejo, al comité económico y social europeo y al comité de las regiones Estrategia de la UE para la Protección del Suelo para 2030. Bruselas.
- Conoscenti, C., Agnesi, V., Cama, M., Caraballo-Arias, N.A., Rotigliano, E., 2018. Assessment of Gully Erosion Susceptibility Using Multivariate Adaptive Regression Splines and Accounting for Terrain Connectivity. *Land Degradation & Development* 29, 724–736.
- Daggupati, P., Mankin, K., Sheshukov, A., 2011. Predicting ephemeral gully location and length using topographic index models. *Transactions of the ASABE* 54, 2209–2218.
- Dey, S. 2014. Fluvial hydrodynamics. Springer, Berlín.
- di Stefano, C., Palmeri, V., Pampalone, V. 2019. An automatic approach for rill network extraction to measure rill erosion by terrestrial and low-cost unmanned aerial vehicle photogrammetry. *Hydrol. Proc.* 33:1883-1895.
- Frankl, A., Nyssen, J., De Dapper, M., Haile, M., Deckers, J. y J. Poesen, 2011. Trends in gully erosion as evidenced from repeat photography (North Ethiopia). *Landform Analysis* 17, 47–50.
- Hayas, A., Poesen, J. y T. Vanwallegem, 2017a. Rainfall and Vegetation Effects on Temporal Variation of Topographic Thresholds for Gully Initiation in Mediterranean Cropland and Olive Groves. *Land Degradation & Development* 28, 2540–2552.
- Hayas, A., Vanwallegem, T., Laguna, A., Peña, A. y J.V. Giráldez, 2017b. Reconstructing long-term gully dynamics in Mediterranean agricultural areas. *Hydrology and Earth System Sciences* 21, 235–249
- Howard, A.D. 1997. Badland morphology and evolution: Interpretation using a simulation model. *Earth Surf. Proc. Landf.* 22:211-227.
- Jenson, S.K., 1992. Applications of hydrologic information automatically extracted from digital elevation models, en *Terrain Analysis and Distributed Modelling in Hydrology*. Editado por K.J. Beven e I.D. Moore. Wiley, Chichester, pp. 35-48.
- Jenson, S.K. y J.O. Domingue, 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogram. Engng. Rem. Sens.*, 54: 1593-1600.
- Jiao, H., Li, F., Wei, H. y W. Liu, 2022. An Improved Shoulder Line Extraction Method Fusing Edge Detection and Regional Growing Algorithm. *Appl. Sci.*, 12, 12662.
- Kaiser, A., Peter, K.D., Brings, C., Iserloh, T., Seeger, M., Ghafrani, H., d'Oleire-Oltmanns, S., Marzolf, I., Ait Hssaine, A., Ries, J.B., 2014. Gully erosion and land degradation in the Souss Basin, southern Morocco-application of airborne and terrestrial imagery and SfM procedures, in: *EGU General Assembly Conference Abstracts*. p. 8525.
- Koci, J., Jarihani, B., Leon, J.X., Sidle, R.C., Wilkinson, S.N., Bartley, R., 2017. Assessment of UAV and Ground-Based Structure from Motion with Multi-View Stereo Photogrammetry in a Gullied Savanna Catchment. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 6, 328.
- Liu, J., Luo, M., y Z. Chen, 2022. The effects of terrain factors on the



- drainage area threshold: comparison of principal component analysis and correlation analysis. *Environ Monit Assess* 194, 168.
- Martínez-Casasnovas, J.A., 2003. A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion. *Catena* 50, 293–308.
- Martz, L.W. y J. Garbrecht, 1993. Automated extraction of drainage network and watershed data from digital elevation models. *Water Resour. Bull.*, 29: 901-908. Editado por K.J. Beven e I.D. Moore. J. Wiley, Chichester, pp. 7-34.
- Montgomery, D.R. y W.E. Dietrich, 1994. Landscape dissection and drainage area-slope thresholds. *Process models and theoretical geomorphology* 221–246.
- Moore, I.D., R.B. Grayson y A.R. Ladson, 1992. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological and biological applications, en *Terrain Analysis*.
- O'callaghan, J.F. y D.M. Mark, 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Comput. Vision Graphics Image Process.*, 28: 323-344.
- Omrán, A., Schröder, D., Sommer, C, Hochschild y M. Märker, 2022. A GIS-based simulation and visualization tool for the assessment of gully erosion processes, *Journal of Spatial Science*.
- Patton, P.C. y S.A. Schumm, 1975. Gully Erosion, Northwestern Colorado: A Threshold Phenomenon. *Geology* 3, 88–90.
- Peckhan, S.D., 1995. Self-Similarity in the Three Dimensional Geometry and Dynamics of Large River Basins. Tesis Doctoral. Universidad de Colorado.
- Peña, A., 1997. Geomorfología y evolución de la red de desagüe de una cuenca. Interpretación y comportamiento. *Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Rural. Universidad de Córdoba*.
- Peña, A., Ayuso, J.L. y J.V. Giráldez, 1999. Incorporating topologic properties into the geomorphologic instantaneous unit hydrograph, *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, Volume 24, Issues 1–2, 1999, Pages 55-58, ISSN 1464-1909.
- Perroy, R.L., Bookhagen, B., Asner, G.P., Chadwick, O.A., 2010. Comparison of gully erosion estimates using airborne and ground-based LiDAR on Santa Cruz Island, California. *Geomorphology* 118, 288–300.
- Rodríguez-Iturbe, I., Rinaldo, A., Rigon, R., Bras, R.L., Marani, A., Ijjász-Vásquez, E. 1992. Energy dissipation, runoff prediction, and the three-dimensional structure of river basins. *Water Resour. Res.* 28:1095-1108.
- Roy, P., Pal, S.C., Arabameri, A., Chakraborty, R., Pradhan, B., Chowdhuri, I., Lee, S. y D.T. Bui, 2020. Novel Ensemble of Multivariate Adaptive Regression Spline with Spatial Logistic Regression and Boosted Regression Tree for Gully Erosion Susceptibility. *Remote Sensing* 12, 3284.
- Thorne, C., Zevenbergen, L.W., Grissinger, E. y J. Murphey, 1986. Ephemeral gullies as sources of sediment. *Presented at the Proceedings of the Fourth Federal Interagency Sedimentation Conference March 24-27, 1986, Las Vegas, Nevada*.
- Torri, D. y J. Poesen, 2014. A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments. *Earth-Science Reviews* 130, 73–85.
- Vandaele, K., Poesen, J., Govers, G., Wesemael, B. van, 1996. Geomorphic threshold conditions for ephemeral gully incision. *Geomorphology* 16, 161–173.
- Vandekerckhove, L., Poesen, J., Oostwoud-Wijdenes, D., Nachtergaele, J., Kosmas, D., Roxo, M.J., Figueiredo, T. de, 2000. Thresholds for gully initiation and sedimentation in Mediterranean Europe. *Earth Surface Processes and Landforms* 1201–1220.
- Vanmaercke, M. et al. 2021. Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales: A state of the art. *Earth Sci. Rev.* 218, 103637.
- Wang, L. y H. Liu, 2006. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, 20:2, 193-213.
- Wilkinson, B.H., McElroy, B.J. 2007. The impact of humans on continental erosion and sedimentation. *Geol. Soc. Am. Bull.* 119:140-156.