



### Valoración de la geodiversidad del Parque Natural y Geoparque de las Sierras Subbéticas (Córdoba, sur de España)

#### *Geodiversity assessment of the Sierras Subbéticas Natural Park and Geopark (Córdoba, South of Spain)*

David Carruana Herrera <sup>(1,2)</sup>; Juan F. Martínez-Murillo <sup>(1, 2)</sup>

(1) Departamento de Geografía, Universidad de Málaga. Campus de Teatinos, 29071, Málaga, España, [jfmmurillo@uma.es](mailto:jfmmurillo@uma.es)

(2) Instituto de Geomorfología y suelos, Universidad de Málaga. Ampliación del Campus de Teatinos, 29071, Málaga, España.

#### Resumen

El Parque Natural Sierras Subbéticas obtuvo la catalogación de geoparque de la Red Europea de Geoparques en 2006 y Geoparque de la UNESCO en 2015 gracias a su riqueza en fósiles (facies *ammonitico rosso*, rica en ammonites) y la presencia de muy buenos ejemplos de morfologías exo y endokársticas. La valoración de la geodiversidad en geoparques es un análisis clave para comprender su distribución espacial y, por tanto, mejorar la ordenación y la gestión de los usos en estos espacios naturales. Este trabajo tiene por objetivo valorar su geodiversidad mediante la aplicación y comparación de tres métodos basados en el álgebra de mapas. Los resultados ofrecieron una alta variabilidad espacial de la geodiversidad, con una valoración diferente en función del método empleado. Este hecho indicó la necesidad de seguir indagando en nuevos métodos que ofrezcan buenas herramientas y cartografía para la gestión por parte de los gestores de espacios naturales protegidos y geoparques.

**Palabras clave:** geodiversidad; valoración; método cuantitativo; geoparque; Subbéticas.

#### Abstract

The Sierras Subbéticas Natural Park became member of the European Network of Geoparks and UNESCO in 2006 and 2015, respectively. This was possible owing to its richness in fossils (*ammonitico rosso* facies, rich in ammonites) and to the presence of very good examples of endo- and exokarstic morphologies. The geodiversity valuation is a key issue for geoparks in order to know well its spatial variability and, thus, to improve the land management in these natural areas. This study aims to value geodiversity by means of



the application and comparison of three quantitative methods, previously published by different authors, based on map algebra. The results showed a very high spatial variability in the geodiversity from the studied geopark, different depending on the method considered. This indicated the need of searching and defining new and better methodologies to achieve a more reliable cartography for the land managers of natural protected areas and geoparks.

**Key words:** geodiversity; assessment; quantitative method; geopark; Subbéticas.

## 1. Introducción

El concepto de geodiversidad se utiliza por primera vez en 1993, al poco tiempo de la celebración de la 'Convention on Biological Diversity', en la Cumbre de la Tierra, celebrada en Río, en 1992. Este concepto se ha definido de diferentes maneras, pero destaca la definición aportada por Gray (2004): "la variedad natural (diversidad) de rasgos geológicos (rocas, minerales y fósiles), geomorfológicos (formas de relieve, topografía, procesos geomorfológicos), edáficos e hidrológicos, incluyendo sus interacciones, estructuras, sistemas e influencias en el paisaje". También debe destacarse por ser más integradora la definición dada por Serrano y Ruiz Flaño (2007a): "la variabilidad de la naturaleza abiótica, incluidos los elementos litológicos, tectónicos, geomorfológicos, edáficos, hidrológicos, topográficos y los procesos físicos sobre la superficie terrestre y los mares y océanos, junto a sistemas generados por procesos naturales, endógenos y exógenos, y antrópicos, que comprende la diversidad de partículas, elementos y lugares".

Brilha *et al.* (2018) indican que la geodiversidad puede caracterizarse apoyada en tres cuestiones elementales: 1) los tipos de elementos de geodiversidad presentes en una cierta área y su distribución espacial, que determinan su escala de análisis; 2) el objetivo de su caracterización y representación cartográfica (educación, difusión, planeamiento territorial, etc.); y 3) la selección de la metodología y el criterio para la caracterización y evaluación de la geodiversidad. Esta última cuestión se relaciona bastante con las dos primeras y, según la naturaleza de los elementos

del conjunto de la geodiversidad de un área geográfica y las razones para su caracterización, el método de evaluación puede atender a dos formas de aproximación: una, cualitativa, y otra, cuantitativa. Estos métodos de evaluación de la geodiversidad pueden variar desde unos muy generales, a otros de gran detalle en cuanto a los resultados obtenidos, dependiendo ello de la disponibilidad de datos espaciales a una escala de trabajo apropiada, incluyendo los datos en formato digital.

La evaluación cualitativa de la geodiversidad consistiría en una descripción de los elementos que definen la geodiversidad de un área dada y su explicación, incluyendo propuestas basadas en la opinión de expertos y donde se marcan los niveles de geodiversidad, aunque siempre de manera no numérica (Brilha *et al.*, 2018). En el caso de la evaluación cuantitativa de la geodiversidad, el método aplicado trata de evaluar del modo más objetivo posible la variabilidad espacial de los elementos de la geodiversidad en un territorio. No obstante, no parece del todo correcto identificar método cuantitativo con objetividad puesto que detrás de cada variable definida y su ponderación puede subyacer una decisión marcada por la subjetividad. Estos se tratan de análisis basados en su mayoría en un conjunto de parámetros numéricos e indicadores orientados a la detección de la diversidad de los rasgos geológicos (y geomorfológicos, edáficos, hidrológicos e, incluso, climáticos) del área a valorar. Aunque algunos parámetros pueden obtenerse de mediciones de campo y tele-detección, la mayoría de los procedimientos cuantitativos se basa en mapas de análisis de la diversidad, la frecuencia y la distribu-

ción de los elementos de la geodiversidad en el área de estudio (Carcavilla *et al.*, 2007). A estos dos grandes grupos de métodos, puede añadirse un tercero, los métodos de tipo semi-cuantitativos que, según Zwoliński *et al.* (2018), se basan en una combinación de datos cuantitativos y datos de causa-efecto (es decir, relacionales y explicativos), siendo para estos autores la solución técnica más avanzada y mejor para evaluar la geodiversidad. Por tanto, la selección de un método u otro debe estar influida por la escala de trabajo y el uso potencial de la evaluación de la geodiversidad (Brilha *et al.*, 2018). De este modo, la precisión y el detalle de los datos necesarios para caracterizar la geodiversidad son factores a tener en cuenta, principalmente en aquellos estudios cuantitativos basados en los llamados procedimientos de álgebra de mapas.

En los últimos años, se han publicado diversos trabajos presentando y discutiendo diferentes índices de geodiversidad combinando álgebra de mapas y herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) (Hjort y Luoto, 2012; Pereira *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2013; Pellitero *et al.*, 2015; Martínez-Graña *et al.*, 2017; Araujo y Pereira, 2018). La objetividad y simplicidad en la aplicación de algunas herramientas de representación de los SIG permite cartografiar la geodiversidad o los índices de geodiversidad, así como su superposición con otros datos espaciales. La automatización de ciertos procedimientos mediante dichas herramientas podría hacer que la valoración cuantitativa de la geodiversidad fuese la más apropiada, con fines de ordenación y gestión del territorio y, en especial, de espacios naturales protegidos de interés para su conservación.

Para Serrano *et al.* (2009), el relieve constituye la base de la organización espacial de los Espacios Naturales Protegidos (ENP), sustentando aquel gran parte de su atractivo y los argumentos que justificaron la protección. Los Planes de Ordenación de los Recursos Naturales (PORN) y los Planes Rectores de Uso y Gestión (PRUG), como por ejemplo los de los parques naturales de Sierras Subbéticas y de

Sierra de las Nieves, en Andalucía, incluyen aspectos geológicos y geomorfológicos, además de otros elementos del medio abiótico, como elementos esenciales desde una triple óptica: como componente del medio natural, como patrimonio, y como recurso. Es por esto por lo que la valoración y evaluación de la geodiversidad, especialmente en un ENP, es un procedimiento necesario para alcanzar una ordenación y gestión en un marco de sostenibilidad medioambiental y socioeconómica. Este tipo de evaluaciones son aún más necesarias en los ENP declarados como geoparques, entendidos como áreas geográficas donde lugares y paisajes de significación geológica se gestionan bajo un concepto holístico de protección, educación y desarrollo sostenible (UNESCO, último acceso 22/10/2019), aunque hay que aclarar que la declaración como tal de un ENP no lleva aparejada una normativa específica más allá de la propia como ENP, al menos en la Comunidad Autónoma de Andalucía.

Considerando lo expuesto en estos párrafos, este trabajo tiene por objetivos: 1) realizar una primera aproximación a la valoración de la geodiversidad de un territorio que es a la vez de ENP, geoparque, como es el Parque Natural y Geoparque Sierras Subbéticas en la provincia de Córdoba, mediante tres métodos, publicados en trabajos científicos previos (Serrano y Ruiz-Flaño, 2007a; Najwer *et al.*, 2016; Araujo y Pereira, 2018), y 2) comparar los resultados de estos desde una óptica de aplicación a la ordenación y gestión de dicho ENP y geoparque.

## **2. El Geoparque de las Sierras Subbéticas: geología y geomorfología**

El área de estudio es el Parque Natural y Geoparque Sierras Subbéticas, situado en el sur de la Península Ibérica (Figura 1). Este ENP fue declarado parque natural en 1988, pasó a formar parte de la Red Global y Europea de Geoparques en 2006, y consiguió la denominación de Geoparque de la UNESCO en 2015. El ENP tiene una superficie de 32.056 ha extendiéndose por los municipios de Ca-

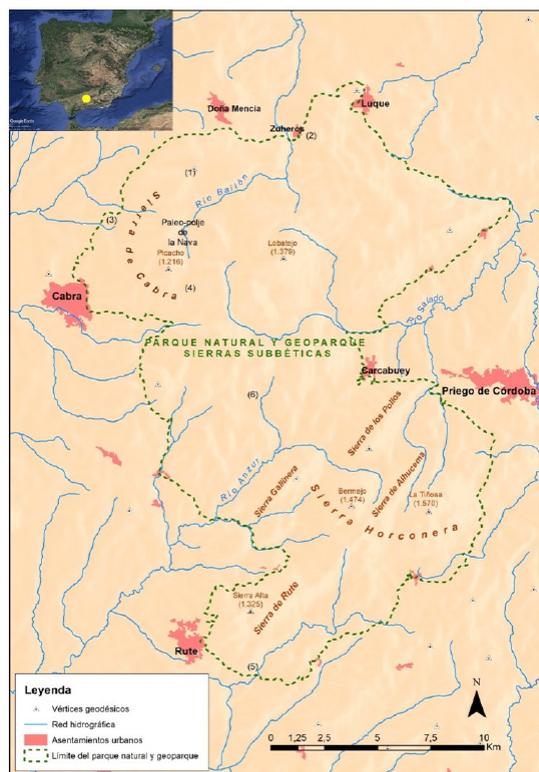


Figura 1: Localización del área de estudio: Parque Natural y Geoparque Sierras Subbéticas. Lugares de interés geológico y geomorfológico: (1) dolina de los Hoyones; (2) cueva de los Murciélagos; (3) sima de Cabra; (4) paleo-lapiaz de los Lanchares; (5) cañón fluvio-kárstico La Hoz; (6) Cañada del Hornillo.

Figure 1: Location of the study area: Sierras Subbéticas Natural Park and Geopark. Geosites: (1) Hoyones doline; (2) Bats Cave; (3) Cabra's hole; (4) Lanchares paleo-karren; (5) La Hoz fluvio-karstic canyon; (6) Hornillo Valley.

bra, Carcabuey, Doña Mencía, Iznajar, Luque, Priego de Córdoba, Rute y Zuheros, todos ellos en la provincia de Córdoba. El paisaje está muy influenciado por la geología: así, se alternan abruptas sierras en calizas muy resistentes, donde se alcanzan las mayores altitudes (como La Tiñosa, 1.570 m.s.n.m., mayor elevación de la provincia de Córdoba) y se concentra la vegetación natural (bosques de encinas, matorrales mediterráneos y pastizales pastados por ganado caprino y ovino), y valles y campiñas abiertas en áreas

altitudinales más bajas sobre margas y otros sedimentos detríticos, que concentran la actividad agrícola, con extensos olivares y pequeñas huertas en algunas terrazas fluviales. De acuerdo con Gómez Zotano *et al.* (2015), el ENP quedaría bajo un doble dominio climático: su sector más noroccidental en clima mediterráneo semi-oceánico (subhúmedo) de las sierras peri-béticas occidentales, y el resto en el clima mediterráneo continental de sierras, pasillos y depresiones béticas centrales la mayor parte.

El geoparque puede subdividirse claramente en dos sectores bien diferenciados: uno septentrional, conformado por macizos calcáreos, con altitudes comprendidas entre 1.000 y 1.400 m.s.n.m., de vertientes suavemente inclinadas hacia el sur, que terminan de modo abrupto en el límite norte del geoparque; y otro meridional, en el que se alternan alargadas y estrechas sierras, de altitudes que varían entre 900 y 1.500 m.s.n.m., con orientación dominante SO-NE, alternando con campiñas y estrechos valles. Sobre estos relieves, las principales corrientes fluviales (Palancar-Salado, Anzur, Bailón y Cabra) discurren hacia el río Guadalquivir.

Un elemento de gran relevancia para la declaración del ENP como geoparque es la presencia de la facies del *ammonitico rosso* del Aaliense (Jurásico), en calizas nodulosas, con un espesor de hasta 40 m en el sector central, con abundantes restos de fauna ammonítica (destaca la Cañada del Hornillo). Otros elementos geológicos de importancia para conseguir la declaración de geoparque fueron una amplia gama de ejemplos de morfologías exo y endokársticas en formaciones calcáreas, de gran valor educativo y científico (Figuras 1 y 2): por ejemplo, el paleo-polje de la Nava, dolina de los Hoyones, o sima de Cabra. También, destacan las estructuras geológicas como el frente de cabalgamiento en Zuheros o el klippe del Picacho de Cabra. En síntesis, todas estas morfologías conforman en su conjunto un paisaje muy típico de sierras calcáreas mediterráneas karstificadas y campiñas margosas de las Cordilleras Béticas.

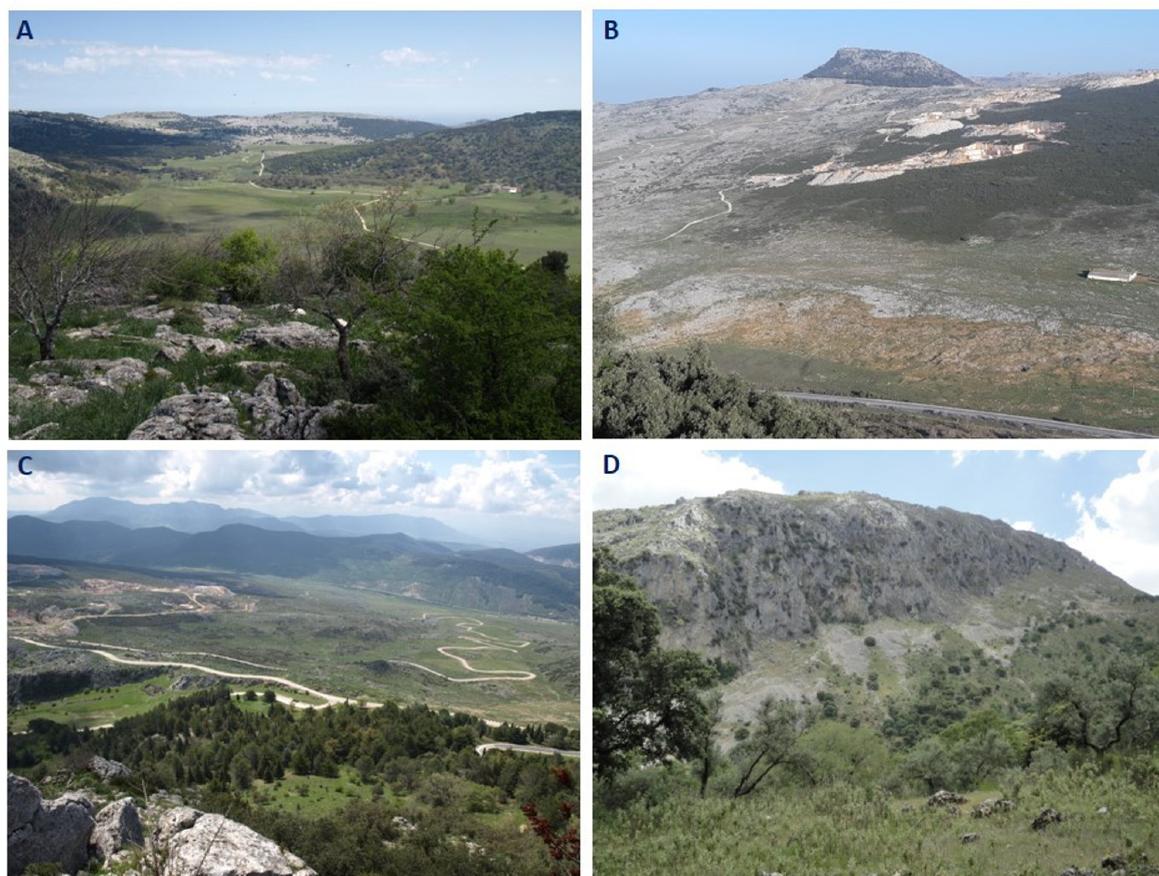


Figura 2: Elementos geomorfológicos sobresalientes del Parque Natural y Geoparque de Sierras Subbéticas: paleo-polje de la Nava (A), klippe del Picacho de Cabra (B), vertiente del paleolapiaz de los Lanchares (C) y taludes de derrubios en la cara noroeste de Sierra de Alhucema (D). Fuente: autores.

*Figure 2: Outstanding geomorphological elements from Sierras Subbéticas Natural Park and Geopark: La Nava's paleo-polje (A), Cabra Peak's klippe (B), paleo-karren in Lanchares (C), and debris talus in the Northwest of Sierra de Alhucema (D). Source: authors.*

### 2.1. Características geológicas

El territorio del Parque Natural y Geoparque de las Sierras Subbéticas se encuentra en el sector central de la Zona Subbética (Sanz de Galdeano, 1973), estando conformadas sus unidades geológicas fundamentalmente por rocas sedimentarias del Jurásico y Cretácico, aunque también por afloramientos menos extensos de materiales triásicos y cenozoicos (Molina *et al.*, 1999). Según la memoria geológica de la Hoja MAGNA50 989 (Díaz de Neira *et al.*, 1991), en este sector, pueden diferenciarse: unidad de Subbético externo,

unidad de Subbético medio, y unidades intermedias jurásico-cretácicas.

Confeccionado a partir de la cartografía geológica, la figura 3 representa el mapa de litologías existentes en el ENP. En posición topográficamente inferior, en general, ocupando las campiñas y fondos de valle, se extienden los materiales triásicos, sobre los que descansan las sierras subbéticas, constituidos sobre todo por arcillas versicolores y yesos, acompañados localmente por areniscas cuarcíticas rojas, dolomías tableadas negras, ofitas y calizas oquerosas y carniolas. Sobre el Triásico,

en el conjunto de relieves serranos del ENP, pueden diferenciarse cuatro unidades alóctonas, con materiales de edades comprendidas entre el Trías y el Mioceno medio, cuyas litologías incluyen calizas margosas y margas, calizas nodulosas, calizas con sílex, margas radiolaríticas y doleritas. A las unidades anteriores, especialmente en el sector NO, hay que sumar las Unidades Intermedias, con afloramientos de margas grises y ocreas, con niveles turbidíticos, del Cretácico, y margas y margocalizas blancas del Paleoceno-Eoceno.

Por último, el Neógeno y Cuaternario queda circunscrito localmente a fondos de valle, piedemontes y algunas laderas, sobre todo orientadas a umbría. Así, se distinguen: Mioceno, con margas blancas y verdes, calizas de algas y biocalcarenitas, arenas margo-

sas amarillentas, brechas y conglomerados, biocalcarenitas, margas blancas, calizas con nummulites, y margas blancas con niveles de microbrechas; Plioceno, de brechas y conglomerados muy cementados; Pleistoceno, con arcillas y limos con cantos constituyendo glacis; y el Holoceno formado por depósitos coluviales, aluviales y en abanico.

En general, la estructura geológica se resuelve en mantos de corrimiento cuyos niveles de despegue están constituidos por los materiales triásicos. Se pueden diferenciar dos grandes conjuntos estructurales: uno, correspondiente al macizo septentrional, constituido por un manto de corrimiento a base de dos escamas superpuestas separadas por formaciones margosas impermeables de edad cretácica y paleógena; y otro, constituido por apretados pliegues subverticales, originando relieves abruptos, de elevadas pendientes.

## 2.2. Características geomorfológicas

La naturaleza caliza y los procesos de karstificación de gran parte del territorio del ENP constituyen factores de primer orden en la configuración de las características de su paisaje geomorfológico. Entre las formaciones kársticas más importantes destacan: i) en la mitad norte, paleo-poljes, torcas y dolinas, destacando el paleo-polje de La Nava y la dolina de hundimiento de los Hoyones; ii) áreas con presencia de lapiaces, con pequeñas depresiones donde se acumulan arcillas de descalcificación (Terras rossas), destacando el paleo-lapiac de los Lanchares; iv) cañones fluvio-kársticos, como los de los ríos Bailón y La Hoz; y v) simas, cuevas y otras formaciones kársticas, destacando la sima de Cabra y la cueva de los Murciélagos en Zuheros (Figuras 1 y 2).

El paisaje geomorfológico, además, está influenciado por la estructura geológica descrita anteriormente. Así, la influencia estructural se correlaciona con la fisiografía de los macizos montañosos: morfologías suaves, reguladas, redondeadas y masivas en la mitad norte;

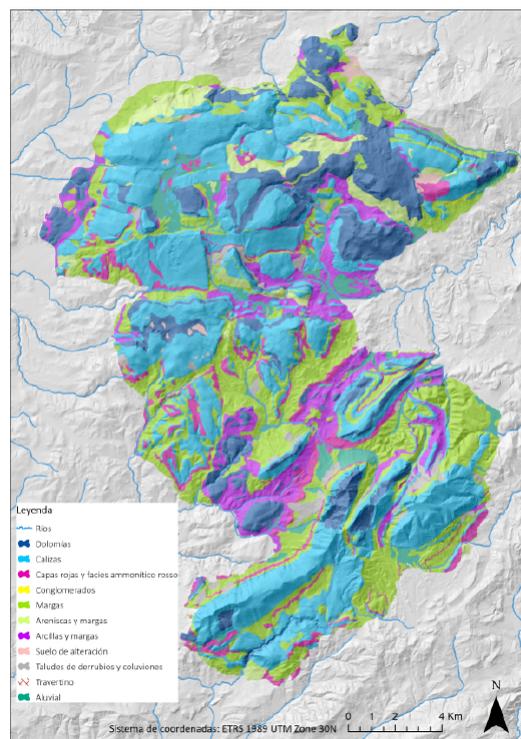


Figura 3: Mapa de litologías del Parque Natural y Geoparque de Sierras Subbéticas. Fuente: Red Ambiental de Andalucía (REDIAM, en adelante).

*Figure 3: Lithological map of the Natural Park and Geopark of Sierras Subbética. Source: REDIAM.*

morfologías quebradas, ásperas y abruptas, al menos en las vertientes septentrionales, en la mitad sur. Además, cabe destacar elementos estructurales de primer orden como el klippe o isleo tectónico del Picacho de la Sierra de Cabra, en el sector norte (Figura 2). La actual fisiografía del ENP ha de explicarse a partir de la comprensión de la evolución geomorfológica de su entorno en el pasado geológico más reciente. Según Torres y Recio (1994), gran parte de la fisiografía actual se explica teniendo en cuenta la existencia de una antigua paleo-topografía (hoy en torno a 750-800 m), que actualmente aparece sobre todo en el sector norte y su piedemonte, y que enlaza con las zonas somitales a 1.100-1.200 m.s.n.m. Este antiguo relieve de grandes superficies de erosión fue desmantelado por una red fluvial cuyo trazado no coincide con el actual, lo que causó la desconexión actual existente entre los relieves calizos y la campiña, a cotas por encima de 600 m. Prueba de ello son los depósitos de paleocursos detectados por encima de 500 m, en sentido de drenaje N. El rebajamiento del nivel de base cuaternario responde a dos fases: 1) la fase en la que actuaba la paleored, de circulación más general hacia el norte; y 2) la red fluvial actual, con cursos y niveles de terrazas asociados (terrazza más alta a 70-80 m sobre los talwegs actuales). En esta segunda fase, los cursos fluviales se encajan y se adentran en los macizos calcáreos, conectando zonas altas con los piedemontes, drenando los poljes, y generando, por ejemplo, el cañón del río Bailón.

Por último, cabe reseñar la importancia local de los procesos periglaciares y sus morfologías asociadas. Estos procesos han contribuido a la presencia de morfologías quebradas en las laderas, especialmente, en la mitad sur del ENP, con mayores altitudes. El principal proceso ha sido el de la crioclastia, ocurrida en últimas fases frías pleistocenas (Torres y Recio, 1994). Especialmente, este proceso afectó a las vertientes septentrionales de orientación NO, por encima de 1.000 m.s.n.m. y tan solo a las litologías dolomíticas. La crioclastia generó clastos, escombros

de gravedad y taludes de derrubios en laderas de varias generaciones, a lo que se añade la presencia de fenómenos de soliflucción en zonas de más de 1.000 m.s.n.m., con sustrato margoso.

La Figura 4 representa la cartografía de las cinco unidades en que puede dividirse el área de estudio según la morfogénesis dominante, definidas a partir de la reclasificación de las unidades geomorfológicas propuestas por la cartografía temática de la Red Ambiental de Andalucía (REDIAM) de la Junta de Andalucía y tras comprobación en trabajo de campo. En definitiva, el ENP puede dividirse en unidades donde predominan: 1) morfogénesis fluvial, 2) morfogénesis kárstica, 3) morfogénesis gravitacionales, 4) morfologías dominadas por la estructura geológica, y 5) relieves residuales.

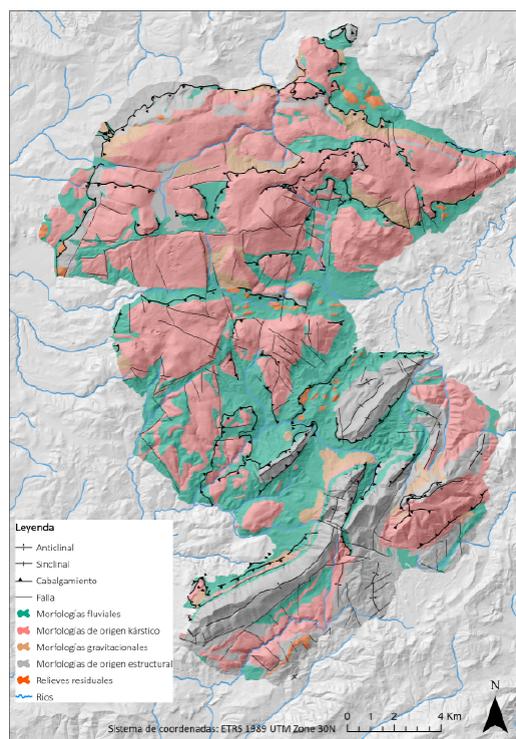


Figura 4: Mapa de unidades geomorfológicas del Parque Natural y Geoparque de Sierras Subbéticas.

*Figure 4: Map of geomorphological units of the Natural Park and Geopark of Sierras Subbética.*

### 3. Metodología

En este trabajo, se seleccionaron tres métodos basados en el álgebra de mapas, para la valoración de la geodiversidad en el Parque Natural y Geoparque de las Sierras Subbéticas: índice de geodiversidad de Serrano y Ruiz Flaño (2007a), método de Najwer *et al.* (2016) y método de Araujo y Pereira (2018). Estos métodos se describen en los siguientes subapartados. Para que los resultados de la aplicación de estos métodos fuesen comparables, se dividió el ENP en una malla de cuadrículas de 500x500 metros (similar a la del Mapa Topográfico Nacional 1:50.000). Cada una de las variables utilizadas por cada método fue inventariada y cuantificada en cada una de las celdas que componen dicha malla, facilitando los procedimientos de álgebra de mapas de cada uno de ellos. El resultado final se clasificó en los tres métodos según 5 valores de geodiversidad (muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto), obteniéndose un mapa final de valoración de la geodiversidad para cada uno de los tres métodos. Los procedimientos de representación cartográfica y los cálculos de álgebra de mapas se realizaron utilizando el sistema de información geográfica ArcGIS 10.6.

#### 3.1. Índice de geodiversidad de Serrano y Ruiz Flaño (2007a)

Este método se basa en la aplicación del índice de geodiversidad desarrollado por Serrano y Ruiz Flaño (2007a), que relaciona los elementos físicos con la rugosidad de una superficie determinada, siendo su ecuación la siguiente:

$$Gd = \frac{EgR}{lnS}$$

Donde: *Gd*, índice de geodiversidad; *Eg*, número de elementos físicos (geomorfológicos, litológicos, hidrológicos y edafológicos) existentes en la unidad (celda); *R*, coeficiente de rugosidad de la unidad según la pendiente del terreno; y *S*, superficie de la unidad/celda (km<sup>2</sup>).

El parámetro *Eg* se obtiene a partir de la suma de los elementos físicos registrados en cada celda, utilizando las siguientes fuentes de información:

- 1) Litología: número de litologías diferentes obtenidas a partir de la cartografía de la serie MAGNA50, a escala 1:50.000 (Díaz de Neira *et al.*, 1991).
- 2) Geomorfología: número de unidades geomorfológicas según la cartografía andaluza de unidades geomorfológicas a escala 1:400.000 (Fuente: REDIAM). Se utilizó esta cartografía geomorfológica ante la falta de un mapa geomorfológico propio en los momentos de finalizarse este trabajo. Dicho mapa geomorfológico de la REDIAM fue reclasificado en las siguientes unidades según el predominio de diferentes morfologías: fluviales, kársticas, gravitacionales, estructurales y de relieves residuales.
- 3) Edafología: número total de unidades de suelo según la cartografía andaluza de suelos de Andalucía 1:400.000 Fuente: REDIAM).
- 4) Hidrología: número total de ríos y arroyos, fuentes, manantiales y humedales, a partir de la cartografía andaluza de recursos hídricos (Fuente: REDIAM).

El coeficiente de rugosidad *R* aporta las características topográficas y microclimáticas. Es un parámetro integrador de los elementos abióticos del sistema. Su cálculo se ha realizado a partir del mapa de pendientes obtenido del MDT con resolución de 5x5 m del Instituto Geográfico Nacional (descargado del Centro Nacional de Descargas del IGN). El nivel de rugosidad queda dividido en cinco intervalos según la pendiente dominante en cada una de las celdas (la que ocupa mayor extensión) (Tabla 1). Por último, la superficie viene marcada por el tamaño de celda de la malla definida, por lo que el dato de superficie es constante en todos los casos: 0,25 km<sup>2</sup>. Para la obtención del mapa final de valor de la geodiversidad, el método establece unos intervalos de valores previamente definidos (Tabla 2).

Tabla 1. Valores de rugosidad en función de la pendiente. Fuente: Serrano y Ruiz Flaño (2007a).

Table 1. Values of rugosity dependent on the slope gradient according to Serrano and Ruiz Flaño (2007a).

Pendiente (°)	0-5	6-15	16-25	26-50	>50
Nivel de rugosidad	1	2	3	4	5

Tabla 2. Intervalos de categorías de geodiversidad. Fuente: Serrano y Ruiz Flaño (2007a).

Table 2. Levels of geodiversity categories according to Serrano and Ruiz Flaño (2007a).

Geodiversidad	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Intervalo	<15	15-25	25-35	35-45	>45

### 3.2. Método de valoración de la geodiversidad de Najwer *et al.* (2016)

El método de valoración de la geodiversidad propuesto por Najwer *et al.* (2016) es de tipo cualitativo-cuantitativo, utilizando el proceso de jerarquía analítica. En este método, cada variable del medio físico seleccionada para la valoración de la geodiversidad se representa cartográficamente, en modo ráster, en la matriz de celdas predefinida. A partir de la suma de cada uno de estos mapas mediante el álgebra de mapas, se obtiene el mapa final. Las variables analizadas en este estudio se resumen en la Tabla 3.

Cada una de las variables indicadas en la Tabla 3 es cartografiada de la siguiente manera:

- 1) Mapa litológico. Las litologías identificadas en la cartografía de la serie MAGNA50, a escala 1:50.000, de la Hoja de Lucena (Díaz de Neira *et al.*, 1991), se clasifican según sus grados de resistencia a la erosión. Siguiendo lo indicado por Najwer *et al.* (2016) se entiende que, a mayor grado de resistencia, hay mayores resaltes topográficos y el relieve presenta más rugosidad; por tanto, los procesos geomorfológicos son más activos generando un grado de geodiversidad más elevado. Cada celda recibe el valor de la litología que ocupa más superficie en dicha celda.
- 2) Mapa de altitudes relativas. El MDT con una resolución de 5x5 m se reclasifica para la obtención de 5 intervalos mediante el método de rupturas naturales. Cada

intervalo representa un valor de geodiversidad que se incrementa con la altitud, asignándosele a cada celda el valor del intervalo que ocupa una mayor superficie en dicha celda.

- 3) Mapa de fragmentación del paisaje. Este mapa se realiza siguiendo el método propuesto por Najwer *et al.* (2016), que se basa en el índice de posición topográfica (TPI), calculado a partir del MDT de 5x5 m. Basado en este MDT, se aplica la herramienta "Topography Tools" de ArcGIS, mediante la cual se obtienen automáticamente la clasificación indicada en la Tabla 3, según la posición topográfica que ocupa cada celda y su relación con respecto a las que la rodean: cimas o crestas, pendientes pronunciadas, pendientes medias, pendientes suaves, y valles y laderas bajas. El mapa resultante muestra valores continuos que se reclasifican según la desviación estándar de la pendiente, es decir, estos valores se calculan de modo local y no hay unos intervalos predefinidos. Este mapa expresa que aquellos sectores de mayor pendiente y altitud, van a presentar mayores niveles de geodiversidad.
- 4) Mapa de diversidad de elementos hidrográficos, que es el resultado de sumar, con el álgebra de mapas, otros tres mapas representando cada uno de ellos los lagos o láminas de agua, ríos y arroyos, y manantiales y surgencias.
- 5) Mapa de diversidad mesoclimática. Este mapa se obtiene de dos parámetros que

Tabla 3. Variables, fuentes de información y método de clasificación para la valoración de la geodiversidad según el método propuesto Najwer *et al.* (2016).Table 3. Variables, sources, and classification method for the geodiversity assessment according to the methodology proposed by Najwer *et al.* (2016).

VARIABLES	Fuente de datos	Método de clasificación	Tipo/Valor*	Nivel de Geodiversidad
Litología	(Díaz de Neira <i>et al.</i> , 1991)	Clasificación de expertos	Arcillas y margas radiolaríticas; margas azules y blancas; margas y arcillas versicolores con bloques y láminas de naturaleza y tamaño variado; suelos de alteración	Muy baja
			Arcillas versicolores, areniscas y yesos; areniscas y margas (turbiditas); margas blancas con areniscas; margas y margocalizas con niveles turbidíticos; margas y margocalizas, calizas tableadas y margas	Baja
			Depósitos aluviales; depósitos de ladera; rocas volcánicas básicas; terrazas;	Media
			Areniscas, margas y brechas; calcarenitas de microdium; calizas bioclásticas y calcarenitas; calizas margosas rosadas; calizas y margas, con niveles de conglomerados y calcarenita; conglomerados; travertinos	Alta
			Calizas grises con sílex; calizas grises y blancas; calizas nodulosas rojas; calizas oolíticas; calizas oquerosas y carniolas; dolomías tableadas negas; dolomías;	Muy alta
Altitud relativa	MDT 5x5 (IGN)	Clasificación automática por el método de rupturas naturales de Jenks (1967)	439,20-695,75 m	Muy baja
			695,76-837,3 m	Baja
			837,31-978,85 m	Media
			978,86-1.142,5 m	Alta
			1.142,51-1.567,2 m	Muy alta
Fragmentación del paisaje (TPI)	MDT 5x5 (IGN)	Clasificación semiautomática según la desviación estándar de la pendiente.	Fondos de valle y laderas bajas (<5%)	Muy baja
			Pendientes suaves (5-15%)	Baja
			Pendientes medias (15-25%)	Media
			Pendientes pronunciadas (25-45%)	Alta
			Crestas (>45%)	Muy alta
Elementos hidrográficos	Mapa de aguas subterráneas y de la Red Hidrográfica de Andalucía (REDIAM)	Clasificación automática y clasificación de expertos	Manantiales con zona de amortiguamiento de 150 metros	Baja
			Arroyos de 2º orden con zona de influencia de 100 metros	Media
			Arroyos de 1º orden con zona de influencia de 50 metros	Alta
Mesoclima	MDT 5x5 (IGN)	Clasificación automática con un método de rupturas naturales (Jenks, 1967) y manual (experto) Unidad: KW h m <sup>-2</sup>	TWI: 0 - 0,25; K: 0,2 - 3,9	Muy bajo
			TWI: 0,25 - 0,5; K: 3,9 - 4,8	Bajo
			TWI: 0,5 - 2; K: 4,8 - 5,5	Medio
			TWI: 2 - 8; K: 5,5 - 6,1	Alto
			TWI: 8 - 12; K: 6,1 - 7,2	Muy alto

Abreviaturas: TPI, Índice de posición topográfica; TWI, Índice de humedad topográfico; K (KWh m<sup>-2</sup>), Insolación total.

(\*) los tipos de litologías y valores de cada variable indicados en esta columna se refieren a la zona de estudio de este trabajo.

resultan de las condiciones micro-climáticas y topo-climáticas del ENP; en concreto, es el resultado del cálculo del índice de humedad topográfica (TWI) y de la insolación total recibida, respectivamente. El TWI localiza, mediante el análisis de las direcciones de flujo basado en el MDT de 5x5 m, las zonas de mayor potencial para la acumulación de la humedad o del agua superficial. Su cálculo se realizó con la herramienta "Arc Hydro Tools para ArcGis" y los valores obtenidos se reclasificaron en 5 intervalos por el método de clasificación manual. Por otro lado, el mapa de insolación total se confeccionó con la herramienta "Solar Radiation para ArcGis", con la que se obtuvo la radiación solar para la fecha del equinoccio, representándose también su variabilidad espacial según 5 intervalos por el método de rupturas naturales. La suma de ambos mapas genera el mapa de diversidad mesoclimática, en el cual, a mayores valores de TWI y de radiación solar, mayor nivel de geodiversidad.

Una vez obtenidos los cinco mapas de las variables consideradas y utilizando el proceso de jerarquía analítica, se calculan el peso ponderado que van a tener dichos mapas sobre el mapa final de nivel de geodiversidad del ENP, según el impacto o influencia que tenga cada uno en la misma mediante una clasificación de expertos. Teniendo en cuenta las características geológicas y geomorfológicas del ENP, los pesos de cada variable fueron los siguientes: litología, 30%; altitud relativa, 20%; fragmentación del paisaje, 20%; elementos hidrológicos, 20%; condiciones meso-climáticos, 10%. Esta suma se aplica con la herramienta "Overlay-Weighted Sum para ArcGis" y posteriormente se vuelve a reclasificar el resultado en cinco intervalos por el método de rupturas naturales, obteniendo el mapa final de nivel de geodiversidad (muy alta, alta, media, baja y muy baja).

### 3.3. Método de valoración de la geodiversidad de Araujo y Pereira (2018)

El método propuesto por Araujo y Pereira (2018) también utiliza un proceso de álgebra

de mapas para la valoración de la geodiversidad. De modo similar al método anterior, el mapa final se obtiene a partir de la suma de otros seis, derivados de cada una de las variables consideradas en dicho método. Cada una de estas variables se clasifica en cinco grupos mediante el método de rupturas naturales de Jenks (1967), como en los métodos anteriores. Cada una de dichas variables se enumeran y se contabilizan en cada celda. Una vez obtenido el valor total de cada variable en cada una de las celdas, se suman los seis mapas que representaban cada variable, obteniéndose al final un valor de geodiversidad. Las variables utilizadas fueron las siguientes:

- 1) Número de litologías diferentes por celda, obtenidas de la cartografía de la serie MAGNA50, a escala 1:50.000, de la Hoja de Lucena (Díaz de Neira *et al.*, 1991).
- 2) Número de unidades geomorfológicas según el mapa de unidades geomorfológicas de Andalucía, E=1:400.000 (Fuente: REDIAM).
- 3) Número de tipos de suelos, a partir del mapa de suelos de Andalucía 1:400.000 (Fuente: REDIAM).
- 4) Número de recursos energéticos minerales y geológicos, obtenidos de la cartografía de la serie MAGNA50, a escala 1:50.000, de la Hoja de Lucena. Para esto, se realizó un análisis de los usos dados a las litologías existentes en cada celda. Según esto, dos litologías se utilizaban como recurso y eran extraídas en canteras: calizas oolíticas, con fines ornamentales, y dolomías, para construcción. En este caso, para generar su mapa correspondiente, se optó por asignar un valor de 1 a la celda que contuviese alguno de estos dos tipos de litología y 0 a las que no incluía ninguna de ellas.
- 5) Presencia de fósiles. A partir de la cartografía de la serie MAGNA50, a escala 1:50.000, de la Hoja de Lucena y de la consulta a los técnicos del ENP, se contabilizaron el número de especies de fósiles encontradas para cada litología. Poste-

riormente, se sumaron el total de especies para cada celda y se reclasificaron en 5 intervalos.

- 6) Abundancia de recursos hídricos. Este mapa resultó de la suma de tres variables, a su vez reclasificadas en cinco intervalos por el método de rupturas naturales: i) pluviometría (valor medio de precipitación anual de cada celda, obtenido a partir del mapa de precipitación media anual (Fuente: REDIAM); ii) flujo específico de aguas subterráneas, a partir del MAGNA50 (IGME), se clasificaron las litologías en cinco intervalos, en función de la capacidad de percolación de cada una siguiendo un criterio experto; y iii) jerarquía de las corrientes fluviales, basado en el mapa de la red hidrográfica y atendiendo a la jerarquía diseñada por Strahler (1957), de modo que los valores de las celdas son de 1 para los arroyos de primer orden y 2 para los de segundo orden (no había corrientes de mayor orden en el ENP).

En cada una de las variables, los mayores valores cuantificados indicaban una mayor aportación de dicha variable a la valoración de la geodiversidad, de modo que, finalmente, cuanto mayor fue el resultado de la suma, mayor la valoración de la geodiversidad. Una vez sumados todos los mapas, los valores de geodiversidad se reclasificaron en cinco intervalos, como en ocasiones anteriores, para obtener cinco niveles de valoración y hacerlo comparable a los dos métodos anteriores.

#### 4. Resultados y discusión

Antes de la aplicación de los tres métodos de valoración de la geodiversidad seleccionados en el ENP, uno de los aspectos determinantes de este trabajo fue encontrar la dimensión espacial adecuada que permitiera la comparación de los mismos. La utilización de la propia malla de cuadrícula del Mapa Topográfico Nacional 1:50.000 permitió realizar una aproximación adecuada al ENP y la disponibilidad de información de las variables utilizadas por cada método, además de suponer una esca-

la de trabajo adecuada para la gestión territorial. Así, la división del ENP con una malla de celdas de 500x500 m permitió realizar de modo adecuado el inventario de las variables empleadas por cada método, a partir de recursos cartográficos publicados por distintos organismos públicos, que son aquellos con los que los gestores de los ENP en Andalucía trabajan. Además, la representación espacial de cada una de esas variables, así como el resultado final de la valoración de la geodiversidad, clasificada en cinco categorías, para cada método, permitió también la comparación entre ellos de modo intuitivo y de fácil comprensión y aplicación para la gestión del ENP y geoparque. A continuación, se describen los resultados obtenidos para cada método.

La aplicación del índice de geodiversidad de Serrano y Ruiz Flaño (2007a) dio como resultado un mapa de categorías de geodiversidad que presentaba una alta variabilidad espacial (Figura 5). Según este método, más del 53% del ENP obtuvo una categoría baja o muy baja, coincidiendo con las zonas más llanas y alomadas, donde la diversidad de los elementos físicos era también escasa. Según este método, aquellas zonas con mayores valores de rugosidad, quedaron clasificadas en categorías de geodiversidad mayores (7,5% de la superficie del ENP). De este modo, las fuertes pendientes de las laderas en las sierras de la mitad sur (Horconera, La Tiñosa, Rute, Los Pollos y Gallinera), junto a las abruptas laderas del frente de cabalgamiento, en el sector norte, reúnen casi todas las celdas de categoría alta y muy alta. Al contrario, áreas de muy poca pendiente, como el fondo de los poljes o pequeños rellanos y glaciares de poca inclinación, presentaron categorías muy baja o baja. En este sentido, cabe reseñar que los propios autores del índice indicaban la necesidad de paliar el efecto de la rugosidad, dado que puede exagerar el peso de las vertientes de mayor pendiente en el valor final de geodiversidad (Serrano y Ruiz Flaño, 2007a, 2007b).

En del método de Najwer *et al.* (2016), la valoración de la geodiversidad no se realiza mediante el cálculo de un índice, sino me-

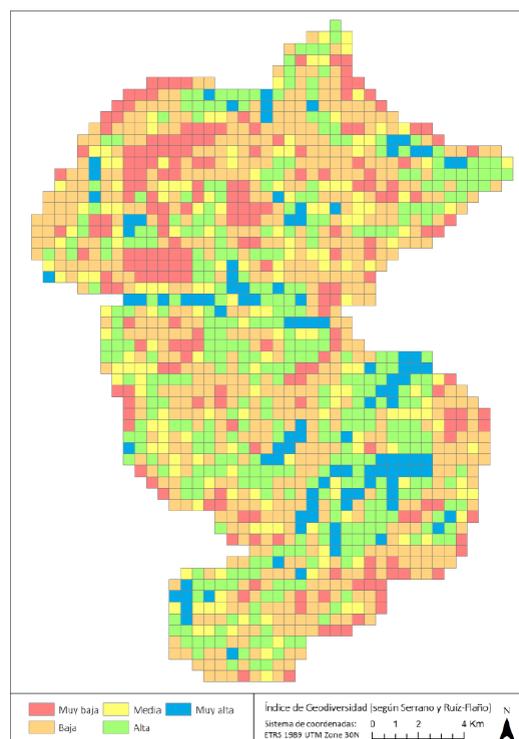


Figura 5: Mapa de valoración de la geodiversidad según el índice de geodiversidad de Serrano y Ruiz Flaño (2007a).

Figure 5: Map of geodiversity according to the geodiversity index (Serrano and Ruiz Flaño, 2007a).

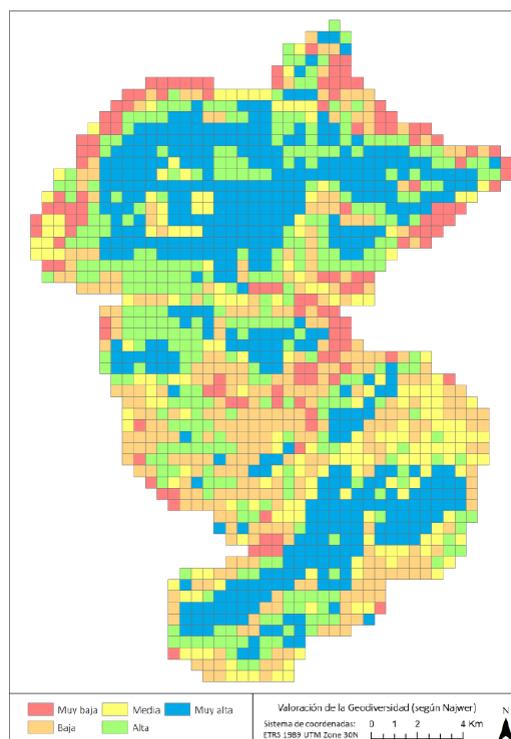


Figura 6: Mapa de valoración de la geodiversidad según el método de Najwer et al. (2016).

Figure 6: Map of geodiversity according to the method proposed by Najwer et al. (2016).

diente un método semicuantitativo, utilizando el proceso de jerarquía analítica. Este proceso se utiliza en numerosas disciplinas científicas con la finalidad de tomar decisiones complejas, con una base de criterios establecida mediante un sistema de experto. El método tiene la ventaja de poder integrar datos tanto de fuentes directas como indirectas, combinando las dos aproximaciones de evaluación de la geodiversidad, de carácter cuantitativo, por un lado, y cualitativo por otro (Zwoliński et al., 2018). Sin embargo, se trata de un método con una cierta carga de subjetividad porque en el resultado final cada variable tiene un peso ponderado según el criterio del experto. Así, el valor de la geodiversidad dependió de la abundancia/ausencia de los elementos del medio físico que fueron cuantificados para obtener el va-

lor final, pues a mayor número de elementos físicos inventariados por celda, mayor fue el valor de geodiversidad. No obstante, como en el método de Serrano y Ruiz Flaño (2007a), la influencia de la rugosidad del terreno en la valoración final de la geodiversidad puede verse sobredimensionada.

El mapa final de valoración de la geodiversidad por este método reflejó un mayor número de celdas de categoría alta y muy alta, superando entre ambas el 50% del territorio del ENP (Figura 6). Estas celdas se localizaron preferentemente en las zonas de mayor diversidad litológica y presencia de litologías más resistentes a la erosión, las de mayor altitud y, en menor medida, aquellas donde las unidades fisiográficas de paisaje eran más variadas. Así, tanto el macizo de Cabra,

en el sector norte del ENP, como las laderas fuertemente inclinadas de las sierras del sector sur, concentraron la mayor parte de los valores más elevados de geodiversidad. En estos valores finales, fueron muy poco influyentes tanto los elementos hidrográficos, no muy abundantes en el territorio del ENP, como las condiciones mesoclimáticas, dada la homogeneidad de estas en todo el ENP según los datos climáticos disponibles. En este sentido, habría que señalar que, por un lado, se debería revisar en detalle los elementos hidrográficos a considerar en el inventario dentro del ENP y, por otro lado, habría de tenerse en cuenta que espacios con una mejor red de estaciones meteorológicas, con mediciones durante un periodo de tiempo adecuado, podrían ser evaluados mejor desde el punto de vista de los efectos meso-climáticos sobre su geodiversidad. Ello podría poner en duda la utilidad de estas variables en la valoración de la geodiversidad por este método.

Según Najwer *et al.* (2016), la aplicación de este método permite determinar directrices para la ordenación y gestión de espacios de gran valor natural y su uso por el geoturismo. En combinación con otras valoraciones de la biodiversidad, este método también serviría para delimitar nuevos lugares del medio natural para su preservación, además, de poner de relieve que se trata de una herramienta de aplicación universal. Sin embargo, en el caso de su aplicación al ENP y Geoparque de las Sierras Subbéticas, el método obvia algunos aspectos claves que explican su catalogación como tal: por ejemplo, la importancia de la presencia de litologías ricas en fósiles, la variedad de procesos geomorfológicos, a veces, en terrenos de no muy elevada pendiente, como la presencia de cárcavas.

En último lugar, se aplicó el método de valoración de la geodiversidad propuesto por Araujo y Pereira (2018), cuyo resultado resultó ser más preciso, permitió ser verificado fácilmente en campo, constituyendo un método aplicable a territorios con diferentes

características físicas. El resultado, fruto de la superposición y álgebra de las capas raster, se muestra en la Figura 7. En este caso, los resultados se asemejaron más en cuanto a la variabilidad espacial de la geodiversidad obtenida por el índice de Serrano y Ruiz Flaño (2007a), que por el método de Najwer *et al.* (2016).

La variabilidad espacial del método de Araujo y Pereira (2018) era elevada y heterogénea, dando como resultado que el 53% del territorio del ENP presentaba una geodiversidad de categoría baja y muy baja, mientras que apenas el 5% lo clasificaba con una muy alta. Las celdas de mayor categoría quedaron circunscritas a aquellas que incorporaban una alta variedad de litologías y unidades geomorfológicas, con celdas que reunían hasta 10 y 5 tipos diferentes, respectivamente, además de variedad edáfica y riqueza de fósiles. Además, el papel jugado por la variable 'recursos hídricos' fue importante en la definición de celdas de categoría alta y muy alta. En ello, fue especialmente clave la presencia de materiales muy permeables que permiten el flujo subterráneo y, en menor medida, el volumen de precipitación anual. Al contrario, el orden jerárquico de los cursos fluviales influyó muy poco debido a la escasa variabilidad y bajos valores de órdenes en el ENP. No obstante, el menor efecto sobre la geodiversidad lo ostentó la variable 'recursos energéticos, minerales y geológicos'; tan solo aquellas celdas con presencia de extracción de áridos influyeron en el resultado final, pero de un modo poco destacable. De este modo, las áreas de mayor geodiversidad según este método se localizaron en la Sierra de Los Pollos, sectores aislados del macizo de Cabra y algunas vertientes más escarpadas de la Sierras de Horconera y de Rute.

Los resultados arrojados por la aplicación de este método estuvieron influidos por la consideración de dos variables no asumidas por los métodos anteriores. Por un lado, la precipitación anual se incluye como una variable más: el volumen de agua recogido en un territorio marca la magnitud e intensidad de algunos

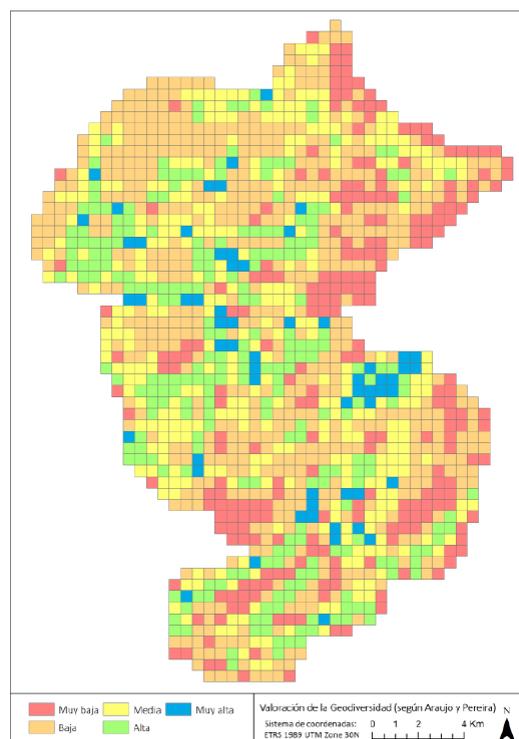


Figura 7: Mapa de valoración de la geodiversidad según el método de Araujo y Pereira (2018).

Figure 7: Map of geodiversity according to the method proposed by Araujo and Pereira (2018).

procesos de meteorización y geomorfológicos, especialmente, los relacionados con la erosión y el transporte de sedimentos, o bien con la mayor abundancia de recursos hídricos en forma de surgencias y manantiales. La presencia de agua puede suponer una mayor ac-

tividad geomorfológica, especialmente, cuando las condiciones topográficas (desniveles y laderas de pendiente variables) y geológicas (presencia de roquedos permeables e impermeables), redundando todo en una geodiversidad de categoría mayor. Por otro lado, este método es el único de los tres que tiene en cuenta la presencia de fósiles, como un elemento físico que enriquece el carácter de la geodiversidad de un territorio. En el caso de estudio, el ENP y geoparque es rico en determinadas litologías con facies fosilíferas (*Ammonítico rosso*), por lo que la valoración de su geodiversidad se nutre positivamente de la consideración de dicha variable.

En comparación, los resultados obtenidos a partir de los tres métodos de valoración de la geodiversidad arrojan notables diferencias espaciales como se puede apreciar en la Tabla 4. Los métodos de Serrano y Ruiz Flaño (2007a) y Araujo y Pereira (2018) dieron unos resultados parecidos, las clasificaciones de muy baja y baja geodiversidad ocupaban cerca del 55% del territorio y la muy alta un 7% y un 5%, respectivamente, aunque en los valores medios y altos diferían levemente. Por el contrario, los resultados obtenidos por el método de Najwer *et al.* (2016) eran muy diferentes a los anteriores; en este caso la clasificación de muy alta geodiversidad ocupó el 32% del territorio, pasando al 55% si sumamos también el alta, mientras que la clasificación de muy baja y baja ocupa sólo el 32%, llegando sólo al 10% si nos quedamos con la clasificación de muy baja geodiversidad.

Tabla 4. Comparación de la superficie relativa ocupada por cada valoración de geodiversidad obtenida con cada método de valoración aplicado.

Table 4. Comparison of the area occupied by each geodiversity value considering the method for geodiversity assessment.

Método	Valoración de geodiversidad				
	Muy baja (%)	Baja (%)	Media (%)	Alta (%)	Muy alta (%)
Najwer <i>et al.</i> (2016)	9,4	22,4	13,3	23,3	31,6
Serrano y Ruiz Flaño (2007a)	15,2	38,7	12,9	25,8	7,5
Araujo y Pereira (2018)	13,7	39,4	22,8	18,9	5,2

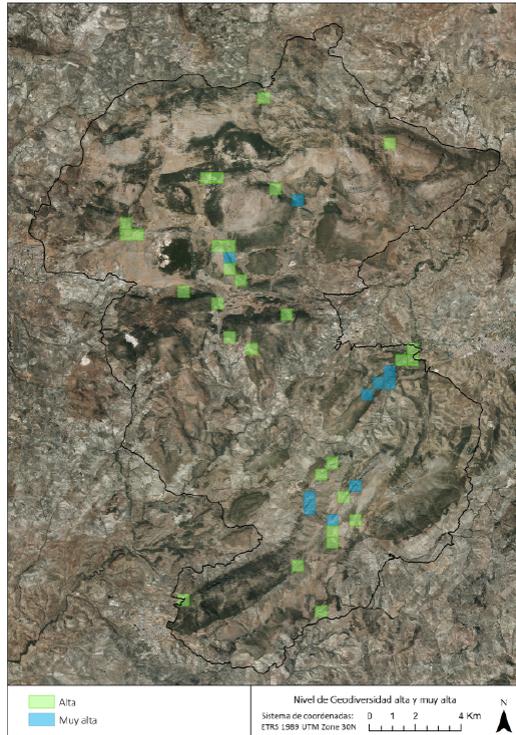


Figura 8: Localización de las celdas con valores altos y muy altos de geodiversidad coincidentes según los tres métodos de valoración de geodiversidad.

*Figure 8: Location of cells with high and very high geodiversity values after applying the three selected methods. Source: authors.*

La Figura 8 muestra las celdas en las que coinciden los valores altos y muy altos de geodiversidad por los tres métodos aplicados al ENP. Estas celdas coincidieron con aquellas porciones de territorio caracterizadas por: i) una topografía de laderas más bien escarpadas, con pendientes superiores a los 20° de inclinación; ii) un sustrato geológico con diferentes tipos de litologías, especialmente de tipo permeable que permitieran la presencia de recursos hídricos, en forma de surgencias o manantiales; iii) variedad morfogénica; y iv) por último, variable presencia bien de fósiles, bien de diferentes tipos de suelos.

La aplicación de los tres métodos en un mismo territorio arroja, por tanto, una notable variabilidad espacial y entre métodos. Si se

dan por buenas las variables que cada método necesita para ser aplicado, podría aducirse que el de Araujo y Pereira (2018) es el que un mayor grado de objetividad obtiene en el resultado final de la valoración de la geodiversidad, dado que consiste solo en una operación algebraica de suma de elementos que definen la geodiversidad de un territorio. Al contrario, los otros dos métodos podrían dar como resultados valoraciones menos objetivas: el índice de geodiversidad de Serrano y Ruiz Flaño (2007a) es también bastante objetivo, pero depende de la confección de un mapa geomorfológico, sujeto a interpretaciones de experto en algunas ocasiones; y el método de Najwer *et al.* (2016) es, quizás, el menos objetivo porque cada variable empleada se pondera según el peso que tiene dicha variable en la configuración territorial de la geodiversidad, lo cual depende del criterio del experto que lo aplica.

Por último, cabe reseñar desde un punto de vista metodológico, que los métodos seleccionados se han aplicado en un formato cartográfico de tipo ráster, en un entorno SIG, facilitando el conteo de variables por cada celda y, por tanto, la superposición y la aplicación del álgebra de mapas. Además, los métodos indirectos ofrecieron la posibilidad de evaluar y cartografiar la geodiversidad de grandes superficies y áreas de difícil acceso. Por lo general, la adquisición de datos de origen (imágenes satelitales, modelos digitales de elevación o nubes de puntos de elevación, capas vectoriales temáticas) tiene un coste bajo o nulo dado que buena parte de los geodatos utilizados son de acceso libre y gratuito en servidores webs de diferentes administraciones públicas españolas. Sin embargo, su correcto procesamiento y análisis no es tan simple como en el caso de los métodos directos y, en algunos casos, la escala espacial de origen, a veces demasiado pequeña, de las capas vectoriales temáticas limita bastante conseguir unos resultados más afinados y ajustados a la variabilidad real territorial de las variables utilizadas en cada método. Por ello, la aplicación metodológica realizada en el ENP selecciona-

do para valorar la variabilidad espacial de su geodiversidad se vería reforzada con la confección de un mapa geomorfológico de mayor detalle (en proceso actualmente), el inventario de campo más pormenorizado de la presencia de recursos hídricos (surgencias y fuentes) y de la abundancia o concentración espacial de fósiles, y de una información climática más detallada que ofreciera mejor información mesoclimática. No obstante, dicho mapa geomorfológico sólo es exclusivamente necesario para una aplicación completa del método de Serrano y Ruiz Flaño (2007a), no siendo así en los otros dos métodos aplicados. En general, puede decirse que para los tres métodos existen fuentes de información y cartográficas de suficiente calidad para obtener una valoración aproximada de la geodiversidad para el caso de estudio presentado; sin embargo, debe trabajarse aún más algunas de las variables que utilizan estos métodos a fin de conseguir una representación espacial más fidedigna de las mismas, como es el caso del ya mencionado mapa geomorfológico.

## 5. Conclusiones

Este trabajo se ha realizado en el Parque Natural y Geoparque de las Sierras Subbéticas, situado en el sur de la Península Ibérica, con el propósito de valorar su geodiversidad mediante la aplicación de tres métodos basados en el álgebra de mapas y el criterio de experto, permitiendo comparar los resultados de sus aplicaciones al territorio en cuestión. En los tres métodos, los resultados ofrecen una gran variabilidad espacial en cuanto a la categorización de la geodiversidad en el ENP; dos de ellos coincidían bastante en los valores altos y muy altos de geodiversidad. En general, las categorías de más alta geodiversidad se registraron en aquellas áreas donde coincidían laderas muy inclinadas, con gran diversidad de litologías y morfogénesis. Sin embargo, aquellas áreas donde se registró una cierta concentración de elementos físicos, con remarcada influencia para la declaración como geoparque del ENP, quedaron en geopar-

ral englobadas en categorías medias y bajas de geodiversidad (por ejemplo, aquellas celdas ricas en fósiles de *ammonítico rosso*). A pesar de ello, la valoración conjunta mediante la aplicación de los tres métodos seleccionados podría suponer una buena herramienta para la gestión y ordenación de los usos del ENP y geoparque, si bien sería aconsejable seguir explorando el desarrollo de métodos más completos y de fácil aplicación, que den productos cartográficos adecuados para la gestión de este tipo de territorios. A ello debería sumarse la confección de una cartografía geomorfológica detallada de los territorios a valorar.

## Agradecimientos

Este trabajo de Investigación ha sido posible gracias a la financiación del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte por medio de una beca de iniciación en la investigación para alumnos de grado de último curso. Los autores también agradecen la colaboración de todo el personal de la Consejería de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Sostenible, del Parque Natural y Geoparque de las Sierras Subbéticas y, en concreto, a su director-conservador, D. Antonio García Jiménez, así como al resto de técnicos y agentes de medio ambiente que desarrollan su actividad en el espacio natural protegido.

## Bibliografía

- Araujo, A.M.; Pereira, D.I. (2018). A new methodological contribution for the geodiversity assessment: applicability to Ceará State (Brazil). *Geoheritage*, 10 (4), 591-605. <https://doi.org/10.1007/s12371-017-0250-3>
- Brilha, J.; Gray, M.; Pereira, D.I.; Pereira, P. (2018). Geodiversity: An integrative review as a contribution to the sustainable management of the whole of nature. *Environmental Science & Policy*, 86, 19-28. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.05.001>
- Carcavilla, L.; López-Martínez, J.; Durán, J.J. (2007). *Patrimonio geológico y geodiversidad: investigación, conservación, gestión y relación con los espacios naturales protegidos*. Serie de

- Cuadernos del Museo Geominero nº 7, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 360 pp.
- Díaz de Neira, J.A.; Enrile Albir, A.; Hernáiz Huerta, P.P.; López Olmedo, F. (1991). Memoria de la Hoja nº 989 (Lucena). Mapa Geológico E. 1:50.000 (MAGNA), Primera edición, IGME, Madrid, 52 pp.
- Gómez-Zotano, J.; Alcántara-Manzanares, J.; Olmedo-Cobo, J.A.; Martínez-Ibarra, E. (2015). La sistematización del clima mediterráneo: identificación, clasificación y caracterización climática de Andalucía (España). *Revista de Geografía Norte Grande*, 61, 161-180. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022015000200009>
- Gray, M. (2004). *Geodiversity: Valuing and Conserving Abiotic Nature*. Wiley Blackwell. Chichester, 434 pp.
- Hjort, J.; Luoto, M. (2012). Can geodiversity be predicted from space? *Geomorphology*, 153-154, 74-80. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.02.010>
- Jens, G.F. (1967). The Data Model Concept in Statistical Mapping. *International Yearbook of Cartography*, 7, 186-190.
- Martínez-Graña, A.M.; Legoinha, P.; González-Delgado, J.A.; Dabrio, C.J.; Pais, J.; Goy, J.L.; Zazo, C.; Civis, J.; Armenteros, I.; Alonso-Gavilan, G.; Dias, R.; Cunha, T. (2017). Augmented Reality in a Hiking Tour of the Miocene Geoheritage of the Central Algarve Cliffs (Portugal). *Geoheritage*, 9, 121-131. <https://doi.org/10.1007/s12371-016-0182-3>
- Molina, J.M.; Ruiz-Ortiz, P.A.; Vera, J.A. (1999). A review of polyphase karstification in extensional tectonic regimes: Jurassic and Cretaceous examples, Betic Cordillera, southern Spain. *Sedimentary Geology*, 129(1-2), 71-84. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(99\)00089-5](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(99)00089-5)
- Najwer, A.; Borysiak, J.; Gudowicz, J.; Mazurek, M.; Zwolinski, Z. (2016). Geodiversity and Biodiversity of the Postglacial Landscape (Dębnica River Catchment, Poland). *Quaestiones Geographicae*, 35 (1). <https://doi.org/10.1515/quageo-2016-0001>
- Pereira, D.I.; Pereira, P.; Brilha, J.; Santos, L. (2013). Geodiversity assessment of Paraná State (Brazil): an innovative approach. *Environmental Management*, 52 (3), 541-552. <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0100-2>
- Pellitero, R.; Manosso, F.C.; Serrano, E. (2015). Mid- and large-scale geodiversity calculation in Fuentes Carrionas (NW Spain) and Serra do Cadeado (Paraná, Brazil): methodology and application for land management. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 97 (2), 219-235. <https://doi.org/10.1111/geoa.12057>
- Sanz de Galdeano, C. (1973). *Geología de la transversal Jaén-Frailes (provincia de Jaén)*. Tesis doctoral, Universidad de Granada, Granada, 274 pp.
- Serrano, E.; Ruiz Flaño, P. (2007a). Geodiversidad: concepto, evaluación y aplicación territorial. El caso de Tiermes Caracena (Soria). *Boletín de la Asociación Española de Geografía*, 45, 79-98.
- Serrano, E.; Ruiz Flaño, P. (2007b). Geodiversity. A theoretical and applied concept. *Geographica Helvetica*, 62 (3), 140-147. <https://doi.org/10.5194/gh-62-140-2007>
- Serrano, E.; González Amuchastegui, M.J.; Ruiz Flaño, P.; González Trueba, J.J. (2009). Gestión ambiental y geomorfología: valoración de lugares de interés geomorfológico del Parque Natural de las Hoces del Alto Ebro y Rudrón. *Cuaternario y Geomorfología*, 23 (3-4), 65-82.
- Silva, J.P.; Pereira, D.I.; Aguiar, A.M.; Rodrigues, C. (2013). Geodiversity assessment of the Xingu drainage basin. *Journal of Maps*, 9 (2), 254-262. <https://doi.org/10.1080/17445647.2013.775085>
- Strahler, A.N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38 (6), 913-920. <https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>
- Torres, J.L.; Recio, J.M. (1994). Algunos nuevos rasgos geomorfológicos del Parque Natural de las Sierras Subbéticas (Córdoba). En: *Geomorfología en España: III Reunión de Geomorfología* (A. Gómez Villar; J.M. García Ruiz; J. Arnáez Vadillo, eds.). Sociedad Española de Geomorfología, Logroño, 413-426.
- UNESCO (2019). UNESCO Global Geoparks. <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/earth-sciences/unesco-global-geoparks/>. Último acceso: 22/10/2019.
- Zwoliński, Z.; Najwer, A.; Giardino, M. (2018). Methods for Assessing Geodiversity. En: *Geoheritage* (E. Reynard; J. Brilha, eds.). Elsevier, Amsterdam, 27-52. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809531-7.00002-2>

Recibido el 08 de noviembre de 2019  
Aceptado el 05 de abril de 2020