

ANÁLISIS DE LAS RELACIONES ECO-GEOMORFOLÓGICAS Y EDÁFICAS A LO LARGO DE UN TRANSECTO EN UN SECTOR DE ALTA MONTAÑA DEL PARQUE NACIONAL SIERRA DE LAS NIEVES

Analysis of eco-geomorphological and soil relationships along one longitudinal transect in a sector from the high mountain environment in Sierra de las Nieves National Park.

Juan F. Martínez-Murillo^{1,2*}, Mario Menjibar-Romero², David Carruana-Herrera^{1,2}, Paloma Hueso-González^{1,2}

¹ Laboratorio de Geomorfología y Suelos, Edificio de Investigación Ada Byron, Universidad de Málaga, Málaga, 29010, España.

² Departamento de Geografía, Campus de Teatinos, Universidad de Málaga, Málaga, 29010, España.

Identificador ORCID de los autores y e-mail

Juan F. Martínez-Murillo: <https://orcid.org/0000-0002-8963-0505>. E-mail: jfmmurillo@uma.es
Mario Menjibar-Romero: <https://orcid.org/0000-0001-9261-4445>. E-mail: mariomenjibar@uma.es
David Carruana-Herrera: <https://orcid.org/0000-0001-9753-5834>. E-mail: carruana@uma.es
Paloma Hueso-González: <https://orcid.org/0000-0002-2554-0041>. E-mail: phueso@uma.es

*Autor corresponsal: jfmmurillo@uma.es

Recibido: 02-02-2023. **Aceptado:** 29-11-2023. **Fecha de publicación on-line:** 30-01-2025

Citation/Cómo citar este artículo: Martínez-Murillo, J.F., Menjibar-Romero, M., Carruana-Herrera, D., Hueso-González, P. (2024). Análisis de las relaciones eco-geomorfológicas y edáficas a lo largo de un transecto en un sector de alta montaña del Parque Nacional Sierra de las Nieves. *Pirineos*, 179 e082. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2024.179.359>

RESUMEN: El Parque Nacional Sierra de las Nieves se sitúa en un espacio geográfico *hotspot* del cambio global. Este espacio presenta una gran variedad de paisajes eco-geomorfológicos, siendo el menos estudiado el situado por encima de 1.600 m.s.n.m., con rasgos bioclimáticos de alta montaña y uso humano prolongado. Este trabajo estudia las relaciones eco-geomorfológicas y edáficas en este sector, mediante la realización de un inventario eco-geomorfológico y muestreo y análisis de propiedades edáficas a lo largo de un transecto longitudinal, en una depresión de laderas calcáreas y presencia de cárcavas de fondo. Los resultados evidencian la falta de relación estadística entre las variables consideradas, lo que manifiesta la existencia de un patrón eco-geomorfológico que podría ser similar al de las islas de fertilidad, característica de ambientes semiáridos, a consecuencia de las condiciones bioclimáticas y el impacto del uso humano heredado. Este hallazgo deberá ser investigado con mayor detenimiento en futuros trabajos.

PALABRAS CLAVE: transecto; eco-geomorfología; suelos; alta montaña; Sierra de las Nieves.

ABSTRACT: The Sierra de las Nieves National Park is located in a geographical hotspot of global change. This area presents a great variety of eco-geomorphological landscapes, the least studied being the one located above 1,600 m.a.s.l., with bioclimatic features of high mountains and prolonged human use. This work studies the eco-geomorphological and soil relationships in this sector, by means of an eco-geomorphological inventory and sampling and analysis of soil properties along a longitudinal transect, in a depression of calcareous slopes and presence of gullies. The results show a lack of statistical relationship between the variables considered, which indicates the existence of an eco-geomorphological pattern that could be similar to that of the islands of fertility, characteristic of semi-arid environments, as a consequence of bioclimatic conditions and the impact of inherited human use. This finding should be further investigated in future work.

KEYWORDS: transect; eco-geomorphology; soil; high mountain; Sierra de las Nieves.

1. Introducción

Las áreas de montaña se definen principalmente por sus altitudes y pendientes del terreno, así como por la presencia de diferentes cinturones geo-ecológicos altitudinales (Troll, 1973; García-Ruiz *et al.*, 2015, 2020). A nivel mundial, el espacio geográfico considerado como ‘alta montaña’ abarca un 22 % de la superficie del planeta y es uno de los puntos calientes importantes de biodiversidad, además de ser la principal fuente de agua para los mayores ríos del mundo (Nadal-Romero *et al.*, 2019). Es crucial que la alta montaña continúe asegurando los servicios ecosistémicos que ofrece, especialmente en el contexto actual de cambio global, dado que se prevé que los recursos sean cada vez más escasos a consecuencia del cambio climático y el incremento de población (Mountain Partnership, 2014; Alifthan *et al.*, 2016; Egli & Poulénard, 2017). Dado que las áreas de montañas son áreas ricas en recursos (generalmente, de agua, minerales y comida), han suministrado cobijo para algunas de las civilizaciones humanas más antiguas y han sido utilizadas como territorios de caza para las sociedades cazadoras, los circuitos migratorios y la explotación estacional de recursos (Pargeter *et al.*, 2017; Pitblado, 2017). Los seres humanos se adaptaron a unas condiciones de vida difíciles en la montaña modificando el paisaje con propósitos agrícolas, por ejemplo, construyendo terrazas y bancales (Lasanta *et al.*, 2017; Tarolli, 2018) o ampliando los pastizales para pastoreo por medio del uso del fuego, lo que a la postre significaba cambios en la hidrodinámica de cuencas y vertientes (García-Ruiz *et al.*, 2021).

Los espacios de montaña cubren un amplio rango de variedad climática y ecológica en todo el planeta. Dado que se consideran una de las áreas más sensibles al cambio global (Nadal-Romero *et al.*, 2019), se pueden utilizar como perfectos laboratorios para el estudio de los efectos del cambio climático (Palomo, 2017). En este sentido, existen cada vez más evidencias acerca de que el

calentamiento global se amplifica con la altitud. Los ambientes de alta montaña están experimentando cambios más rápidos en temperatura que las regiones de menor altitud (Alexander *et al.*, 2018). Por ejemplo, el llamado Calentamiento Dependiente de la Altitud (Elevation-Dependent Warming) puede acelerar la tasa de cambio en los ecosistemas de montaña, la criosfera, los regímenes hidrológicos y la biodiversidad, originando cambios drásticos en el tipo y cubierta vegetal (Mountain Research Initiative EDW Working Group, 2015). En consecuencia, este proceso general estaría afectando a los procesos eco-geomorfológicos. Por ejemplo, uno de los impactos más importantes del cambio climático en las montañas es la reducción de la cubierta de nieve, lo que podría implicar a su vez una afección directa a la pedogénesis y las propiedades térmicas, hidrológicas, físicas y químicas de los suelos (López-Moreno *et al.*, 2017; Oliva *et al.*, 2017; Freppaz *et al.*, 2018). Además, al aumentar las temperaturas y ser más frecuente la falta de nieve, hay cambios en los ciclos de hielo-deshielo del suelo y en el comportamiento mecánico de este, incrementándose la producción de sedimentos y la erosión del suelo (Xie *et al.*, 2015).

En estos espacios de montaña, como apuntan Egli & Poulénard (2017), los suelos suelen ser normalmente de reciente desarrollo, pobres en espesor, pedregosos y de reducida fertilidad. Las bajas temperaturas limitan la actividad microbiológica y, por tanto, la formación de suelo. También, estos suelos son muy variables espacialmente a consecuencia de los cambios en la topografía. Por ejemplo, en laderas de umbría de la montaña mediterránea, los procesos de meteorización, la actividad biológica y el desarrollo vegetal y, por tanto, de edafización, son de mayor intensidad a consecuencia de una mayor disponibilidad de agua, que en laderas de solana (Ruiz-Sinoga *et al.*, 2010; Gabarrón-Galeote *et al.*, 2013). Los factores que afectan a la formación del suelo en montañas son muy dinámicos en el espacio y tiempo y, en algunos casos, con cambios rápidos como consecuencia de la propia

dinámica natural (por ejemplo, deslizamientos) o del impacto de la actividad humana (por ejemplo, un cambio de uso en el suelo), el cual incrementa la variabilidad en dicho proceso de formación en ambientes de montaña.

La fertilidad de los suelos decrece con la altitud. Las severas condiciones climáticas y los ciclos de hielo-deshielo reducen la estabilidad del suelo y la capacidad de retención hídrica. La altitud también reduce la capacidad de las plantas para enraizar y desarrollarse y, por tanto, el potencial de acumulación de materia orgánica (Egli & Poulencard, 2017). A pesar de estas condiciones difíciles, hay especies vegetales adaptadas a estas condiciones de montaña y son capaces de mitigar la erosión del suelo. El aclareo de vegetación en estos espacios tiene un impacto perjudicial extremo, dado que los procesos hidrológicos se activan con gran intensidad debido a la topografía. Como consecuencia de las severas condiciones (climáticas y topográficas), la tasa de formación del suelo en estos espacios montañosos es menor que en espacios situados a menor altitud (FAO, 2015).

En la Red Nacional de Parques Nacionales de España, son varios los espacios naturales protegidos por sus rasgos geoecológicos de media y alta montaña: Picos de Europa, Aigüestortes y Estany de Sant Maurici, Ordesa y Monte Perdido, Guadarrama, Gredos y Sierra Nevada (MITECO, 2023). A todos ellos se ha unido recientemente el de Sierra de las Nieves (PNSN, en adelante) (BOE, 2021). En él, la diversidad orográfica, geológica y climática se traduce en una profusa variedad de sistemas naturales. Tal como recoge la declaración del Parque Nacional Sierra de las Nieves (BOE, 2021), entre los sistemas naturales que la justifican, además de la presencia de bosques de abetales (pinsapos), se destaca el de “matorrales almohadillados espinosos y tomillares de pradera”, acompañados por *Quercus faginea* subsp. *alpestris* Boiss. (quejigal de alta montaña), un tipo de quejigo adaptado a las condiciones de alta montaña, características de su sector altitudinal más elevado.

La situación geográfica del PNSN, en una encrucijada biogeográfica, a caballo entre dos masas de agua de distinta naturaleza, como son el Mar Mediterráneo y el Océano Atlántico; y dos continentes muy contrastados: Europa y Asia. Esta circunstancia, junto al elevado gradiente altitudinal del PNSN, posibilita la existencia de ambientes climáticos muy diferentes, haciendo de este sector un laboratorio de campo para el estudio de los procesos geo-ambientales y las relaciones clima-sue-

lo-vegetación-procesos geomórficos. Por este motivo, el propósito de este trabajo es la caracterización de la variabilidad del sistema eco-geomorfológico en condiciones geo-ambientales de alta montaña mediterránea del PNSN, para lo cual se proponen los siguientes objetivos específicos: i) analizar las diferencias eco-geomorfológicas a lo largo del transecto y en profundidad; ii) determinar las relaciones que se establecen entre vegetación, suelos y procesos geomorfológicos a lo largo de dicho transecto; y iii) evaluar las implicaciones geo-ambientales que se derivan de dichas relaciones considerando el uso humano del área de estudio.

2. Materiales y Métodos

2.1 Área de estudio

El área de estudio se inserta en el sector altitudinal más elevado del PNSN, situado en el sector occidental de la Cordillera Bética, en la Serranía de Ronda (sur de España, Figura 1). El PNSN presenta una riqueza orográfica, geológica y climática que se traduce en una gran variedad de paisajes y sistemas naturales. Todos estos sistemas naturales han sido afectados y/o modelados por la acción humana a lo largo de siglos debido a la tala masiva para obtención de carbón vegetal y materia prima para construcción naval y por el pastoreo y el fuego. Ello introdujo cambios en la composición, fisionomía y estructura de la cubierta vegetal, en el sistema geomorfológico, especialmente, por la acción de las aguas de escorrentía superficial, y, por tanto, en los suelos que, en algunas zonas del espacio natural muestran graves procesos de degradación y desertificación (Delgado Peña *et al.*, 2021; Gómez Zotano & Olmedo Cobos, 2021; Menjíbar-Romero *et al.*, 2024).

El PNSN tiene un carácter eminentemente montañoso: su relieve oscila entre 1.000 y 1.919 m.s.n.m. en el pico La Torrecilla, y presenta una gran complejidad topográfica, geológica y geomorfológica. Esto que se resuelve en: profundos valles y barrancos en el sector meridional y oriental, con litologías peridotíticas y esquistosas dominantes; crestones serranos en los sectores septentrional y occidental, de roquedo básicamente calcáreo; y ambos articulados por un macizo sobrelevado y amesetado en el sector central, constituido también fundamentalmente por rocas calcáreas, afectadas por un fuerte diaclasamiento y procesos kársticos exógenos y endógenos, así como periglaciares (Delannoy, 1999; Menjíbar-Romero *et al.*, 2024).

Es en este macizo donde se sitúa el área experimental del estudio, el cual puede considerarse un espacio de alta montaña Mediterránea pues las condiciones bio-climáticas por encima de la cota de 1.600 m así lo atestiguan (Figura 2). Olme-

do-Cobo & Gómez-Zotano (2017) identifican en este espacio una variedad climática mediterránea de carácter semi-continental con ombroclima sub-húmedo-húmedo, con condiciones de alta montaña en las cumbres: régimen semi-continental hiper-húmedo cacuminal, superando 1.300 mm y⁻¹, es-



Figura 1. Localización y límites del Parque Nacional Sierra de las Nieves y vista general del sector de alta montaña. Foto: J.F. Martínez-Murillo.
 Figure 1. Location and geographical limits of the Sierra de las Nieves National Park and general view of the high mountain area. Photo: J.F. Martínez-Murillo.

pecialmente en las vertientes mejores expuestas a las masas de aire húmedas atlánticas, y menos de 9 °C de temperatura media anual, llegando a registrar temperaturas mínimas absolutas por debajo de -15 °C en los meses de invierno, en los fondos de vaguada y rellanos del este macizo. De este modo, aunque la altitud puede considerarse baja para catalogar este espacio como alta montaña, la conjunción de una serie de factores geográficos lo permite: las altitudes por encima de esos 1.600 m.s.n.m. ocupan una superficie de extensión suficiente para dar entidad orográfica de altiplanicie sobre elevada, abierta a la llegada de masas de aire subpolares, tanto marítimas del atlántico, como continentales del interior europeo; a ello contribuye la existencia de relieves con suficiente altitud que la separan de la cercana costa, reduciendo la influencia suavizadora de las temperaturas que ejerce frecuentemente el mar. Además, en el paisaje eco-geomorfológico, se observan evidencias que atestiguan este carácter de alta montaña: especies vegetales adaptadas a condiciones térmicas frías y vientos intensos

(arbustivas: *Bupleurum spinosum* Gouan, *Juniperus sabina* (sabina rastrera), *Erinacea anthyllis* L.; arbóreas: *Quercus faginea* subsp. *alpestris* Boiss.); en sectores menos expuestos al viento y con mayor espesor de suelo, crecen individuos aislados o en pequeños rodales de *Abies pinsapo* Clemente ex Boiss. pero sin alcanzar demasiada altura; y presencia de morfologías periglaciares, si bien en muchos casos son formas heredadas de periodos climáticos más fríos que el actual. Por ejemplo, son muy frecuentes los crecimientos de cristales e hielo entre grietas e, incluso, en superficie, en el regolito de materiales blandos.

2.2 Fuentes de información y variables

La Tabla 1 sintetiza las fuentes de información y tipos de datos utilizados para la realización de este trabajo. Por un lado, se utilizaron geodatos disponibles para descarga gratuita en webs públicas y geovisores, caso de variables topográficas,

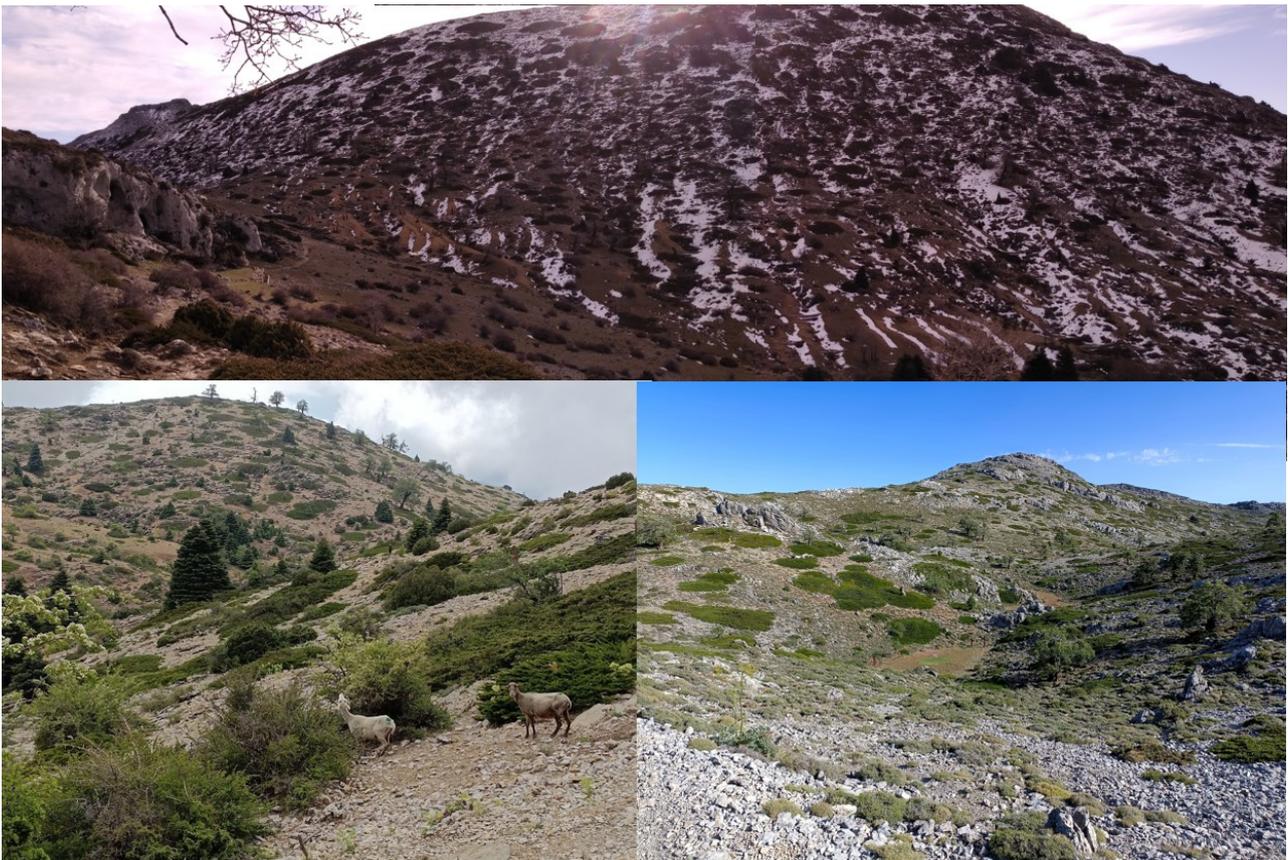


Figura 2. Detalles fotográficos del paisaje de alta montaña del Parque Nacional Sierra de las Nieves y de la zona experimental. Fotos: Juan F. Martínez-Murillo.

Figure 2. Photographs from the high mountain landscape in the Sierra de las Nieves National Park. Photos: Juan F. Martínez-Murillo.

Tabla 1. Fuentes de información y variables geo-ambientales.
 Table 1. Source of geo-environmental data.

Fuente	Tipo de información	Información	Productos
Centro Nacional de Descargas del IGN.	Cartográfica (capas ráster y vectoriales).	Modelo Digital del Terreno (5x5 m). PNOA 2018. PNOA Máxima actualidad.	-Altimetría. -Pendiente del terreno. -Procesos y geoformas. -Usos del suelo y coberturas vegetales.
Instituto Geológico y Minero de España.	Cartográfica (capa vectorial).	Cartografía geológica MAGNA50.	-Litología. -Procesos y geoformas.
Red de Información Ambiental de Andalucía.	Cartográfica (capas vectoriales).	Delimitación del Espacio Natural Protegido de Sierra de las Nieves, red hidrográfica, SIPNA (Sistema de Información sobre el Patrimonio Natural de Andalucía).	-Límite del Espacio Natural Protegido. -Red hidrográfica. -Usos del suelo y coberturas vegetales.
Bases de referencias bibliográficas.	Publicaciones científicas.	Información científica relativa al clima, vegetación y usos de la zona de estudio.	-Tipos de clima. -Usos del suelo y coberturas vegetales. -Geomorfología.
Trabajo de campo.	Cartográfica.	Verificación y revisión de la cartografía y resultados.	-Inventario eco-geomorfológico -Descripción de perfiles edáficos y toma de muestras de suelo.

geológicas y de usos y coberturas del suelo. Por otro lado, también se procedió a generar geodatos propios a partir de procedimientos cartográficos, de campo y de laboratorio.

2.2 Transecto e inventario eco-geomorfológico

En un sector de la zona de mayor elevación del parque nacional, conocida como Hoyas de Tolox, entre Puerto de Pilonos y el pico Torrecilla, con una altitud que oscila entre 1.650 y 1.750 m.s.n.m., se ha seleccionado una depresión, orientada y conectada con la red fluvial hacia el oeste. En esta depresión, se ha establecido un transecto longitudinal con dirección dominante NO-SE (Figura 3). A lo largo de este transecto, se han establecido 17 puntos de muestreo, en general, separados por 35 m, salvo aquéllos localizados en el fondo de la depresión. En este sector del transecto, no se respetó dicha distancia para poder obtener una información más detallada de la parte baja de la ladera, depósitos aluviales, cárcavas y cauce. A lo largo del transecto, se ha descrito la topografía (altitud, pendiente, orientación, distancia respecto a la divisoria, curvatura del terreno), cubierta vegetal (cobertura, tipo de cobertura y especies vegetales –arbustivas y arbóreas –), las condiciones superficiales de los suelos (presencia/ausencia de cubierta vegetal, pedregosidad superficial, grado de cubrimiento, en-

costramientos), y los procesos y geoformas actuales y heredados (tipología e intensidad).

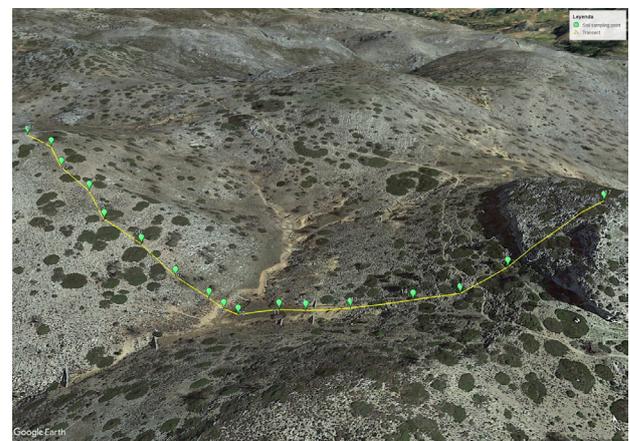


Figura 3. Trazado del transecto longitudinal y situación de los puntos de muestreo.
 Figure 3. Path of the longitudinal transect and location of sampling points.

2.3 Muestreo del suelo y analíticas en laboratorio

En 15 de los 17 puntos establecidos a lo largo del transecto (los puntos 01 y 17 estaban situados sobre afloramientos rocosos), se ha realizado, cuando el espesor del perfil y la roca madre lo han

permitido, un muestreo del suelo a varias profundidades: 0-10, 10-20 y 20-30 cm. En total, se han recogido 50 muestras alteradas. Posteriormente, en laboratorio, las muestras se secaron a temperatura ambiente durante 72 horas; posteriormente, se tamizaron a 2 mm para separar la fracción fina de la gruesa, la cual fue pesada para obtener el porcentaje de gravas. La fracción fina fue sometida a diferentes analíticas: color en seco y en húmedo; granulometría por difracción láser y clasificación textural; materia orgánica por calcinación en horno mufla y cálculo del carbono aplicando coeficiente 1,74; conductividad eléctrica (método de disolución en agua destilada 1:2 y medida en conductímetro); pH (método de disolución en agua destilada 1:2 y medida en pHmetro); carbonatos (método de calcímetro de Bertrand); contenido de nitrógeno; relación C/N; cationes (Ca, K, Mg y Na), capacidad de intercambio catiónico y saturación de bases (Bower *et al.*, 1952); estabilidad estructural de agregados >2 mm por tamizado en húmedo; y capacidad de retención hídrica en los estados hidrológicos de punto de marchitez y de capacidad de campo en membranas de presión.

2.4 Análisis estadístico

Para identificar si existían patrones espaciales de agrupación para los valores medidos de las propiedades del suelo analizadas, en relación a la posición ocupada en la ladera y la profundidad de muestreo, se ha aplicado un análisis de clúster o conglomerados. El análisis trata de agrupar la información de las 50 muestras de suelo en pequeños grupos o clúster homogéneos, para aquellos miembros de los grupos que presenten comportamientos similares (Jain, 2010). Concretamente, se utilizó el algoritmo de k-medias para el proceso de clusterización (*k-means clustering*) y, para determinar el número de grupos de una manera cuantitativa, se empleó el método del codo o *Elbow Method* (Campesato, 2020). A continuación, se describe el algoritmo de k-medias utilizado (Carrasco, 2020):

i) Inicialización. Se define el número de grupos o clúster que se quiere obtener (K) y K-centroides aleatorios para el grupo de 50 muestras. En este sentido con el objetivo de identificar si existían diferencias entre la posición y la profundidad de las muestras en el transecto analizado, las variables utilizadas para el análisis de clúster fueron la profundidad y la posición en el transecto (Tabla 2).

Tabla 2. Variables consideradas para K-Medias.

Table 2. Variables considered for K-medias.

Posición ladera	Código	Profundidad (cm)	Código
Fondo de depresión	1	0-10	1
Ladera alta	2	10-20	2
Ladera baja	3	20-30	3
Ladera media	4	30-40	4
Talweg	5	40-50	5
		50-60	6
		60-70	7
		70-80	8
		80-90	9
		90-100	10

ii) Para cada muestra se calcula la distancia hacia todos los centroides y se asigna al grupo que tenga el centroide más cercano.

iii) Una vez agrupadas todas las muestras, se calculan nuevamente las posiciones de los K centroides, ubicándolos en el centro de cada grupo.

iv) Iteración: El algoritmo consiste en calcular la distancia del centroide y redistribuir todos los objetos hacia el centroide más cercano. Este proceso se repite hasta que los K centroides no cambian después de una iteración.

Para determinar el número óptimo de clústeres se utilizó el método Elbow, el cual consiste en la determinación de la inercia, a través de la ecuación:

$$Inercia = \sum_{i=0}^n ||x_i - \mu||^2$$

Donde,

X_i : corresponde al valor de caudal de la estación i
 μ : corresponde al valor del centroide del clúster perteneciente de la estación i

3. Resultados

3.1 Características eco-geomorfológicas del transecto longitudinal

El transecto tiene una longitud total de 539 m, con unas altitudes máximas de 1.751 y 1.752 m.s.n.m en sus extremos y una altitud mínima de 1.683 m.s.n.m. en el fondo de la vaguada, el cual se encuentra a 267 y 272 m desde las cimas norte y sur, respectivamente. Su perfil longitudinal es de

forma convexo-rectilínea en su tramo sureste y cóncavo-rectilíneo-convexo en el oeste-noreste (Figura 4 y Tabla 3). Estos cambios de forma en el perfil se corresponden con cambios en la pendiente, la

cual oscila de menos del 2 % en la cima norte y en el fondo de vaguada, a algo más del 40 % en el tramo de solana a mitad de ladera (punto 04).



Figura 4. Esquema eco-geomorfológico del transecto. Fuente: Elaboración propia en Google Earth Pro y trabajo de campo.
Figure 4. Eco-geomorphological sketch of the transect. Source: own elaboration based on Google Earth Pro and field survey.

Desde el punto de vista geológico, el transecto recorre un espacio fundamentalmente de sustrato calizo (en concreto, calizas con sílex) en la ladera sureste hasta su pie y en el sector medio de la ladera oeste-noroeste. También, son reconocibles otras litologías: en el fondo de la vaguada, donde se observa la existencia de una formación cuaternaria, de depósito aluvial; al pie de ladera oeste-noroeste, hay una formación margoso-esquistosa pardo amarillenta; y en la cima de esta última ladera donde aflora en forma de promontorio rocosa la formación de la brecha de la Nava. El transecto se sitúa en una depresión kárstica, probablemente en el pasado endorreica (como otras similares existentes en las cercanías), pero actualmente incorporada a la red fluvial principal (río Verde, que desemboca directamente al mar de Alborán).

Sin embargo, debido a las diferentes crisis climáticas cuaternarias y cambios en la cubierta vegetal, hoy en día no queda nada de ese paisaje eco-geomorfológico. Bajo un potente perfil edáfico, debido a la corrosión de las calizas, se formaron lapiares, los cuales afloran en las laderas del transecto, si bien se encuentran muy erosionados y desfigurados respecto a lo que debió ser su aspecto original. El fondo de la depresión aparece surcado por una cárcava de fondo de valle, con una amplitud de 8 m en el sector atravesado por el transecto. Esta cárcava, con fondo plano, está encajada en materiales aluviales depositados probablemente de modo posterior a la eliminación del potente perfil edáfico terciario, en un proceso de erosión hídrica muy acentuado. No obstante, este proceso erosivo se encuentra actualmente controlado por diques

construidos en la red de cárcavas, incluida la que atraviesa el transecto; buena parte de estos diques están aún sin colmatar.

Entre el depósito aluvial y el pie de la ladera W-NW aflora la formación margoso-esquistosa antes mencionada, cuyo regolito es objeto de los procesos de meteorización que controlan las morfologías de tipo badlands a lo largo del año en alta montaña: formación de *popcorn* en invierno con las heladas, encostramientos en otoño y primavera por efecto del impacto de las gotas de lluvia, los cuales se ven acompañados por micro-deslizamientos (*mudflows*) en condiciones de saturación del regolito, y en verano, por efecto del proceso de secado, la superficie del regolito se desestructura y queda suelta en su superficie. En la zona alta de esta ladera, se desarrolla un promontorio rocoso, limitado por un cantil de elevada pendiente, a cuyo pie se acumulan bloques heterométricos caídos por gravedad. Por último, especialmente en la ladera W-NW del transecto, se observan fragmentos rocosos calizos dispuestos en superficie, que favorecidos por su propia disposición en lascas centimétricas, son fruto de procesos periglaciares de gelifración.

La cubierta vegetal, observada a lo largo del transecto, es sobre todo de tipo matorral y pastizal, mientras que el arbolado está más presente en la ladera W-NW; en conjunto el paisaje es teselado, con alternancia espacial de teselas de vegetación y suelo desnudo o roquedo (Figura 5). El grado de cubierta vegetal está por término medio entre el 25-50 % en la ladera W-NW y del 10 al 25 % en la ladera SE. Las especies vegetales de porte arbustivo, adaptadas a las condiciones de frío y

Tabla 3. Rasgos ecogeomorfológicos de los puntos de muestro a lo largo del transecto. Abreviaciones: P, punto de muestreo; PT, posición topográfica; A, altitud (m.s.n.m.); Pte, pendiente (%); O, orientación; DD, distancia a divisoria (m); L, litología; CV, cubierta vegetal (%); CSS, componentes superficiales del suelo; G, geoforma; PE, proceso erosivo dominante.

Table 3. Ecogeomorphological features of the sampling points located along the transect. Abbreviations: P, sampling point; PT, topographic position; A, altitude (m.a.s.l.); Pte, slope gradient (%); O, aspect; DD, distance to water divisor; L, lithology; CV, vegetation cover (%); CSS, soil surface component; G, landform relief; PE, dominant erosive process.

P	PT	A	Pte	O	DD	L	CV	CSS	G	PE
01	Cima	1751	1,5	Llano	0	Calizas	10-25	Afloramientos rocosos	Cima convexa	Disolución (baja)
02	Ladera alta	1747	22,8	SE	35		10-25	Plantas anuales, suelo con pedregosidad superficial 20-70% no embebida.	Ladera rectilínea	Erosión hídrica (baja)
03	Ladera alta	1739	24,7	SE	70	Calizas	10-25	Plantas anuales, suelo con pedregosidad superficial 20-70% no embebida.	Ladera rectilínea	Erosión hídrica (baja)
04	Ladera media	1728	34,3	SE	105	Calizas	10-25	Suelo con pedregosidad superficial >70% no embebida, plantas anuales.	Ladera rectilínea	Erosión hídrica (baja)
05	Ladera media	1718	32,4	SE	140	Calizas	25-50	Suelo con pedregosidad superficial >70% no embebida, plantas anuales.	Ladera rectilínea	Erosión hídrica (media)
06	Ladera media	1707	43,7	SE	175	Calizas	50-75	Suelo con pedregosidad superficial >70% parcialmente embebida, plantas anuales.	Ladera rectilínea	Erosión hídrica (media)
07	Ladera baja	1695	37,9	SE	210	Calizas	10-25	Plantas anuales, suelo con pedregosidad superficial 20-70% no embebida.	Ladera rectilínea	Erosión hídrica (baja)
08	Ladera baja	1687	25,7	SE	245	Calizas	0-10	Plantas anuales, suelo con pedregosidad 20-70% parcialmente embebida en la superficie.	Ladera cóncava	Erosión hídrica (alta)
09	Talweg	1683	2,0	Llano	267	Aluvial	0-10	Superficie desnuda, <20% pedregosidad superficial, encostramientos <20%	Cauce	Incisión fluvial
10	Fondo de depresión	1685	8,7	ONO	260	Aluvial	10-25	Plantas anuales, suelo con pedregosidad superficial <20% no embebida.	Terraza aluvial	Sedimentación
11	Fondo de depresión	1686	13,6	ONO	225	Aluvial	25-50	Plantas anuales, musgo.	Terraza aluvial	Sedimentación
12	Ladera baja	1687	14,3	ONO	205	Aluvial	10-25	Plantas anuales, suelo con pedregosidad superficial <20% no embebida.	Cárcava	Sedimentación
13	Ladera baja	1691	28,8	ONO	175	Margas	0-10	Regolito cubierto de >70% pedregosidad superficial no embebida.	Cárcava	Erosión hídrica (alta)
14	Ladera media	1701	36,4	ONO	140	Calizas	75-100	Suelo con pedregosidad superficial 20-70% no embebida, plantas anuales.	Ladera rectilínea	Erosión hídrica (baja)
15	Ladera media	1709	35,3	ONO	105	Calizas	25-50	Plantas anuales, suelo con pedregosidad <20% sobre la superficie.	Ladera rectilínea	Erosión hídrica (baja)
16	Ladera alta	1720	42,0	ONO	70	Calizas	75-100	Hojarasca, plantas anuales, suelo con pedregosidad superficial <20% no embebida	Ladera rectilínea	Erosión hídrica (baja)
17	Cima	1752	16,7	Llano	0	Calizas	75-100	Afloramientos rocosos	Cima convexa	Disolución (baja)

viento, son las más abundantes, destacando *Bupleurum spinosum*, *Juniperus sabina* y *Lavandula lanata*. Aunque hay individuos de *Abies pinsapo* Clemente ex Boiss. en las cercanías del transecto, a lo largo de este, el estrato arbóreo está representado por *Quercus faginea* subsp. *alpestris*. También es destacable la presencia del estrato herbáceo, con pastizales de *Poa ligulata* bien desarrollados, en especial en la ladera SE y en la terraza aluvial del fondo de la depresión.

Los suelos son, en general, de escaso espesor edáfico, muy limitados por la cercanía a superficie de la roca madre calcárea, con la cual suelen compartir un límite neto. Las condiciones superficiales que ofrecen denotan procesos erosivos hídricos que debieron ser más activos en el pasado reciente, en etapas con mayor presión ganadera, la cual sigue en la actualidad, pero con menor número de cabezas de ganado ovino y caprino. Así, los suelos se caracterizan por una pedregosidad superficial notable, a veces superior al 70 % y embebida en superficie formando una costra continua con la fracción fina edáfica. Tan solo los suelos del depósito aluvial del fondo de la depresión, al permitirlo la topografía, se encuentran en un estado en el que dominan los elementos bióticos (plantas anuales herbáceas y musgo).

En general, podemos apuntar que la depresión atravesada por el transecto ha pasado por diferentes

estados eco-geomorfológicos. Así lo atestiguan las diferentes formas dejadas por procesos geomorfológicos hoy no activos o menos intensos, como consecuencia de cambios en las condiciones climáticas y en los usos del territorio (deforestación y presión ganadera). Actualmente, las condiciones eco-geomorfológicas atestiguan un predominio de la acción geomorfológica del agua, pero contenida, estando el sistema aparentemente en equilibrio, si bien un incremento en las presiones de tipo ganadero o de turismo de naturaleza (la depresión es atravesada por uno de los senderos oficiales más populares del Parque Nacional) puede generar un proceso de retroalimentación positiva hacia una mayor degradación de la cubierta vegetal y de las condiciones superficiales del suelo.

3.2 Características de los suelos a lo largo del transecto longitudinal y en profundidad

La Tabla 4 reúne los resultados de las analíticas llevadas a cabo con las muestras de suelo tomadas a lo largo del transecto y a diferentes profundidades, en cada uno de los puntos de muestreo. Los suelos muestran una baja variabilidad en cuanto a los colores en seco y en húmedo; tan solo en aquellos puntos donde el suelo presentaba más profundidad, con el desarrollo de horizontes, y en los



Figura 5. Vista del entorno del área experimental donde se aprecia la existencia de teselas de vegetación, de suelo desnudo/pastiza y de roquedo, conformando un paisaje en mosaico.

Figure 5. View of the surroundings of the experimental area showing the existence of patches of vegetation, bare soil/grassland and rock outcrops, forming a mosaic landscape.

Tabla 4. Valores de las propiedades edáficas analizadas en muestras recogidas en los puntos de muestreo del transecto. Abreviaturas: P, punto de muestreo; D, profundidad (m); Cd, color en seco; Cw, color en húmedo; S, contenido de arenas (%); L, contenido de limo (%); Cl, contenido de arcilla (%); AS, fracción estable del suelo (%); OM, contenido de materia orgánica (%); OC, contenido de carbono orgánica (%); EC, conductividad eléctrica; FC, contenido de agua en capacidad de campo (%); WP, contenido de agua en punto de marchitez (%).

Table 4. Results of soil properties analytics in the sampling points along the transect and in depth. Abbreviations: P, sampling point; D, depth (m); Cd, dry colour; Cw, wet colour; S, sand content (%); L, lime content (%); Cl, clay content (%); AS, aggregate stability fraction of soil (%); OM, organic matter content (%); OC, organic carbon content (%); EC, electrical conductivity (dS cm⁻¹); FC, water content in field capacity (%); WP, water content in wilting point.

P	D	Cd	Cw	S	L	Cl	Textura	AS	OM	OC	EC	pH	FC	WP
02	0-10	10YR 5/4	10YR 3/4	8,4	82,8	8,8	Franco-Limoso	23,5	6,0	3,5	0,11	6,5	33,6	8,7
	10-20	10YR 5/4	10YR 3/3	9,6	79,9	10,5	Franco-Limoso	26,1	5,4	3,1	0,07	6,5	28,6	18,2
	20-30	10YR 5/6	10YR 3/6	7,3	82,1	10,6	Franco-Limoso	17,4	4,2	2,5	0,03	7,0	30,2	8,0
03	0-10	10YR 5/4	10YR 3/3	5,3	85,3	9,5	Limo	79,8	5,0	2,9	0,17	6,5	32,1	8,9
	10-20	10YR 5/4	10YR 3/4	14,5	75,2	10,3	Franco-Limoso	41,4	4,2	2,4	0,07	6,5	31,8	10,9
04	0-10	10YR 5/4	10YR 3/4	9,5	81,4	9,2	Franco-Limoso	17,2	4,1	2,4	0,13	6,6	27,4	6,6
	10-20	10YR 5/4	10YR 3/4	15,5	75,3	9,1	Franco-Limoso	48,7	3,4	2,0	0,07	6,6	25,2	6,8
05	0-10	10YR 5/6	10YR 3/4	21,7	69,7	8,5	Franco-Limoso	33,7	4,6	2,6	0,07	7,2	30,0	8,3
	10-20	10YR 5/4	10YR 3/6	18,3	72,3	9,3	Franco-Limoso	44,4	4,8	2,8	0,06	6,1	27,1	8,6
	20-30	10YR 6/4	10YR 3/6	6,8	80,5	12,7	Franco-Limoso	16,4	3,0	1,7	0,09	7,1	26,4	9,8
06	0-10	10YR 4/4	10YR 3/3	3,6	84,6	11,8	Limo	32,3	5,6	3,2	0,10	7,0	61,6	15,7
	10-20	10YR 5/4	10YR 3/3	6,2	80,3	13,4	Franco-Limoso	32,5	6,0	3,5	0,11	6,9	33,6	11,3
	20-30	10YR 5/4	10YR 3/6	17,7	65,4	16,9	Franco-Limoso	54,6	6,5	3,8	0,19	7,6	31,6	13,0
07	0-10	10YR 4/3	10YR 3/3	33,2	60,5	6,3	Franco limoso	29,7	8,0	4,6	0,32	6,7	31,9	12,4
	10-20	10YR 4/3	10YR 2/2	24,4	62,8	12,8	Franco-Limoso	43,8	8,7	5,1	0,09	6,8	39,4	14,6
	20-30	10YR 4/3	10YR 3/3	7,9	75,1	17,1	Franco-Limoso	5,5	9,4	5,4	0,14	7,1	41,7	14,2
08	0-10	10YR 4/4	10YR 3/3	25,9	66,0	8,1	Franco limoso	55,1	6,4	3,7	0,17	6,9	33,4	13,7
	10-20	10YR 4/4	10YR 3/3	0,0	80,8	19,1	Franco limoso	25,3	1,9	1,1	0,06	7,1	33,4	15,7
	20-30	10YR 4/4	10YR 3/3	25,9	65,0	8,1	Franco limoso	56,2	5,7	3,3	0,05	7,1	30,3	14,4
	30-40	10YR 5/4	10YR 3/4	17,1	67,9	14,9	Franco-Limoso	11,7	1,9	1,1	0,04	7,1	28,7	12,3
09	0-10	10YR 6/4	10YR 4/6	9,4	82,9	7,7	Franco-Limoso	41,9	3,7	2,1	0,06	6,6	19,0	7,7
	10-20	10YR 6/4	10YR 4/6	2,6	88,5	9,0	Limo	27,9	4,7	2,7	0,09	6,4	19,3	7,2
	20-30	10YR 6/4	10YR 4/6	7,8	83,4	8,3	Franco-Limoso	33,5	1,7	1,0	0,75	8,3	17,4	7,0
	30-40	10YR 6/3	10YR 3/6	30,3	62,7	7,1	Franco-Limoso	17,4	1,6	0,9	0,02	7,4	18,7	6,5
10	0-10	10YR 5/3	10YR 3/3	14,6	78,0	7,4	Franco-Limoso	34,7	6,4	3,7	0,15	5,8	40,4	21,3
	10-20	10YR 5/4	10YR 3/3	2,9	89,0	8,1	Limo	46,7	5,6	3,3	0,04	6,0	39,3	33,8
	20-30	10YR 5/4	10YR 3/4	1,2	90,7	8,1	Limo	32,3	3,6	2,1	0,06	6,5	35,8	20,6
	30-40	10YR 5/3	10YR 3/3	43,5	50,3	6,1	Franco	69,6	5,2	3,0	0,08	5,9	42,7	13,3
	40-50	10YR 4/4	10YR 3/3	6,0	83,5	10,5	Limo	34,0	3,8	2,2	0,08	6,3	46,1	12,9
	50-60	10YR 5/4	10YR 3/3	4,6	86,5	8,8	Limo	20,7	5,1	3,0	0,02	6,0	43,9	12,1
60-70	10YR 5/4	10YR 3/4	5,1	87,0	7,9	Limo	54,1	6,6	3,8	0,09	7,4	41,1	18,4	
11	0-10	10YR 5/4	10YR 3/3	16,8	76,8	6,5	Franco-Limoso	50,2	9,5	5,5	0,02	6,0	46,4	5,2
	10-20	10YR 5/4	10YR 3/4	6,5	84,9	8,6	Limo	50,9	5,7	3,3	0,04	6,0	41,7	14,6
	20-30	10YR 5/4	10YR 3/3	14,1	77,5	8,4	Franco-Limoso	43,4	6,5	3,7	0,07	6,2	40,8	13,9
	30-40	10YR 5/3	10YR 3/3	2,6	88,0	9,4	Limo	58,5	6,2	3,6	0,04	6,4	40,1	16,7
	40-50	10YR 4/3	10YR 2/2	5,5	84,6	9,8	Limo	56,1	6,5	3,8	0,04	6,4	41,6	16,4
	50-60	10YR 5/4	10YR 2/1	1,6	88,6	9,8	Limo	49,1	5,8	3,4	0,05	6,5	40,7	15,6
	60-70	10YR 4/4	10YR 3/3	3,5	87,1	9,4	Limo	49,0	5,6	3,2	0,03	6,5	41,7	13,2
	70-80	10YR 5/3	10YR 2/2	3,2	87,1	9,7	Limo	27,1	6,0	3,5	0,03	6,5	45,7	15,0
	80-90	10YR 4/3	10YR 2/1	4,1	83,1	12,9	Franco-Limoso	28,9	6,5	3,8	0,03	6,5	44,3	14,9
90-100	10YR 5/4	10YR 3/3	4,1	88,6	7,4	Limo	28,7	6,6	3,8	0,22	7,4	42,6	11,8	
12	0-10	10YR 5/4	10YR 4/3	21,6	72,3	6,1	Franco-Limoso	25,1	4,9	2,8	0,10	6,6	29,7	16,1
	10-20	10YR 5/4	10YR 3/6	2,4	87,8	9,7	Limo	52,1	4,4	2,6	0,06	6,4	30,2	4,6
13	0-10	10YR 7/6	10YR 6/8	0,9	88,8	10,4	Limo	22,4	6,2	3,6	0,03	6,0	28,4	11,2
	10-20	10YR 6/8	10YR 5/8	9,1	81,7	9,2	Franco-Limoso	26,4	4,2	2,4	0,03	6,3	30,5	12,8
14	0-10	10YR 5/4	10YR 3/3	8,2	86,4	5,4	Limo	34,9	3,7	2,2	0,07	6,9	36,9	10,0
	10-20	2.5Y 5/3	2.5Y 3/3	19,0	75,3	5,3	Franco limoso	24,9	13,2	7,6	0,20	7,4	35,5	12,2
15	10-20	2.5Y 5/3	2.5Y 3/2	23,3	73,7	3,0	Franco-Limoso	35,2	11,7	6,8	0,21	7,3	39,0	14,0
	20-30	2.5Y 5/3	2.5Y 3/3	28,6	69,9	1,3	Franco limoso	57,1	5,2	3,0	0,12	6,8	32,9	11,0
	30-40	2.5Y 5/3	2.5Y 3/3	38,1	60,8	0,9	Franco limoso	58,3	6,0	3,5	0,11	7,1	28,5	9,9

dos últimos puntos del muestreo, en orientación NO. La textura es predominantemente franco-limosa, en concordancia con las litologías sobre las que se desarrollaron los suelos (calizas y margas). Como también es característica de los suelos limosos, la estabilidad estructural de los suelos queda por debajo del 50 % en la mayoría de las muestras y a pesar de que los contenidos en materia orgánica son apreciables en superficie, descendiendo en profundidad. Los suelos se caracterizan por muy bajos valores de conductividad eléctrica, evidenciando ausencia de sales. El pH es en general neutro a ligeramente alcalino, si bien en algunas profundidades muestreadas baja a ligeramente ácido. Por último, la capacidad de retención hídrica en capacidad de campo y en punto de marchitez ofrece valores muy variables a lo largo del transecto y en profundidad.

3.3 Relaciones eco-geomorfológicas a lo largo del transecto

En este apartado, se describen los resultados de aplicar el análisis K-medias, con método del codo para identificar el número de clústeres, considerando como variables de agrupación la posición en la ladera y la profundidad de muestreo, a fin de resaltar posibles patrones espaciales de agrupación en las propiedades físicas, químicas e hidrológicas de los suelos a lo largo del transecto. La Figura 6 muestra un cambio brusco en la evolución de la inercia en torno 10 clústeres. Por tanto, se ha seleccionado para la clusterización el valor de 10 como valor *K* ya que, a partir del mismo, se considera

que un incremento de *K* no mejora sustancialmente la distancia media intra-cluster.

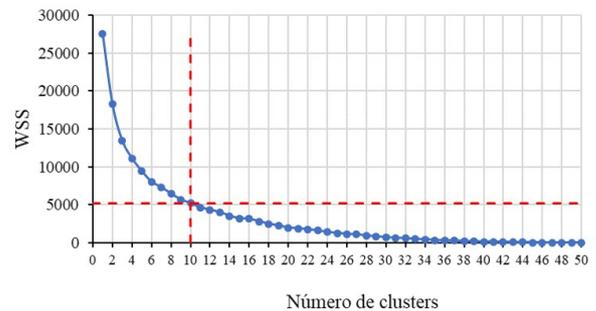


Figura 6. Número óptimo de clústeres atendiendo al método del codo. Donde: WSS, suma de errores cuadrados dentro del grupo.

Figure 6. Optimal number of clusters according to the elbow method. Where: WSS, sum of squared errors within the cluster.

Una vez fijado a 10 el número de clúster a utilizar, el resultado del proceso de clusterización de K-medias muestra como en ninguno de los casos, el algoritmo K-medias hace posible la clasificación multidimensional en las dos variables utilizadas (Tabla 2, Tabla 5 y Tabla 6). Esto quiere decir que los resultados no evidenciaron en ningún caso patrones de comportamiento similar para ninguna de las propiedades físico-químicas e hidrológicas relativos a su posición en la ladera o a la profundidad donde se tomó la muestra. Únicamente se observaría un ligero agrupamiento en las zonas de talweg, pero este hecho se justifica más por las pocas observaciones introducidas en el análisis de K-medias (solo 4 muestras tomadas en el tal-

Tabla 5. Agrupamiento clúster atendiendo a la profundidad de la muestra en el transecto. Clusterización con k = 10.
Table 5. Cluster grouping considering the sampling depth; clustering k = 10.

N.º Clúster	Profundidad (cm)	Clúster									
		2	3	2	2	7	3	1	5	3	2
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
7	0-10	1	4		2	2	1	1		3	
5	10-20	2	4				1		2	4	
6	20-30		3	1		1	2			1	1
4	30-40			2	1				1		1
2	40-50					1			1		
2	50-60					1			1		
1	60-70								2		
1	70-80					1					
1	80-90					1					
1	90-100					1					

Tabla 6. Tabla de agrupamiento clúster atendiendo a la posición topográfica de la muestra en el transecto. Clusterización con $k = 10$.
 Table 6. Cluster grouping considering the topographical position; clustering $k = 10$.

N.º Clúster	Posición topográfica	Clúster										
		3	4	2	2	2	2	1	1	3	1	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
4	Fondo de depresión			1		6			7	3		
4	Ladera alta		3	2				1		2		
5	Ladera baja	1	2		2		3				2	
5	Ladera media	1	4			2	1			3		
3	Talweg	1	2		1							

weg) que a posibles diferencias introducidas por la posición ocupada en la ladera.

4. Discusión

A tenor de los resultados, cabe discutir diferentes aspectos ecogeomorfológicos observados en el área experimental. Desde el punto de vista geológico, el transecto discurre a lo largo de sustrato calizo en la ladera en su mayor parte, aunque también por otras litologías: depósito aluvial cuaternario en el fondo de la vaguada y sustrato margoso-esquistoso en contacto con ese depósito; además, en su extremo este aflora en forma de promontorio rocosa la formación de la brecha de la Nava. Así, el transecto recorre una depresión eminentemente kárstica, probablemente de antiguo carácter endorreico, si bien capturada por a la red fluvial principal (río Verde) en la actualidad. Según Delannoy (1999), estas depresiones, características del sector de alta montaña del PNSN, estuvieron recubiertas por un potente perfil edáfico propio de condiciones climáticas tropicales terciarias, bajo el cual se desarrollaron lapiaces debido a la corrosión de las calizas.

Sin embargo, hoy en día, es paisaje eco-geomorfológico apenas puede ser reconocido en campo debido a las diferentes crisis climáticas cuaternarias y cambios en la cubierta vegetal y el uso del suelo. Los lapiaces afloran en las laderas del transecto, si bien se encuentran muy erosionados y desfigurados respecto a lo que debió ser su aspecto original (Delannoy, 1999). El fondo de la depresión es atravesado por una cárcava de fondo de valle, la cual se encaja en materiales aluviales depositados probablemente de modo posterior a la eliminación del potente perfil edáfico terciario, en

una fase erosiva. Recientemente, los procesos de erosión hídrica han visto reducida su intensidad por el control que ejercen la red diques construidos (en el periodo 1992-93) y el incremento de la cubierta vegetal en las cuencas vertientes (Martínez-Murillo & Carruana-Herrera, 2022).

En la declaración como parque nacional (BOE, 2021), se indica que en el espacio geográfico donde se ha desarrollado este estudio se extiende un sistema natural clasificado como “matorrales almohadillados espinosos y tomillares de pradera”. Según los resultados obtenidos, el paisaje eco-geomorfológico de este sistema, a lo largo del transecto longitudinal en la depresión inventariada y muestreada, evidencia ser fruto de la interacción dinámica natural-ser humano: i) existencia de una cubierta vegetal discontinua debido al antiguo carboneo, a la tala del bosque disperso de quejigos y al pastoreo (aunque esta actividad sigue activa pero en tendencia regresiva), constituida por especies arbustivas adaptadas a las condiciones climáticas exigentes por el régimen de vientos y de temperaturas, además de las frecuentes nevadas (Olmedo-Cobos *et al.*, 2021; Pérez-Latorre *et al.*, 2021); y ii) procesos de erosión hídrica, que afectan a las laderas calcáreas, las cuales han perdido buena parte de sus suelos (más bien escasos de profundidad y abundantes en pedregosidad superficial actualmente) y a los materiales blandos margosos de los fondos de vaguada donde se han desarrollados cárcavas y morfologías de tipo badland (Martínez-Murillo & Carruana-Herrera, 2022).

Estas condiciones eco-geomorfológicas se traducen en una marcada ausencia de relaciones significativas desde el punto de vista estadístico entre las variables eco-geomorfológicas y edáficas analizadas a lo largo de transecto establecida en el área experimental. No se han observado correlaciones evi-

dentes y/o significativas entre variables topográficas (como la pendiente o la localización en el transecto), biológicas (grado de cubierta vegetal o tipo de especie vegetal), edáficas (espesor, carbono orgánico, textura, estabilidad de agregados, entre otras) y geomorfológicas (presencia o ausencia de mayor grado de erosión hídrica, por ejemplo). Esta ausencia de relaciones estadísticas significativas considerando el tipo de estrategia de muestreo seguido en este trabajo ha sido también observada en otros trabajos científicos similares, desarrollados en espacios montañosos mediterráneos (Martínez-Murillo & Ruiz-Sinoga, 2007, 2009; Shakesby, 2011; García-Ruiz *et al.*, 2016).

Esta situación hace pensar en la presencia de un patrón de relaciones eco-geomorfológicas y edáficas que no atiende a variables topográficas, como la pendiente, la posición topográfica, la orientación o la distancia respecto a la divisoria de aguas, por ejemplo. Dado el paisaje en mosaico de este espacio de alta montaña (Figura 6), con pequeñas teselas contrapuestas, a veces sin continuidad, de áreas de vegetación (matorral o matorral + árbol) rodeadas de áreas de pastizal y/o suelo desnudo, hacen pensar en una estructura eco-geomorfológica similar a la encontrada en áreas semiáridas, refiriéndonos a las 'islas de fertilidad' (Dickie Parsons, 2012; Saco & Moreno-De las Heras, 2013; Okin *et al.*, 2015; Ruiz-Sinoga *et al.*, 2010, 2015; Martínez-Murillo *et al.*, 2017). Estas son teselas donde se produce un proceso de nucleación, por el cual la tesela de vegetación se convierte en un *hot spot* de suelo, con elevado contenido de materia orgánica, mayor estabilidad estructural y capacidad de infiltración, frente a la tesela de suelo desnudo, generalmente más pedregoso y con condiciones edáficas opuestas a las anteriores (Puigdefábregas *et al.*, 1999; Puigdefábregas, 2005). Por ello, para profundizar en el conocimiento de las relaciones eco-geomorfológicas y edáficas en el área de estudio, se debe adoptar una estrategia de muestreo focalizada en el paisaje en mosaico de teselas descrito, más que en una aproximación de transecto topográfico, a fin de profundizar en el concepto de islas de fertilidad, pero en un ámbito de alta montaña mediterránea.

5. Conclusiones

Las conclusiones de este trabajo son las siguientes:

i) A lo largo del transecto longitudinal, se observan diferencias en cubierta vegetal, condiciones superficiales de los suelos y procesos geomorfológicos,

conformando un paisaje eco-geomorfológico en tesela dominado por: cubierta vegetal arbustiva no continua, separada por teselas de suelo desnudo y/o cubierto por pastizal estacional, de pedregosidad superficial a veces significativa, con evidentes síntomas de pérdida de sedimentos por escorrentía superficial, especialmente en los taludes de cárcavas.

ii) Los perfiles edáficos ofrecen espesores variables a lo largo del transecto, más profundos a pie de talweg y en depósitos sedimentarios fluviales (fondo del transecto). Las diferencias más evidentes se observan entre suelos de laderas, suelos sobre depósito fluvial (más profundos) y cárcavas (con escaso espesor o nulo).

iii) Las diferencias observadas en campo no se corroboran con el análisis estadístico aplicado, el cual solo corrobora cierta agrupación entre puntos de muestreo cercanos al talweg.

iii) La ausencia de relación estadística significativa entre variables permite apuntar la posible existencia de un patrón eco-geomorfológico semejante a las islas de fertilidad semiáridas, pero, en este caso, ligadas a condiciones bio-climáticas de alta montaña y a posibles interrupciones del patrón original por el uso humano. Por ello, las futuras investigaciones deben adoptar una estrategia de muestreo que no otorgue una preponderancia a la topografía y/o posición topográfica.

Referencias

- Alfthan, B., Semernya, L., Ramola, A., Adler, C., Penaranda, L.F., Andresen, M., ..., & Memon, M., 2016. *Waste Management Outlook for Mountain Regions—Sources and Solutions*. Arendal and Vienna, UNEP, GRID-Arendal and ISWA. <https://doi.org/10.1177/0734242X17709910>.
- Alexander, J.M., Chalmardrier, L., Lenoir, J., Burgess, T.I., Essl, F., Haider, S., ... & Pellissier, L., 2018. Lags in the response of mountain plant communities to climate change. *Glob. Chang. Biol.*, 4: 563–579. <https://doi.org/10.1111/gcb.13976>
- BOE, 2021. Ley 9/2021, de 1 de julio, de declaración del Parque Nacional Sierra de las Nieves. Madrid: Boletín Oficial del Estado.
- Bower, C. A., Reitmeier R. F., & Fireman, M., 1952. Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Science*, 73(4): 129-173. <https://doi.org/10.1097/00010694-195204000-00001>
- Campeato, O. 2020. *Artificial intelligence, machine learning, and deep learning*. Herndon, EEUU: Mercury Learning and Information. <https://doi.org/10.1515/9781683924654>
- Carrasco, G.I. 2020. *Cluster no jerárquicos versus CART y BI-PLOT*. Tesis Doctoral, Universidad de Salamanca.
- Delannoy, J.J., 1999. Contribución al conocimiento de los macizos kársticos de las serranías de Grazalema y de Ronda. In: J.J. Durán Valsero & J. López Martínez (eds.), *Karst en Anda-*

- Lucía. Madrid, Spain: Instituto Técnico Geológico y Minero. 93-132 pp.
- Delgado Peña, J.J., Martínez Murillo, J.F. & Ruiz Sinoga, J.D. 2021. Aproximación a la aplicación de la metodología de los sistemas de conexión de biotopos en los pinsapares de la cuenca alta del Zarzalones (Sierra de las Nieves). In: J. Gómez Zotano & J.A. Olmedo Cobo (eds.), *Los Bosques de la Serranía de Ronda*. Ronda, España: Editorial La Serranía. 267-284 pp.
- Dickie Parsons A.J., 2012. Eco-geomorphological processes within grasslands, shrublands and badlands in the semi-arid Karoo, South Africa. *Land Degradation & Development* 23: 534-547. <https://doi.org/10.1002/ldr.2170>.
- Egli, M. & Poulenard, J., 2017. Soils of mountainous landscapes. En: D. Richardson, N. Castree, M.F. Goodchild, A. Kobayashi & R.A. Marston. (Eds.), *The International Encyclopaedia of Geography*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons. 1-10 pp. <https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0197>
- FAO, 2015. *Understanding Mountain Soils: A Contribution from Mountain Areas to the International Year of Soils*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/8d557f4f-9458-4140-8f6b-42c9309ed060/content>
- Freppaz, M., Pintaldi, E., Magnani, A., Vinglietti, D. & Williams, M.W., 2018. Topsoil and snow: a continuum system. *Appl. Soil Ecol.*, 123: 435-440. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.029>
- García-Ruiz, J.M., López-Moreno, J.I., Lasanta, T., Vicente-Serrano, S.M., González-Sampériz, P., Valero-Garcés, B.L., Sanjuán, Y., Beguería, S., Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N. & Gómez-Villar, A., 2015. Los efectos geoecológicos del cambio global en el Pirineo Central español: Una revisión a distintas escalas espaciales y temporales. *Pirineos*, 170: e012. <https://doi.org/10.3989/Pirineos.2015.170005>
- García-Ruiz, J. M., Sanjuán, Y., Arnáez, J., Beguería, S., Gómez-Villar, A., Álvarez-Martínez, J., Lana-Renault, N., Cobo-Pérez, P. (2016). La evolución del piso subalpino en la Sierra de Urbión (Sistema Ibérico, norte de España): un modelo de impacto geoecológico de actividades humanas en el Valle de Ormazal. *Pirineos*, 171: e022. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/Pirineos.2016.171006>
- García-Ruiz, J.M., Arnáez, J., Sanjuán, Y., López-Moreno, J.I., Nadal-Romero, E., Beguería, S., 2021. Landscape changes and land degradation in the subalpine belt of the Central Spanish Pyrenees. *Journal of Arid Environments*, 186: 104396. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104396>
- Gabarrón-Galeote, M.A., Martínez-Murillo, J.F., Ruiz-Sinoga, J.D., Quesada, M.A., 2013. Seasonal changes of the soil hydrological and erosive response in contrasted Mediterranean eco-geomorphological conditions at patch scale. *Solid Earth Discussions*, 5: 1423-1460. <https://doi.org/10.5194/sed-5-1423-2013>.
- Gómez Zotano, J. & Olmedo Cobo, J.A., 2021. *Los Bosques de la Serranía de Ronda*. Ronda, España: Editorial La Serranía.
- Jain, A. K. 2010. Data clustering: 50 years beyond K-means. *Pattern recognition letters*, 31(8): 651-666. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2009.09.011>
- Lasanta, T., Nadal-Romero, E. & Errea, M.P., 2017. The footprint of marginal agriculture in the Mediterranean landscape: an analysis of the Central Spanish Pyrenees. *Sci. Total Environ.*, 599-600: 1823-1836. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.092>
- López-Moreno, J.I., Gascoín, S., Herrero, J., Sproles, E.A., Pons, M., Alonso-González, E., ..., & Pomeroy, J., 2017. Different sensitivities of snowpacks to warming in Mediterranean climate mountain areas. *Environ. Res. Lett.*, 12: 074066. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa70cb>.
- Martínez-Murillo, J.F., Ruiz-Sinoga, J.D., 2007. Seasonal changes in the hydrological and erosional response of a hillslope under dry-Mediterranean climatic conditions (Montes de Málaga, South of Spain). *Geomorphology*, 88: 69-83. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.015>
- Martínez-Murillo, J.F., Carruana-Herrera, D. (2022). Ecogeomorphological transect approach to evaluate the origin of gullies and badland-shaped morphologies in a high mountain environment: Sierra de las Nieves National Park (South of Spain). *10th International Conference on Geomorphology*, Coimbra. <https://doi.org/10.5194/icg2022-18>
- Martínez-Murillo, J.F., Hueso-González, P. & Ruiz-Sinoga, J.D., 2018. Impact of low pressure grazing on the hydrological and sediment connectivity in hillslopes under contrasted Mediterranean climatic conditions (South of Spain). *Land Degradation & Development*, 29: 1130-1140. <https://doi.org/10.1002/ldr.2809>
- Menjíbar Romero, M., Remond, R., & Martínez Murillo, J.F. 2024. Las unidades de paisaje del Espacio Natural Protegido de Sierra de las Nieves: caracterización, cambios y métricas. *Revista De Geografía Norte Grande*, 87. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022024000100114>
- MITECO, 2023. *Parque Nacional Sierra de las Nieves*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <https://www.miteco.gob.es/es/parques-nacionales-oapn/red-parques-nacionales/parques-nacionales/sierra-de-las-nieves.html> (último acceso 27/11/2024).
- Mountain Partnership, 2014. Why mountains matter for forests and biodiversity—acall to action on sustainable development goals. Informe técnico. https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/1915SDGs%20and%20mountains_forests%20and%20biodiversity_en.pdf
- Mountain Research Initiative EDW Working Group, 2015. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nat. Clim. Chang.*, 5: 424-430. <https://doi.org/10.1038/nclimate2563>
- Nadal-Romero, E., Martínez-Murillo, J.F. & Pereira, P., 2019. Editorial: Soil processes in mountain environments. *Science of the Total Environment*, 656: 701-708. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.411>
- Okin, G.S., De las Heras, M.M., Saco, P.M., Throop, H.L., Parsons, A.J., Wainwright, J. & Peters DPC., 2015. Connectivity in dryland landscapes: shifting concepts of spatial interactions. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 13: 20-27. <https://doi.org/10.1890/140163>.
- Oliva, M., Pereira, P., Ruiz-Fernández, J. & Nieuwendam, A., 2017. Recent advances in the study of active layer thermal regime and seasonal frost dynamics in cold climate environments. *Catena*, 149: 515-518. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.030>
- Olmedo Cobo, J. & Gómez Zotano, J., 2017 Los climas de la Serranía de Ronda: una propuesta de clasificación. *Takurunna*, 6-7: 23-57.
- Olmedo-Cobo, J.A., Pardo-Martínez, R., & Gómez-Zotano, J. (2021). First data about the Holocene composition of mountain forests in the Sierra de las Nieves Natural Park (Ronda Mountains, Spain) through pedoanthracological analysis. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 89: 1-46. <https://doi.org/10.21138/bage.3099>
- Palomo, I., 2017. Climate change impacts on ecosystem services in high mountain areas: a literature review. *Mt. Res. Dev.*, 37: 179-187. <http://dx.doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-16-00110.1>

- Pérez-Latorre, A.V., Hidalgo-Triana, N. & Cabezudo, B., 2021. Biogeografía y bosques de la Serranía de Ronda. In: J. Gómez Zotano & J. Olmedo Cobos (eds), *Los Bosques de la Serranía de Ronda*, Ronda, España: Editorial Serranía. 11-58 pp.
- Pargeter, J., Loftus, E. & Mitchell, P., 2017. New ages from Se-honghong rock shelter: implications for the late Pleistocene occupation of highland Lesotho. *J. Archaeol. Sci. Rep.*, 12: 307–315. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.01.027>
- Pitblado, B.L., 2017. The role of Rocky Mountains in the peopling of North America. *Quat. Int.*, 461: 54–79. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.07.009>
- Puigdefabregas, J., 2005. The role of vegetation patterns in structuring runoff and sediment fluxes in drylands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30: 133–148. <https://doi.org/10.1002/esp.1181>.
- Puigdefabregas, J., Solé, A., Gutiérrez, L., Del Barrio, G. & Boer, M., 1999. Scales and processes of water and sediment redistribution in drylands: results from the Rambla Honda field site in Southeast Spain. *Earth-Science Reviews*, 48: 39–70. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(99\)00046-X](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(99)00046-X).
- Ruiz-Sinoga, J.D., Martínez-Murillo, J.F., 2009. Effects of soil surface components on soil hydrological behaviour in a dry Mediterranean environment (Southern Spain). *Geomorphology*, 108: 234-245. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.01.012>
- Ruiz-Sinoga, J.D., Martínez-Murillo, J.F., Gabarrón-Galeote, M.A., García- Marín, R., 2010. Effects of exposure, scrub position, and soil surface components on the hydrological response in small plots in southern Spain. *Ecohydrology*, 3: 402–412. <https://doi.org/10.1002/eco.159>.
- Ruiz-Sinoga, J.D., Romero-Díaz, A., Martínez-Murillo, J.F. & Gabarrón-Galeote, M.A., 2015. Incidencia de la dinámica pluviométrica en la degradación del suelo. Sur de España. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 68: 177–204. <https://doi.org/10.21138/bage.1858>
- Saco, P., Moreno-De las Heras, M., 2013. Ecogeomorphic co-evolution of semiarid hillslopes: emergence of banded and striped vegetation patterns through interaction of biotic and abiotic processes. *Water Resources Research*, 49: 115–126. <https://doi.org/10.1029/2012WR012001>.
- Shakesby, R. A. 2011. Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions. *Earth-Science Reviews*, 105(3-4): 71-100. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.001>
- Tarolli, P., 2018. Agricultural terraces special issue preface. *Land Degrad. Dev.*, 29: 3544–3548. <https://doi.org/10.1002/ldr.3129>
- Troll, C., 1973. High mountain belts between the polar caps and the equator: their definition and lower limit. *Arct. Alp. Res.*, 5: 19–28. <https://doi.org/10.1080/00040851.1973.12003713>
- Xie, S.B., Jian-Jun, Q., Yuan-Ming, Q., Zhi-Wei, Z. & Xiang-Tianm, X., 2015. Effects of freeze-thaw cycles on soil mechanical and physical properties in the Qinghai-Tibet Plateau. *J. Mt. Sci.*, 12, 999–1009. <https://doi.org/10.1007/s11629-014-3384-7>

Disponibilidad de datos

En el artículo se han utilizado los siguientes datos:

- Datos en formato cartográfico provenientes de terceros: están referenciados en la Tabla 1 del manuscrito.
- Datos propios: no disponibles en ningún repositorio, pero pueden ser solicitados al autor de correspondencia.

Declaración conflicto de interés

Los autores no tienen conflicto de intereses.

Fuentes de financiación

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto de investigación, con referencia B2_2020-5, financiado por el II Plan Propio de Investigación y Transferencia de la Universidad de Málaga.

Declaración de contribución de autoría

Juan Francisco Martínez Murillo: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Administración de proyecto, Redacción – borrador original, Redacción –

Mario Menjibar Romero: Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

Paloma Hueso González: Análisis formal, Investigación, Metodología, revisión.

David Isaac Carruana Herrera: Investigación, revisión.