



Universidad
Zaragoza

Trabajo de Fin de Máster

Evaluación de la degradación de terrenos agrícolas por procesos de erosión por piping a partir de la reconstrucción del paisaje histórico mediante técnicas de fotogrametría automatizada

Assessment of agricultural land degradation due to erosion processes by piping from historical landscape reconstruction using automated photogrammetry techniques

Autora

Sara Carreras Gómez

Directores

Alfredo Ollero Ojeda

Daniel Ballarín Ferrer

Máster en Ordenación Territorial y Medioambiental
Universidad de Zaragoza

2022-2023

Resumen

La erosión subsuperficial o sufosión (piping erosion en inglés) es un proceso natural relativamente común en ambientes semiáridos que está asociado a unas condiciones geomorfológicas y climáticas concretas. Estos procesos tienen una serie de efectos negativos, entre ellos la erosión y degradación de campos de cultivo. El objetivo del presente trabajo es evaluar esta degradación a partir de la evolución de la superficie cultivada desde un punto de vista planimétrico y volumétrico, permitiendo estimar pérdidas y comparar la situación de las superficies cultivadas en la zona desde la década de 1950 hasta la actualidad. La zona de estudio (124 ha) se sitúa en los Aguarales de Valpalmas, un área semiárida situada al noroeste de la provincia de Zaragoza donde los procesos de piping están teniendo un desarrollo notablemente rápido en las últimas décadas causando, entre otros efectos, la pérdida de suelo agrícola en los campos de cultivo próximos. La aplicación de herramientas SIG permite confirmar cambios en la distribución de las superficies cultivadas: se aprecia cierta tendencia al abandono progresivo de los terrenos altitudinalmente más elevados, así como cierta concentración parcelaria en las cotas más bajas de la cuenca, cerca de los Aguarales. La pérdida de superficies agrícolas se estima en un 10% en comparación con la situación observada en 1957. Por otro lado, la aplicación de técnicas de fotogrametría digital automatizada ha permitido reconstruir el paisaje histórico de 1977, permitiendo realizar un análisis de la evolución de los procesos erosivos de la zona a un nivel volumétrico: para el periodo de 1977 a 2020 se estima un volumen erosionado de unos 2.600 m³ de suelo. Este tipo de estudios permiten realizar una mejor estimación de la magnitud de los procesos de erosión y sus efectos negativos sobre las superficies agrícolas a lo largo de los años.

Palabras clave: erosión por piping, pérdida de suelo, fotogrametría, agricultura.

Abstract

Subsurface erosion or piping is a relatively common natural process in semi-arid environments that is associated with specific geomorphological and climatic conditions. These processes have a series of negative effects, including erosion and degradation of crop fields. The objective of the present study is to evaluate this degradation based on the evolution of the cultivated area from a planimetric and volumetric point of view, making it possible to estimate losses and compare the agricultural situation in the area from the 1950s to the present. The study area (124 ha) is located in the Aguarales de Valpalmas, a semi-arid area located in the northwest of the province of Zaragoza where the piping processes have been developing remarkably fast in the last decades causing, among other effects, the loss of agricultural soil in the nearby crop fields. The application of GIS tools allows us to confirm changes in the distribution of cultivated areas. There is a certain tendency towards the progressive abandonment of the higher altitude lands, as well as a certain concentration of plots in the lower elevations of the basin, near the Aguarales. The loss of agricultural land is estimated at 10% compared to the situation observed in 1957. On the other hand, the application of automated digital photogrammetry techniques has made it possible to reconstruct the historical landscape of 1977, allowing an analysis of the evolution of erosion processes in the area at a volumetric level: for the period from 1977 to 2020 an estimated volume of 2.600 m³ of soil has been eroded. This type of study makes it possible to better estimate the magnitude of erosion processes and their negative effects on agricultural land over the years.

Keywords: piping erosion, soil loss, photogrammetry, agriculture.

Agradecimientos

Quisiera destacar lo importante que ha sido para mí la oportunidad de realizar este Trabajo de Fin de Máster en el Instituto Pirenaico de Ecología, donde desde el primer momento me he sentido como en casa. Me ha permitido conocer a muchas personas de ámbitos muy diferentes con las que he compartido tanto intensas jornadas de trabajo como descansos en la cafetería por igual, intercambiando experiencias y siempre aprendiendo cosas nuevas de ellos. Sin duda, este trabajo no podría haber sido posible sin la labor de mi tutor de prácticas, Manel Llena, que me ha acompañado a lo largo de todas las etapas por las que ha ido pasando este TFM, asegurándose de que en todo momento he contado con los conocimientos y recursos necesarios para su elaboración y ayudándome con todas (que no han sido pocas) cuestiones que me han ido surgiendo a lo largo de estos meses. También quiero transmitir mis más sinceros agradecimientos a Estela Nadal, que me brindó la oportunidad de realizar estas prácticas en primer lugar y cuya implicación, a pesar de no ser su obligación, también ha contribuido enormemente al desarrollo del trabajo y su finalización, acompañándome en todo tipo de trámites y asesorándome en cualquier tipo de duda que he tenido. Destaco la labor de José María García y Teodoro Lasanta, cuyos amplios conocimientos y vasta labor investigadora ha sido decisiva para la redacción de muchos de los párrafos que en este trabajo se recogen, implicándose en las jornadas de campo y en la búsqueda del material bibliográfico más adecuado. No quisiera olvidarme del resto de compañeros del IPE cuya labor también ha sido importante para la elaboración del presente trabajo: desde el personal técnico sin cuya ayuda no podría haber sido posible el estudio de las muestras de campo (especialmente a Pilar Esevenri, con la que he tenido la suerte de compartir largas jornadas de laboratorio en las que he aprendido multitud de cosas nuevas, permitiéndome implicarme directamente en el análisis de las muestras), al personal administrativo que ha gestionado la documentación necesaria para la realización de estas prácticas y los trámites derivados del desarrollo del trabajo, mis compañeros de despacho (¡gracias Beatriz por siempre mantenerme al día de los horarios del bus!) y el resto de personas que he ido conociendo a lo largo del camino.

También quiero agradecer la labor del personal de la Universidad de Zaragoza cuya labor ha contribuido al desarrollo del presente trabajo: a mis directores Alfredo Ollero y Daniel Ballarín por su guía e implicación en la redacción y revisión del trabajo, asesorándome en los diferentes aspectos técnicos y formales, así como a mi coordinador de máster Carlos López por mantenernos siempre a la última y por su asesoría e implicación cuando empecé a pensar en el desarrollo del TFM. Además, también me gustaría dedicar un agradecimiento especial a Gloria Desir, anterior profesora mía a lo largo de mis andanzas por el Grado en Geología a la que guardo un cariño especial y me ha brindado la oportunidad de asistir a la Reunión Nacional de Geomorfología para presentar este trabajo al que he dedicado tantos meses de esfuerzo y dedicación.

Gracias a mis padres, a mi pareja y a mis amigos, por animarme a seguir siempre adelante.

Índice

| | |
|-----------------------------------------|----|
| 1. Introducción y objetivos..... | 1 |
| 2. Área de estudio..... | 8 |
| 3. Metodología | 11 |
| 3.1. Caracterización de materiales..... | 11 |
| 3.1.1. Trabajo de campo | 11 |
| 3.1.2. Trabajo de laboratorio | 13 |
| Carbonatos..... | 13 |
| Valor de pH | 15 |
| Conductividad Eléctrica (CE) | 16 |
| Textura o granulometría | 16 |
| 3.2. Análisis geomorfológico | 17 |
| 3.2.1. Estudio planimétrico | 17 |
| 3.2.2. Estudio volumétrico | 19 |
| 4. Resultados | 21 |
| 4.1. Caracterización de materiales..... | 21 |
| 4.1.1. Resultados de laboratorio | 21 |
| 4.2. Análisis geomorfológico | 23 |
| 4.2.1. Estudio planimétrico | 23 |
| 4.2.2. Estudio volumétrico | 29 |
| 5. Discusión..... | 32 |
| 6. Conclusiones | 39 |
| Bibliografía | 40 |

Índice de figuras

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Distribución de los paisajes tipo badlands (puntos negros) en la cuenca mediterránea según su clima (árido (amarillo), semiárido (naranja), subhúmedo seco (verde), subhúmedo (celeste) y húmedo (añil) (modificado de Moreno-de las Heras y Gallart, 2018)) con ejemplos de cada tipo según la clasificación de Gallart et al. (2002): A) badland húmedo en el sector central de los Pirineos (Aragón, España) (fotografía de Estela Nadal Romero), B) badland semiárido en las Bardenas Reales (Navarra, España) (fotografía de Bruno Barral) y C) badland árido en el valle del Zin (Israel) (fotografía de David Shankbone)..... | 2 |
| Figura 2. Ejemplos de colapsos en los Aguerales de Valpalmas (Aragón, España): A) Coalescencia de agujeros producto del colapso de varios pipes; B) Colapso junto a un campo de cultivo de cereal activo en la actualidad (fotografías de la autora (23/05/23)); C) Colapsos individuales (fotografía de Estela Nadal Romero (23/05/23)). | 4 |
| Figura 3. A) Localización del área de estudio en España (cuadrado negro). B) Localización del área de estudio en Aragón (cuadrado negro), dentro de la comarca de las Cinco Villas (en rojo). C) Delimitación del área de estudio (perímetro negro) y localización exacta del Lugar de Interés Geológico ARP035 (estrella roja) (elaboración propia con ArcMap y la ortofotografía del año 2021 obtenida del CNIG)..... | 8 |
| Figura 4. A) Esquema morfoestructural de la Hoja nº 285 del Mapa Geológico de España donde la localización aproximada del área de estudio se ha indicado mediante un rectángulo negro. B) Mapa geológico de la sección previamente señalada, correspondiente a los alrededores del área de estudio (señalada con un perímetro negro) y su leyenda parcial (modificado de Del Olmo et al., 1987)..... | 9 |
| Figura 5. Panorámica del área de estudio (fotografía de la autora (23/05/23))..... | 10 |
| Figura 6. Localización de los puntos de recogida de las muestras en el área de estudio (izquierda) y fotografías del lugar de extracción (derecha) (elaboración propia a partir de Google Earth y fotografías de la autora (15/06/23))..... | 11 |
| Figura 7. Secado de muestras (izquierda) y tamizadora CISA 200N (derecha) (fotografías de la autora (11/07/23)). | 12 |
| Figura 8. A) Partículas milimétricas de carbón. B) Restos óseos de herbívoro (fotografías de la autora (15/06/23)). | 13 |
| Figura 9. A) Ilustración de un calcímetro de Bernard (modificada del protocolo). B) Preparación de muestras para observar su reactividad ante HCl. C) Muestra de carbonato cálcico puro (denominado “blanco”) utilizado en el procedimiento. D) Muestras de suelo analizadas (fotografías de la autora (18/07/23))..... | 14 |
| Figura 10. Ortofotografías utilizadas en el estudio planimétrico (obtenidas del CNIG). | 17 |
| Figura 11. Proceso de creación de un DoD (elaboración propia a partir de los MDTs de los años 2010 y 2020 y el DoD resultante de la diferencia de dichos modelos)..... | 20 |
| Figura 12. Representación gráfica de los resultados recogidos en la Tabla 7..... | 22 |
| Figura 13. Representación gráfica de los resultados granulométricos obtenidos para las muestras en el diagrama ternario de texturas del suelo, indicando la denominación de cada muestra (modificado de USDA (1999)). | 22 |
| Figura 14. Cartografía que refleja la extensión de las superficies agrícolas para cada año, donde cada polígono representa un campo de cultivo individual (elaboración propia)..... | 23 |
| Figura 15. Representación gráfica de los resultados recogidos en la Tabla 8. | 24 |
| Figura 16. Cartografías de cambio de las superficies agrícolas entre años sucesivos, reflejando cambios negativos (degradación, rojo) y positivos (agradación, azul) (elaboración propia). | 25 |
| Figura 17. Representación gráfica de los resultados recogidos en la Tabla 9..... | 26 |
| Figura 18. Cartografía de cambio entre 1957 y 2021 y gráfica asociada (elaboración propia). | 26 |
| Figura 19. Representación gráfica de los valores de orientación media de las superficies de cambio. | 28 |
| Figura 20. Representación gráfica de la variación de altitud en las zonas de cambio negativas (reducción), donde el triángulo representa el valor máximo, el punto el valor medio y el guion el valor mínimo. | 28 |
| Figura 21. Representación gráfica de la variación de altitud en las zonas de cambio positivas (agradación), donde el triángulo representa el valor máximo, el punto el valor medio y el guion el valor mínimo. | 29 |
| Figura 22. Representación gráfica de la pendiente media en las zonas de cambio..... | 29 |
| Figura 23. DoD entre los años 1977 y 2010 con ampliación de la cartografía en los Aguerales (elaboración propia).30 | |
| Figura 24. DoD entre los años 2010 y 2020 con ampliación de la cartografía en los Aguerales (elaboración propia).30 | |
| Figura 25. Cartografía de cambio entre los años 1957 y 2021, reflejando negativos (degradación, en rojo), positivos (agradación, en azul). En este caso se han diferenciado los campos de cultivos cuyo motivo principal de abandono no reside en la acción de los procesos de erosión (en rosa) y su situación respecto a las principales zonas del área de estudio donde se desarrolla el pipping en la actualidad (en amarillo) (elaboración propia). | 35 |

Índice de tablas

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Nombre, coordenadas y peso de las cuatro muestras de sedimento recogidas en el área de estudio. | 12 |
| Tabla 2. Criterios de clasificación del contenido en carbonato en un suelo según el protocolo..... | 15 |
| Tabla 3. Clasificación de la acidez o alcalinidad de un suelo según su valor de pH (USDA, 1999)..... | 15 |
| Tabla 4. Clasificación para valores de conductividad según el protocolo..... | 16 |
| Tabla 5. Características técnicas de las ortofotografías utilizadas. | 17 |
| Tabla 6. Resultados de laboratorio de contenido en carbonatos, pH y conductividad eléctrica | 21 |
| Tabla 7. Resultados de la granulometría con difracción láser. | 21 |
| Tabla 8. Valores numéricos de la extensión total de las superficies agrícolas reflejadas en la Figura 14. | 24 |
| Tabla 9. Datos cuantitativos de la extensión de la disminución y expansión de las superficies agrícolas. | 26 |
| Tabla 10. Estadísticas zonales calculada para las superficies de cambio entre periodos sucesivos. | 27 |
| Tabla 11. Valores numéricos obtenidos a partir de los DoD en superficies de campo negativas (reducción). | 31 |

1. Introducción y objetivos

Los procesos de sufosión o *piping* están estrechamente relacionados con el desarrollo y evolución de zonas acarcavadas o *badlands*, un particular tipo de paisaje que destaca por su elevada dinámica geomorfológica donde la erosión disecta profundamente el sustrato (generalmente poco resistente), siendo especialmente frecuente en zonas áridas, aunque no exclusivamente (Harvey, 2004). Algunos autores afirman que se trata de las áreas con mayores tasas de erosión del mundo y son considerados de gran valor por los científicos de las Ciencias de la Tierra (Bryan y Yair, 1982), ya que la magnitud de los procesos erosivos que allí se producen los convierte en “perfectos laboratorios de campo” (Gallart *et al.*, 2013). Según Fairbridge (1968), es probable que el origen del nombre se encuentre en la expresión francesa “mauvaises terres pour traverser” (o “malas tierras para atravesar”), que fue utilizada por algunos investigadores del S.XVIII para describir este tipo de paisajes caóticos, difíciles de franquear, mayormente desprovistos de vegetación y agrícolamente no productivos. En castellano el término badland se acepta de manera general en Geomorfología (siendo ampliamente empleado), aunque puede intercambiarse por paisaje acarcavado o abarrancado. Originalmente ha sido considerado un paisaje de origen fluvial con una elevada densidad de drenaje caracterizado por profundos valles y pendientes pronunciadas, pero con el tiempo y el aumento en el número de estudios geomorfológicos ha llevado a que la aplicación de este término se haya ampliado para incluir: (i) zonas donde los procesos de erosión combinados con los procesos fluviales dan lugar a paisajes escabrosos y caóticos y (ii) grandes áreas, especialmente en regiones semiáridas, donde la mala gestión de los usos del suelo ha provocado la alteración del equilibrio natural y la degradación del paisaje (Bryan y Yair, 1982).

Las condiciones bajo las que se suelen desarrollar los badlands hacen que su desarrollo esté asociado a regiones áridas o semiáridas, pero la realidad es que en la actualidad estos paisajes pueden encontrarse bajo condiciones climáticas muy distintas: desde la aridez del valle del Zin (Yair y Lavee., 1980), a las condiciones semiáridas y secas de la Depresión del Ebro (Desir y Marín, 2011), hasta las regiones húmedas de los Alpes (Mathys *et al.*, 2003). Esto hace que se encuentren ampliamente distribuidos a escala global, siendo especialmente abundantes en el contexto mediterráneo (Moreno-de las Heras y Gallart, 2018). Por este motivo Gallart *et al.* (2002) proponen una clasificación de los tipos de badlands en tres grupos en función de su distribución climática, características y procesos dominantes: En primer lugar, distingue los badlands áridos (Figura 1 A), típicos de áreas desérticas con una precipitación anual promedio por debajo de los 200 mm y bajos niveles de evapotranspiración potencial. La vegetación es muy escasa en este tipo de hábitats, por lo que no juega un papel importante en los procesos de erosión y pueden observarse grandes áreas de suelo expuesto. Este tipo de paisajes pueden llegar a ser más o menos estabilizados por la formación de costras superficiales creadas por algas, cianobacterias o líquenes que regulen la infiltración de agua al suelo y las tasas de erosión (Belnap, 2006), donde autores

como [Kuhn et al. \(2004\)](#) afirman que la mayoría son paisajes relativamente antiguos que se han estabilizado bajo las condiciones climáticas actuales. Uno de los casos más estudiados son los badlands del valle del Zin, en el desierto de Negev (Israel), que data del Pleistoceno tardío y que apenas ha evolucionado en los últimos 20.000 años.

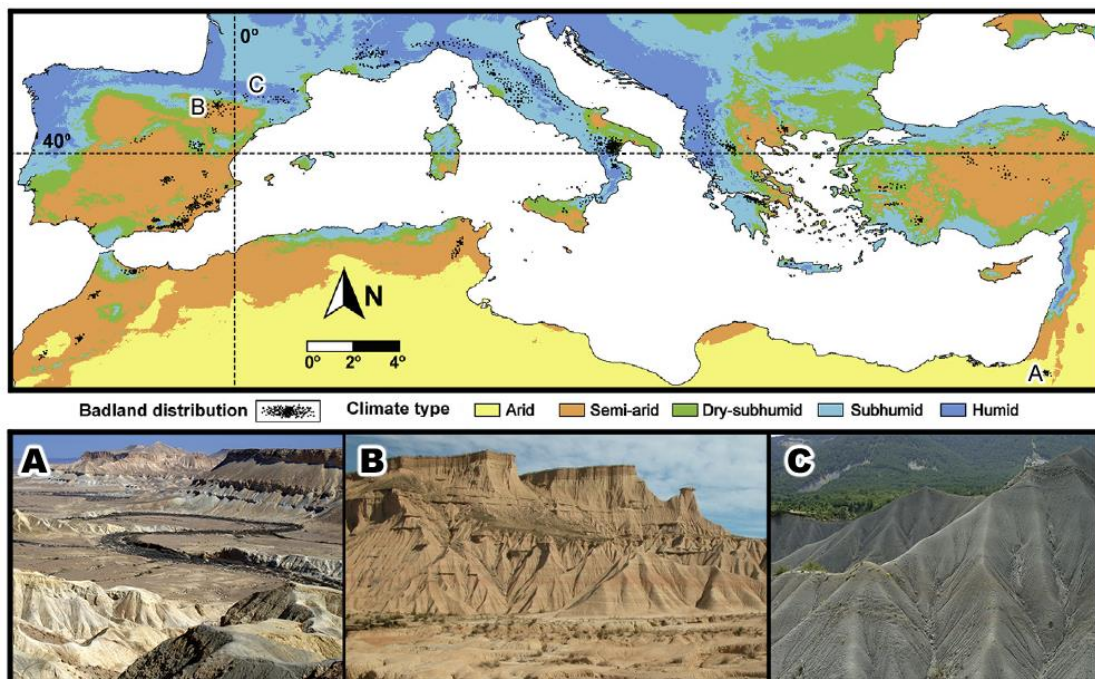


Figura 1. Distribución de los paisajes tipo badlands (puntos negros) en la cuenca mediterránea según su clima (árido (amarillo), semiárido (naranja), subhúmedo seco (verde), subhúmedo (celeste) y húmedo (añil) (modificado de [Moreno-de las Heras y Gallart, 2018](#))) con ejemplos de cada tipo según la clasificación de [Gallart et al. \(2002\)](#): A) badland húmedo en el sector central de los Pirineos (Aragón, España) (fotografía de Estela Nadal Romero), B) badland semiárido en las Bardenas Reales (Navarra, España) (fotografía de Bruno Barral) y C) badland árido en el valle del Zin (Israel) (fotografía de David Shankbone).

En segundo lugar, la clasificación distingue los badlands semiáridos y subhúmedos secos (Figura 1 B), típicos de regiones con una precipitación anual de entre 200 y 700 mm y niveles de evapotranspiración potencial moderados. Las interacciones entre el clima, la vegetación y la topografía locales provocan mayores tasas de erosión en pendientes expuestas que reciben mayor cantidad de radiación solar, donde el desarrollo de la vegetación es más limitado y no puede compensar los efectos de la erosión ([Kirkby et al., 1990](#); [del Prete et al., 1997](#); [Bochet et al., 2009](#)). Esta limitación reside en la disponibilidad del agua, dando lugar a paisajes asimétricos con fuertes contrastes en la densidad de vegetación entre zonas de solana y umbría. Autores como [Wise et al. \(1982\)](#) afirman que pueden ser relativamente antiguos (algunos hasta de 40.000 años de antigüedad) y suelen haber experimentado varias fases de incisión y estabilización a lo largo de su evolución. Por último, los badlands subhúmedos y húmedos (Figura 1 C) son típicos de regiones montañosas con una precipitación anual superior a 700 mm y elevados niveles de evapotranspiración potencial. Suelen ser paisajes mucho más recientes en los que la vegetación crece sin dificultades, donde se observan mayores tasas de erosión debido a la acción del hielo y

las abundantes precipitaciones que caen sobre las superficies rocosas expuestas, con tasas de denudación de hasta 10 mm anuales (Nadal-Romero y Regüés, 2010; Descroix y Mathys, 2003; Vericat *et al.*, 2014).

Uno de los procesos de erosión más comunes en los badlands es el piping o sufosión, y por ello numerosos autores establecen una conexión directa entre ambos términos (Calvo-Cases *et al.*, 2011; Desir y Marín, 2011; Faulkner 2013). Bocco (1991) calcula que alrededor del 60% de los badlands de Europa muestran signos claros de piping, y Higgins (1990) afirma que se trata del responsable de la formación de mayoría (si no todas) las cárcavas estudiadas en las regiones mediterráneas de California. El concepto se puede entender de varias maneras y su definición formal ha sido ampliamente debatida por autores como Parker y Higgins (1990), Bryan y Jones (1997), Richards y Reddy (2007) o Wilson *et al.* (2013, 2018), pero en general se puede entender como el proceso de formación de conductos lineales subsuperficiales (*pipes*) en suelos o sedimentos poco consolidados (Bernatek-Jakiel y Poesen, 2018). Se trata de un proceso producto de la combinación de diferentes factores ambientales entre los que destacan las características del suelo o regolito, la topografía, el gradiente hidráulico local y las condiciones climáticas (Gutiérrez *et al.*, 1997), destacando la importancia de las características fisicoquímicas del suelo: Ternan *et al.* (1998) afirman que la presencia de arcillas expansivas (como la montmorillonita, la illita o la caolinita), valores de SAR (*Sodium Adsorption Ratio*) por encima de 0.4 y elevados niveles de dispersión y sodio intercambiable son los principales desencadenantes de los procesos de piping en un suelo. También hay que tener en cuenta aquellos factores que favorezcan la canalización del flujo, como la presencia de grietas, conductos o madrigueras en el sustrato que faciliten la infiltración del agua (Harvey, 2004).

La evolución del piping supone el desarrollo de una red de conductos subsuperficiales (a menos de cinco metros de profundidad) que se ve favorecido por la presencia de niveles poco permeables que permiten la circulación horizontal. Estos pipes pueden llegar a colapsar debido al peso del sedimento suprayacente y generar hoyos o agujeros de dimensiones variables (Figura 2) cuya distribución constituye uno de los métodos de estudio de los procesos de piping más comunes, aunque Bernatek y Kondracka (2016) señalan que los resultados pueden subestimar su extensión hasta en un 50% y otros autores aseguran que por el momento no existen métodos satisfactorios que permitan calcular el alcance real de las redes y pipes y crear modelos de predicción fiables (Wilson *et al.*, 2017a; Bernatek-Jakiel y Poesen, 2018). El número de estudios relativos al análisis de los procesos de erosión y, más concretamente, del piping ha aumentado significativamente en los últimos años, pero los elevados costes económicos y logísticos que llevan asociados, así como la necesidad de contar con una amplia perspectiva temporal, hacen que sean considerados como uno de los procesos geomorfológicos más difíciles de estudiar y cuantificar (Faulkner, 2013).

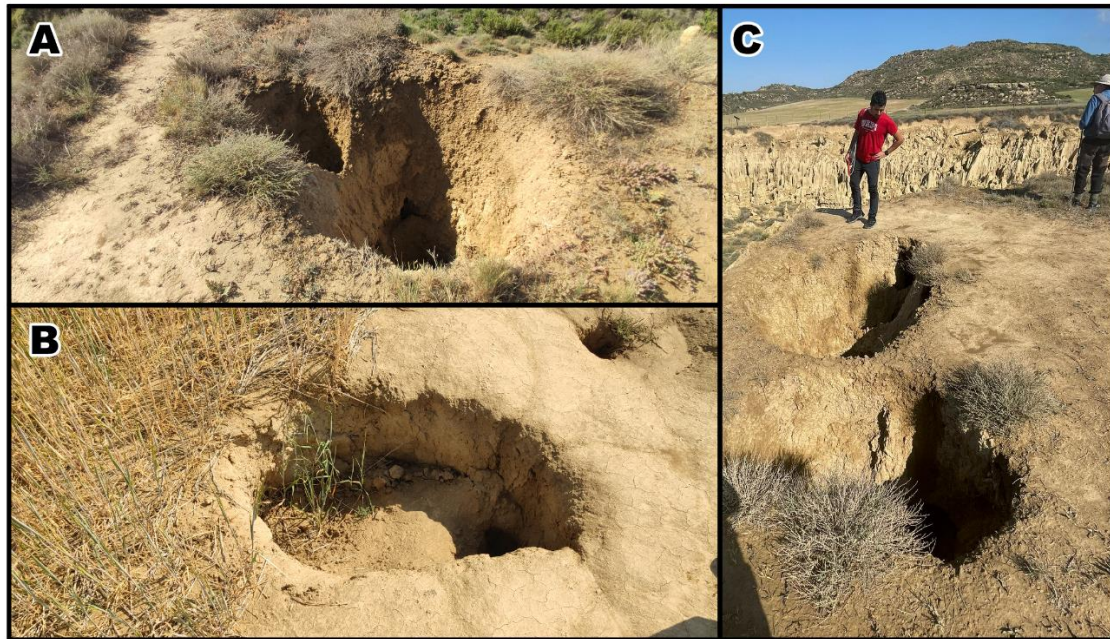


Figura 2. Ejemplos de colapsos en los Aguarales de Valpalmas (Aragón, España): A) Coalescencia de agujeros producto del colapso de varios pipes; B) Colapso junto a un campo de cultivo de cereal activo en la actualidad (fotografías de la autora (23/05/23)); C) Colapsos individuales (fotografía de Estela Nadal Romero (23/05/23)).

En general, la erosión del suelo se percibe como uno de los problemas ambientales más importantes a escala global (López-Bermúdez, 2002) al tratarse de un elemento natural que cumple muchas funciones ecosistémicas fundamentales: regulación de procesos (como la infiltración de agua o el almacenamiento de carbono), refugio de biodiversidad (más de un 25% a escala mundial (FAO *et al.*, 2020)), proveedor de recursos (alimento, biomasa, materiales) o el propio soporte sobre el que se desarrollan las actividades humanas (Keesstra *et al.*, 2021; Koppitke *et al.*, 2019; Tóth *et al.*, 2013), entre otros. Se estima que los procesos de erosión provocan pérdidas de hasta 30 Gt de suelo cada año teniendo en cuenta tan solo la erosión superficial (FAO, 2015). Este problema es especialmente acuciante en regiones de clima contrastado que se encuentran bajo una fuerte presión antrópica, como es el caso de las regiones mediterráneas y, más concretamente, España: la intensidad de las precipitaciones (habiendo casos donde gran parte de la precipitación anual se concentra en periodos de tiempo muy cortos), la abundancia de afloramientos de rocas blandas fácilmente meteorizables (como margas y lutitas) y la escasa cobertura vegetal (consecuencia de una larga historia de actividades humanas) constituyen un escenario ideal para el desarrollo de los procesos de erosión y la formación de paisajes tipo badland, siendo especialmente frecuentes en las regiones españolas semiáridas y subhúmedas (García-Ruiz y López-Bermúdez, 2009). Hay que tener en cuenta que la erosión del suelo en España no es un problema nuevo: los numerosos estudios arqueológicos, palinológicos, sedimentológicos y paleoambientales que se han realizado en las últimas décadas (Carrión *et al.*, 2001, 2003; Verger, 1995) apuntan a una pérdida progresiva de las masas forestales y de matorral debido a la creciente presión antrópica y variabilidad climática desde principios del Holoceno.

Además, existen diferentes factores propios del dominio mediterráneo que favorecen el desarrollo de procesos geomorfológicos como los fuertes contrastes estacionales o la fragilidad de los suelos (pobres en materia orgánica que tienden a mineralizarse con rapidez, desarrollando finas películas que favorecen la escorrentía superficial).

En este sentido, los badlands son paisajes relativamente frecuentes en España. Debido a sus características climáticas y a la presencia de extensos afloramientos de rocas fácilmente erosionables, estos paisajes son especialmente frecuentes en el sureste español (como los ejemplos del Campo de Tabernas (Almería) o los abarrancamientos de las depresiones de Guadix y Baza (Granada) (Nogueras *et al.*, 2000; Díaz-Hernández y Juliá, 2006)), pero también pueden encontrarse en la Depresión del Ebro (donde destacan las Bardenas Reales (Desir y Marín, 2011, 2013)) y, de manera más dispersa, en los Pirineos aprovechando los afloramientos margosos de la Depresión Interior Altoaragonesa, Cuenca de Campo y de Tremp o los afloramientos arcillosos de Vallcebre (Alto Llobregat) (Nadal-Romero *et al.*, 2007; Moreno-de las Heras y Gallart, 2016; Regüés *et al.*, 1995), demostrando la posibilidad de formación de estos paisajes bajo condiciones muy diferentes. Sin embargo, aunque todos estos casos muestran características comunes como la ausencia de vegetación o una baja capacidad de infiltración, estudios como Harvey y Calvo (1989) o López-Bermúdez y Romero (1989) han demostrado que existen importantes variaciones en la dinámica hidrológica y geomorfológica entre diferentes badlands asociadas a la propia litología sobre la que se asientan y a las características del clima local.

Por otro lado, muchos autores insisten en la importancia de los cambios de los usos del suelo a la hora de hablar sobre erosión de suelo en España, un país cuya historia de cambios y conflictos ha alterado el territorio a lo largo de los siglos. Durante la época romana se produjeron importantes cambios en las superficies arboladas para la ampliación de las zonas de cultivo y el pastoreo, reduciendo su extensión a la mitad de su estado original (Urteaga, 1987), y, aunque durante las épocas venideras existieron normas que velaban por la conservación y protección del suelo productivo y los bosques, durante el S.XIII fueron otorgados extensos privilegios a los pastores debido al notable desarrollo de su actividad durante el último siglo, impulsando el auge de la ganadería lanar a costa del bosque. Según Klein (1936): “fue un momento decisivo para la historia forestal de España y para la desolación de las regiones forestales del reino”. No fue hasta el S.XVII que se abordó la alarmante situación de los bosques mediterráneos mediante ordenanzas que prohibían su destrucción y planeaban su recuperación mediante reforestaciones, siendo en definitiva insuficientes y perpetuando esta problemática. En la actualidad se cuenta con el Plan Nacional de Actuaciones Prioritarias en materia de Restauración Hidrológico-Forestal, control de la Erosión y lucha contra la Desertificación, que se encuentra ligado a otros instrumentos de ordenación nacional como el Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (PAND), el Plan Forestal Español, el Plan Nacional de Restauración Hidrológico-Forestal y los Planes

Hidrológicos de Cuenca. Por último, el Real Decreto 1415/2000 establece la realización de un Inventario Nacional de Erosión del Suelo (INES) con el objetivo de localizar, cuantificar y analizar la evolución de los procesos de erosión, delimitando áreas prioritarias de actuación y constituyendo un sistema de datos de fácil acceso que facilite la participación y educación ciudadana.

A pesar de la relevancia de la agricultura a lo largo de la historia de España y las alteraciones que ha sufrido el medio natural para permitir su expansión, uno de los hitos más notables de la evolución de la agricultura española es el súbito abandono de las tierras de cultivo durante el S.XX. Se trata de un fenómeno global con especial incidencia en países desarrollados (Strijker, 2005) motivado por factores muy diversos. Lasanta *et al.* (2021) realizan una síntesis de las causas del abandono de tierras en España: (i) migración de la población rural a las ciudades y el envejecimiento de la que permanece en los campos (Ruiz-Sinoga *et al.*, 2011; Kosmas *et al.*, 2002, Meléndez-Pastor *et al.*, 2014); (ii) la mecanización de las tareas agrícolas, provocando el abandono de campos poco accesibles o demasiado pequeños (Lasanta, 1988a; Nagendra *et al.*, 2003; Onega-López *et al.*, 2010); (iii) la baja productividad de algunos campos debido a la falta de fertilidad o suelos con horizontes poco desarrollados o pedregosos (Duarte *et al.*, 2008); (iv) la elevada competitividad de los mercados (García-Ruiz *et al.*, 2015; Van Leeuwen *et al.*, 2019); (v) los efectos de la Política Agrícola Común (PAC), que entre 1989 y 2008 incentivó el abandono de tierras agrícolas de manera permanente o temporal (Boellstorff y Benito, 2005; Alonso *et al.*, 2016b), (vii) la existencia de ocupaciones alternativas (Kozak *et al.*, 2004; Rey-Benayas *et al.*, 2007), y (viii) factores vinculados a la gestión de los campos y relacionados con un manejo inadecuado de las explotaciones agrarias (sobrexplotación y salinización del suelo, reiteración de cultivos hortícolas intensivos, proliferación de problemas fitopatológicos, abandono de determinadas prácticas tradicionales de conservación del suelo, etc.) (Vera y Romero, 1994; Guerrero *et al.*, 2014; Espadas, 1996; Franco y Calatrava, 2010).

La bibliografía relativa a la extensión de tierras abandonadas en España es relativamente escasa a pesar de ser un proceso generalizado, especialmente en las montañas españolas. Dado que el primer documento que permitió cuantificar este fenómeno fue la fotografía aérea de 1956, se distinguen dos etapas principales: una primera fase de abandono previa a dicho año que es vinculada únicamente a los factores físicos locales (parcelas de fuerte pendiente con suelos poco fértiles y pedregosos) y una segunda fase posterior en la que el abandono está relacionado con la integración de cada región en la economía nacional (ya que las parcelas más fácilmente mecanizables ofrecen productos más competitivos y tienen una mejor accesibilidad al mercado). Arnáez *et al.* (1990) señalan que el 63% del espacio agrícola del Pirineo aragonés ya se había abandonado antes de 1956, quedando las superficies agrícolas limitadas posteriormente a los valles glaciares, rellanos de obturación glaciaria y conos de deyección que ofrecen superficies llanas

con pendientes suaves. Por otro lado, la información disponible sobre el abandono de superficies agrícolas en tierras llanas es más limitada: se estima que en España se abandonaron 995.599 ha entre 1989 y 1993, afectando fundamentalmente a comarcas de secano cerealista con grandes explotaciones, y se comprobó que la influencia de la PAC afectó principalmente a los secanos semiáridos (Lasanta, 1996). Este abandono ha progresado recientemente en las zonas semiáridas del sureste de España y del centro de la Depresión del Ebro debido a la baja productividad de las tierras de secano y a problemas ligados con la salinización y degradación de los suelos (Lesschen *et al.*, 2007; Romero-Díaz *et al.*, 2007; Fister y Ries, 2009; Alonso-Sarría *et al.*, 2016a), como es el caso de la zona de estudio que se contempla a continuación.

El presente Trabajo de Fin de Máster evalúa desde un punto de vista planimétrico y volumétrico la evolución de una zona tradicionalmente dedicada a la agricultura situada en el sector central de la Depresión del Ebro: los Aguarales de Valpalmas, un paisaje transformado por los procesos de erosión. La hipótesis de partida estima que el progresivo abandono del espacio agrícola que ha experimentado la zona es debido a estos procesos, especialmente al piping, muy activo en el área de estudio. Por ello, el objetivo principal es realizar una cuantificación de los cambios en las superficies agrícolas asociados a la acción de estos procesos y de la variación volumétrica del suelo allí donde estas superficies han experimentado una reducción de su extensión. Esto ha sido posible gracias a la aplicación de herramientas SIG, con las que se ha analizado la evolución en planta de cada campo por separado, y a la reconstrucción del paisaje histórico con fotogrametría digital automatizada, que ha permitido recrear los modelos de periodos anteriores necesarios para el estudio volumétrico a una escala temporal más amplia. Por otro lado, también se pretende profundizar en la dinámica geomorfológica de los Aguarales a partir del cálculo de diferentes parámetros químicos de las muestras de sedimento recogidas en el área de estudio, así como la elaboración de cartografías que reflejen la evolución de los procesos de erosión a lo largo del tiempo y la redacción de propuestas de ordenación del territorio a lo relativo al posible atractivo turístico del área de estudio como Lugar de Interés Geológico y su beneficio potencial en la economía local del municipio de Valpalmas.

El desarrollo de este trabajo se ha realizado en régimen de prácticas en las instalaciones del Instituto Pirenaico de Ecología (IPE) de Zaragoza durante los meses de mayo a septiembre de 2023. En el mismo centro también se han desarrollado otros trabajos de la misma zona como Ferrer (2016), que analiza su dinámica geomorfológica mediante la aplicación de tecnologías novedosas como el láser escáner terrestre (TLS) o la fotogrametría terrestre (SfM), Bernatek *et al.* (2019), que caracterizan y analizan la distribución de los colapsos producidos por el piping, o Bernatek-Jakiel y Nadal-Romero (2021), que identifican posibles nuevas oportunidades de investigación en las zonas afectadas por procesos de erosión y cómo estas afectan a la sociedad, constituyendo puntos de partida para el presente trabajo.

2. Área de estudio

Los Aguarales de Valpalmas (también conocidos como los Aguarales de Valdemilaz) es una formación geológica situada en el sector central de la Depresión del Ebro ($42^{\circ} 09' 11''$ N; $0^{\circ} 49' 03''$ O), en la comarca de las Cinco Villas, al noroeste de la provincia de Zaragoza (Aragón, España) (Figura 3). Se trata de un paraje de especial valor científico declarado Lugar de Interés Geológico (LIG) en el año 2015 por el Gobierno de Aragón con el código ARP035 (“Badlands de los Aguarales de Valpalmas”). Forma parte de la estructura tectónica generada en la orogenia alpina durante el Cenozoico, situándose entre los Pirineos, el Sistema Ibérico y la Cordillera Costero-Catalana (Ferrer *et al.*, 2017). Los procesos de erosión cobran especial importancia en esta región, presentando su máximo desarrollo en los sedimentos que colmatan los valles holocenos, ricos en arcillas. Estudios mineralógicos más detallados como el de Ferrer (2016) indican que su composición incluye cuarzo (40%), carbonatos (tanto calcita (35%) como dolomita (2%)) y distintos tipos de arcillas (principalmente illita (12%) y clorita (6%)). Como resultado de estos procesos se obtiene un paisaje ruiniforme con importantes escarpes verticales y estructuras en forma de pináculos que pueden llegar a alcanzar los tres metros de altura.

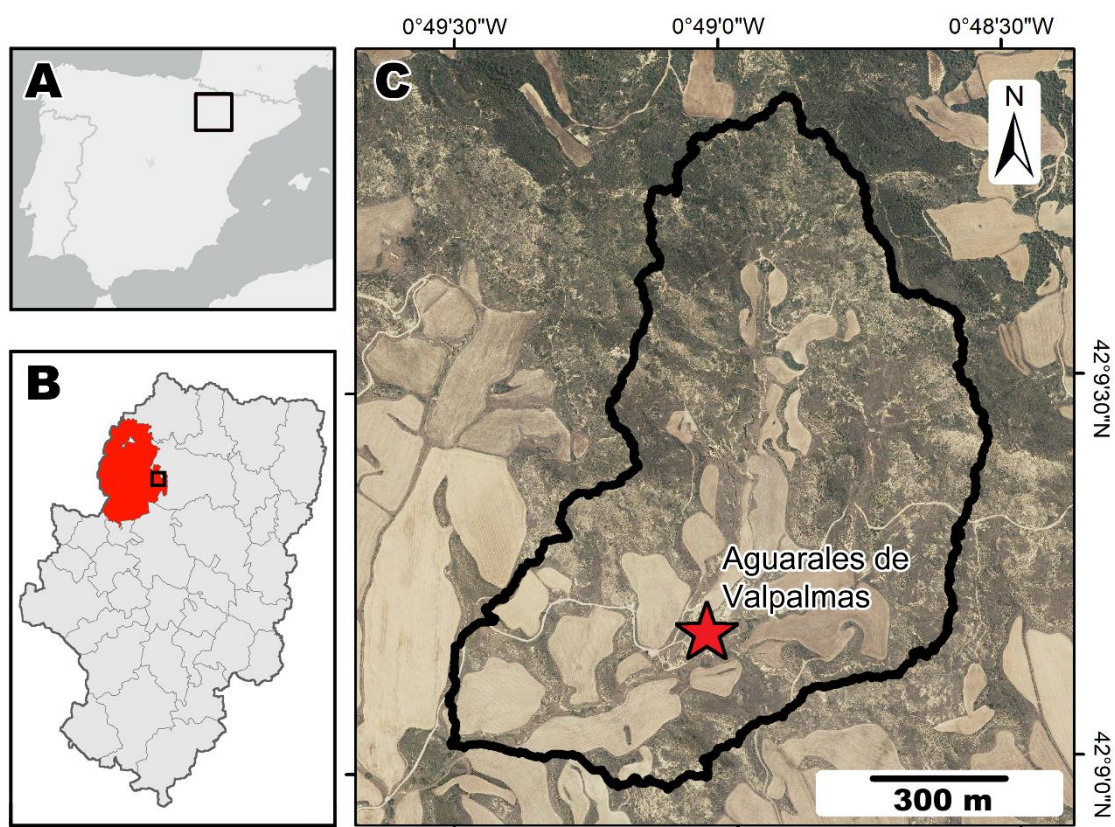


Figura 3. A) Localización del área de estudio en España (cuadrado negro). B) Localización del área de estudio en Aragón (cuadrado negro), dentro de la comarca de las Cinco Villas (en rojo). C) Delimitación del área de estudio (perímetro negro) y localización exacta del Lugar de Interés Geológico ARP035 (estrella roja) (elaboración propia con ArcMap y la ortofotografía del año 2021 obtenida del CNIG).

Geológicamente, los Aguarales se asientan sobre un basamento terciario formado por los sedimentos de la Unidad Galocha-Ontiñena (4) y de la Unidad Bujaraloz-Sariñena (8) (Figura 4).

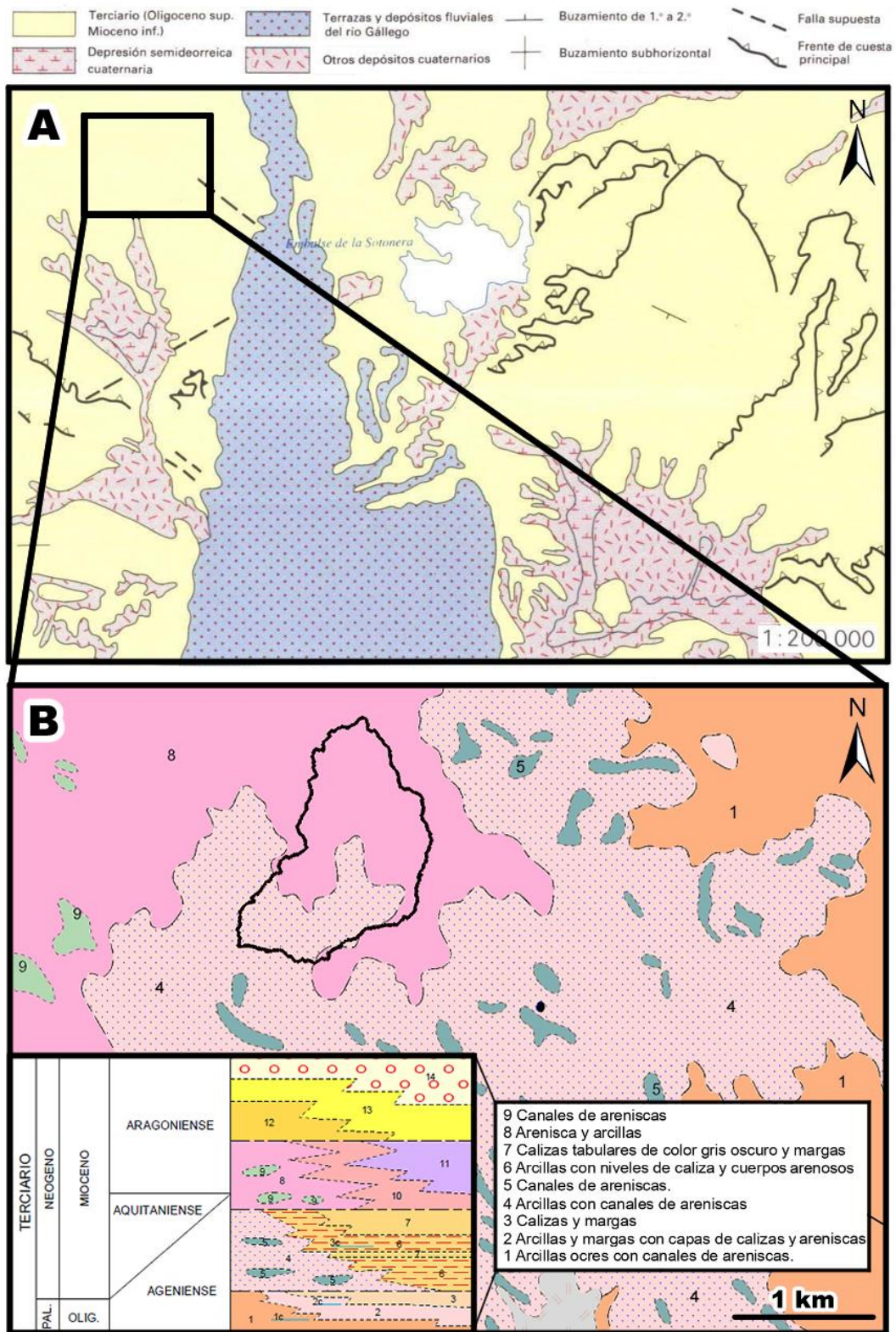


Figura 4. A) Esquema morfoestructural de la Hoja nº 285 del Mapa Geológico de España donde la localización aproximada del área de estudio se ha indicado mediante un rectángulo negro. B) Mapa geológico de la sección previamente señalada, correspondiente a los alrededores del área de estudio (señalada con un perímetro negro) y su leyenda parcial (modificado de Del Olmo et al., 1987)

La primera (4) está caracterizada por la alternancia de arcillas y areniscas de color pardo-rojizo, donde las areniscas (identificadas como sublitarenitas) se organizan en forma de bancos o estratos tabulares, representando el relleno de paleocanales de ríos meandriformes o depósitos de llanura de inundación respectivamente. Algunas de las areniscas se han cartografiado como cuerpos aislados (5) debido a sus mayores dimensiones (entre 0.5 y 2 metros) y características (bases erosivas, laminación paralela y *ripples*). La segunda (8) representa la base de la Unidad Bujaraloz-Sariñena y está compuesta por arcillas con intercalaciones de arenisca, algunas de las cuales se han cartografiado de manera individual (9). Las características de estos materiales permiten interpretarlos como depósitos de sistema aluvial distal (Del Olmo *et al.*, 1990).

El área de estudio (Figura 3 C) abarca una extensión total de 124 ha que incluye el propio LIG y su cuenca de drenaje, por lo que el estudio contempla los procesos erosivos que se desarrollan tanto en los Aguerales como su entorno próximo, centrándose en aquellos que afectan directamente a los campos de cultivo de la zona. Esta muestra muchos de los factores que favorecen el desarrollo de procesos erosivos (como las características mineralógicas o la escasez de vegetación), pero uno de los más notables es el aumento del gradiente hidráulico local debido a la progresiva incisión del Barranco Barreiro, al sureste del área de estudio.

Climatológicamente se trata de un área semiárida con una precipitación medial anual de 526 mm donde las precipitaciones suelen ocurrir en forma de fuertes tormentas durante la primavera o el otoño y una temperatura media anual de 13 °C, correspondiéndose a un clima mediterráneo continentalizado (Ferrer, 2016). Altitudinalmente se encuentra entre los 460 y 625 m.s.n.m.

En general, se trata de un paisaje muy modificado por las actividades humanas y, especialmente, por la agricultura (Figura 5). Su desarrollo y necesidad de expansión durante épocas pasadas ha alterado irremediamente los pisos de vegetación de la zona, al igual que muchas otras regiones españolas. En este caso en la actualidad predominan las especies de porte arbustivo, predominando el romero (*Salvia Rosmarinus*) y el tomillo (*Thymus vulgaris*), ejemplos típicos de matorral esclerófilo que abunda en la región mediterránea.



Figura 5. Panorámica del área de estudio (fotografía de la autora (23/05/23)).

3. Metodología

El siguiente apartado se ha separado en dos bloques principales. En primer lugar se habla de la metodología relacionada con la caracterización geológica de la zona, tal y como es aquella derivada del trabajo realizado durante las visitas de campo y la realizada en el laboratorio. En segundo lugar se aborda la metodología empleada para realizar el análisis geomorfológico de la zona y cuantificar el impacto de los procesos geomorfológicos en el abandono del espacio agrícola. Esta última se basa fundamentalmente en el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el estudio planimétrico y técnicas de fotogrametría digital para el volumétrico.

3.1. Caracterización de materiales

3.1.1. Trabajo de campo

Se han realizado dos visitas al área de estudio durante los meses de mayo y junio de 2023. Durante la primera se realizó una primera toma de contacto con el área, recorriendo el LIG y verificando la extensión de los efectos del piping en los campos de cultivo cercanos, tomando fotografías de los fenómenos más destacables (principalmente colapsos). Durante la segunda visita se recogieron un total de cuatro muestras de sedimento en diferentes puntos del área de estudio (Figura 6) para su posterior estudio, cuyas características se pueden consultar en Tabla 1. En este caso se ha optado por un siglado numérico precedido por el término AG (de Aguarales).

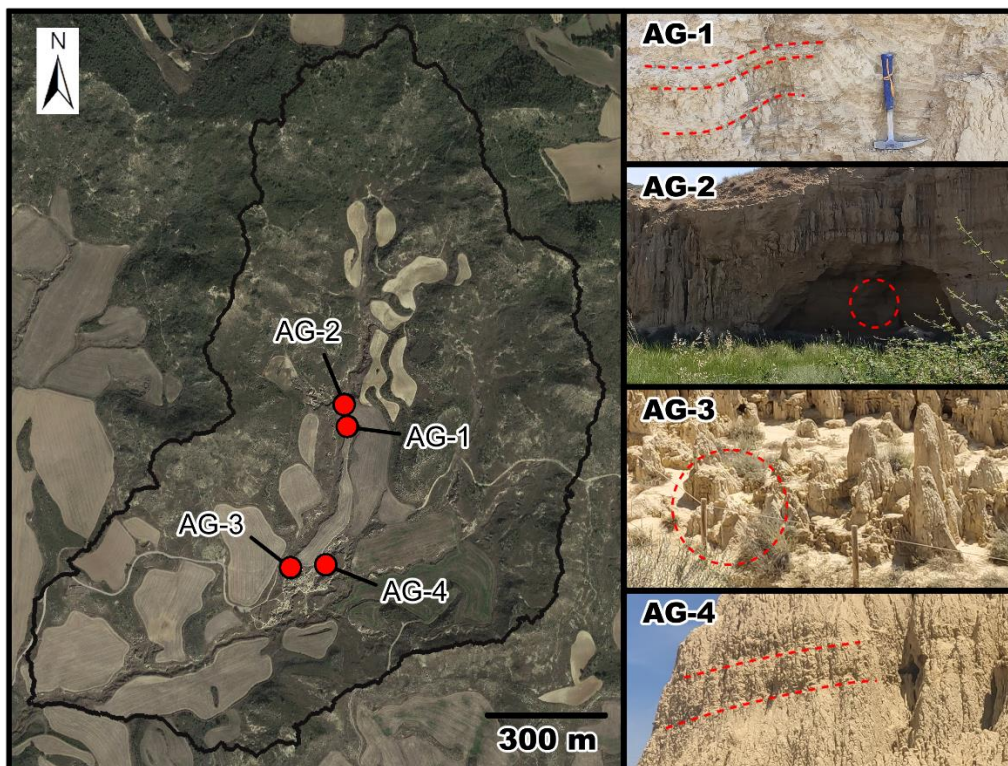


Figura 6. Localización de los puntos de recogida de las muestras en el área de estudio (izquierda) y fotografías del lugar de extracción (derecha) (elaboración propia a partir de Google Earth y fotografías de la autora (15/06/23)).

| Nombre | Latitud | Longitud | Peso total [g] |
|--------|-----------|-----------|----------------|
| AG-1 | 42,156316 | -0,816155 | 948,75 |
| AG-2 | 42,156744 | -0,816176 | 397,75 |
| AG-3 | 42,153398 | -0,817720 | 591,42 |
| AG-4 | 42,153458 | -0,816747 | 412,81 |

Tabla 1. Nombre, coordenadas y peso de las cuatro muestras de sedimento recogidas en el área de estudio.

Estas muestras han sido recogidas en los extremos del valle central que presenta un mayor interés en el área de estudio, dos en su límite norte y dos en su límite sur, para tener una mejor representatividad. A continuación, se realiza una breve descripción de cada una de ellas:

- AG-1: sedimento de una de las paredes que rodea el norte del valle central.
- AG-2: sedimento de la pared interior de un refugio rocoso de interés (ver Figura 6).
- AG-3: fragmento de un pináculo situado en el interior del LIG, cerca del camino.
- AG-4: sedimento de un nivel más resistente en las paredes verticales del LIG.

Las muestras fueron extraídas con la ayuda de una pala y fueron almacenadas en bolsas de plástico. Posteriormente fueron distribuidas en bandejas de aluminio para su secado completo durante dos semanas (Figura 7). Pasado este tiempo se pesó cada muestra para obtener su peso total y se procedió a tamizar las muestras separando la fracción fina (menor a 2 mm) y la gruesa (mayor a 2 mm) para cada una. Para ello se utilizó un tamiz de luz de malla de 2 mm en una tamizadora CISA 200N del laboratorio del Instituto Pirenaico de Ecología de Zaragoza. Las muestras más cementadas (AG-2, AG-3 y AG-4) fueron previamente disgregadas manualmente.

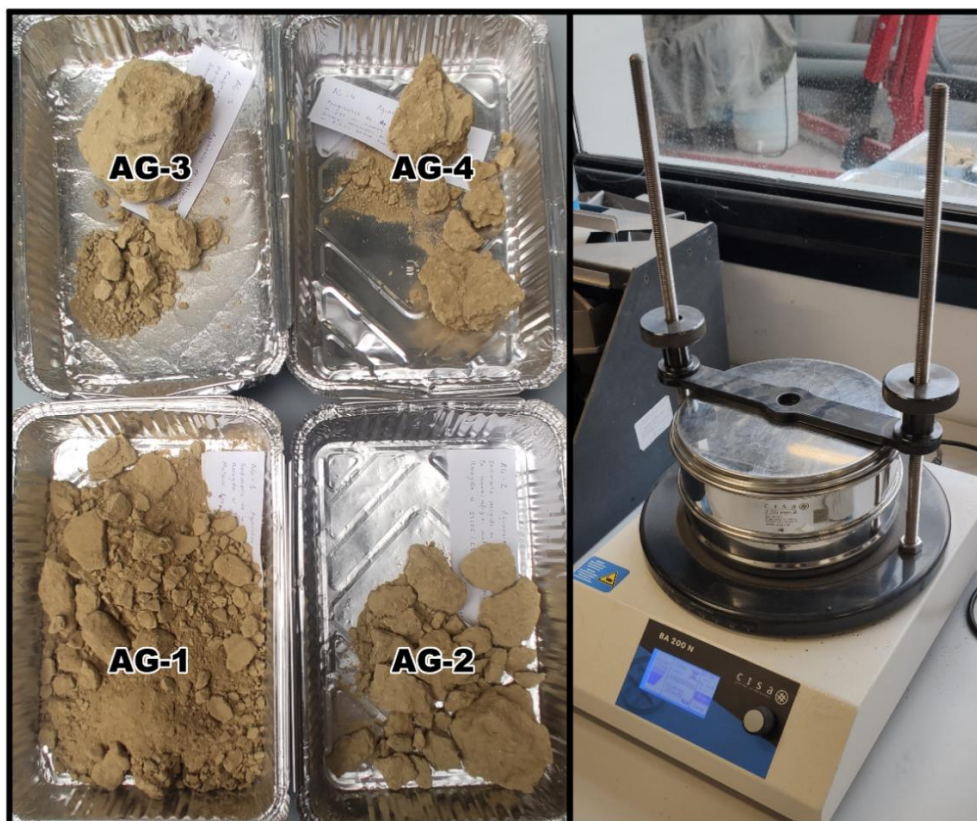


Figura 7. Secado de muestras (izquierda) y tamizadora CISA 200N (derecha) (fotografías de la autora (11/07/23)).

Además de las muestras de sedimento también se encontraron y recogieron unas muestras de milimétricas partículas de carbón en las misma paredes que AG-1 y AG-2 (Figura 8 A) y restos óseos de un animal herbívoro cerca de AG-1 (un cráneo y una mandíbula, ambos a una altura de 1,50 m sobre el nivel del suelo) (Figura 8 B). Dichas muestras no han sido analizadas en el presente trabajo, pero su datación puede constituir un punto de partida para trabajos futuros.

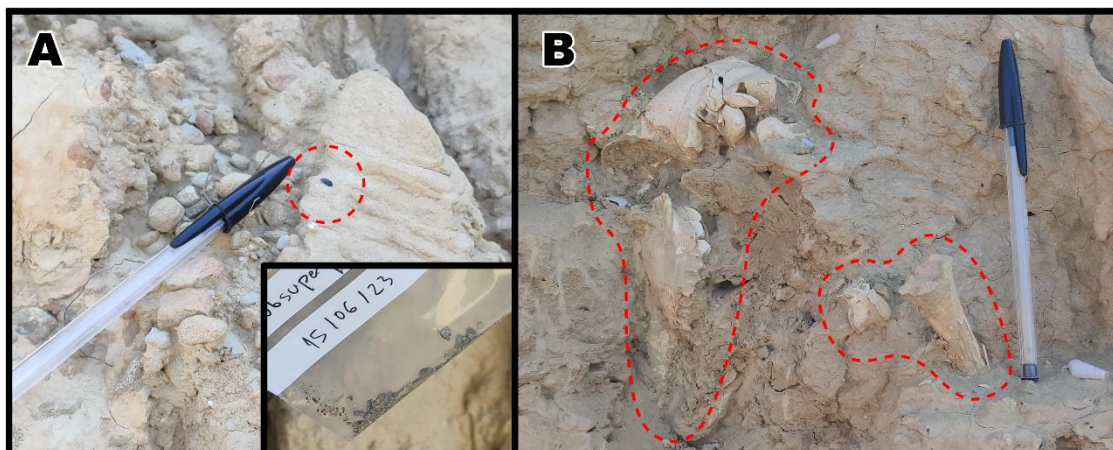


Figura 8. A) Partículas milimétricas de carbón. B) Restos óseos de herbívoro (fotografías de la autora (15/06/23)).

3.1.2. Trabajo de laboratorio

La fracción fina (sedimento de diámetro inferior a 2 mm) obtenida del tamizado anterior se han destinado al cálculo de otros parámetros químicos en el laboratorio del Instituto Pirenaico de Ecología de Zaragoza (carbonatos, pH y conductividad) y de Jaca (texturas o granulometría).

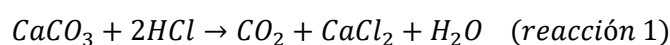
Carbonatos

La determinación de la cantidad de carbonatos total en una muestra es especialmente útil a la hora de diagnosticar diferentes propiedades del suelo tales como su estructura, su actividad biológica o el transporte de nutrientes, entre otros. Un elevado contenido en carbonatos en un suelo puede tener una acción positiva sobre su estructura y su actividad microbiana, pero un exceso puede provocar problemas a las especies vegetales por antagonismo con otros elementos.

En este caso esta medición se ha llevado a cabo con la ayuda de un calcímetro de Bernard (Figura 9 A): este método se basa en la comparación de los volúmenes de anhídrido carbónico desprendido por pesos conocidos de muestra analizada y carbonato cálcico puro (CaCO_3 , denominado “blanco”, Figura 9 C) en las mismas condiciones de temperatura y presión atmosféricas, siguiendo en todo momento el protocolo oficial establecido por el Servicio de Análisis del Instituto Pirenaico de Ecología. En primer lugar, se ha comprobado la reactividad de las muestras al ácido clorhídrico (HCl) (según la reacción 1) para tener una idea inicial de la cantidad de carbonato que presentan, disponiendo una pequeña cantidad de muestra en vidrios de reloj y añadiendo dos gotas de HCl a

cada una (Figura 9 B). En todos los casos se ha observado una reacción visible ante el ácido, permitiendo confirmar que todas las muestras poseen valores notables de carbonatos en ellas. A continuación, se indican los pasos seguidos durante el experimento, de acuerdo con las indicaciones del protocolo:

1. Pesar 0,75 g de cada muestra e introducirla en un matraz de Erlenmeyer de 100 ml (P).
2. Mezclar la muestra con 5 ml de HCl (6 M).
3. Conectar el matraz al calcímetro de Bernard una vez comience la reacción.
4. Igualar la altura de los meniscos de la ampolla del calcímetro y de la bureta.
5. Leer el volumen de CO₂ desprendido por cada muestra (V).
6. Realizar el mismo procedimiento con 0,20 g de CaCO₃ (P') y leer el volumen (V').



Una vez obtenidos el peso de cada muestra y su volumen de CO₂ desprendido tanto para las muestras de suelo (P, V) como para la muestra de CaCO₃ puro utilizada (P', V') se ha aplicado la fórmula indicada en el protocolo (fórmula 1) para obtener finalmente el porcentaje de carbonato presente en cada muestra.

$$\% \text{ de CaCO}_3 = 100 \cdot \frac{P' \cdot V}{V' \cdot P} \quad (\text{fórmula 1})$$

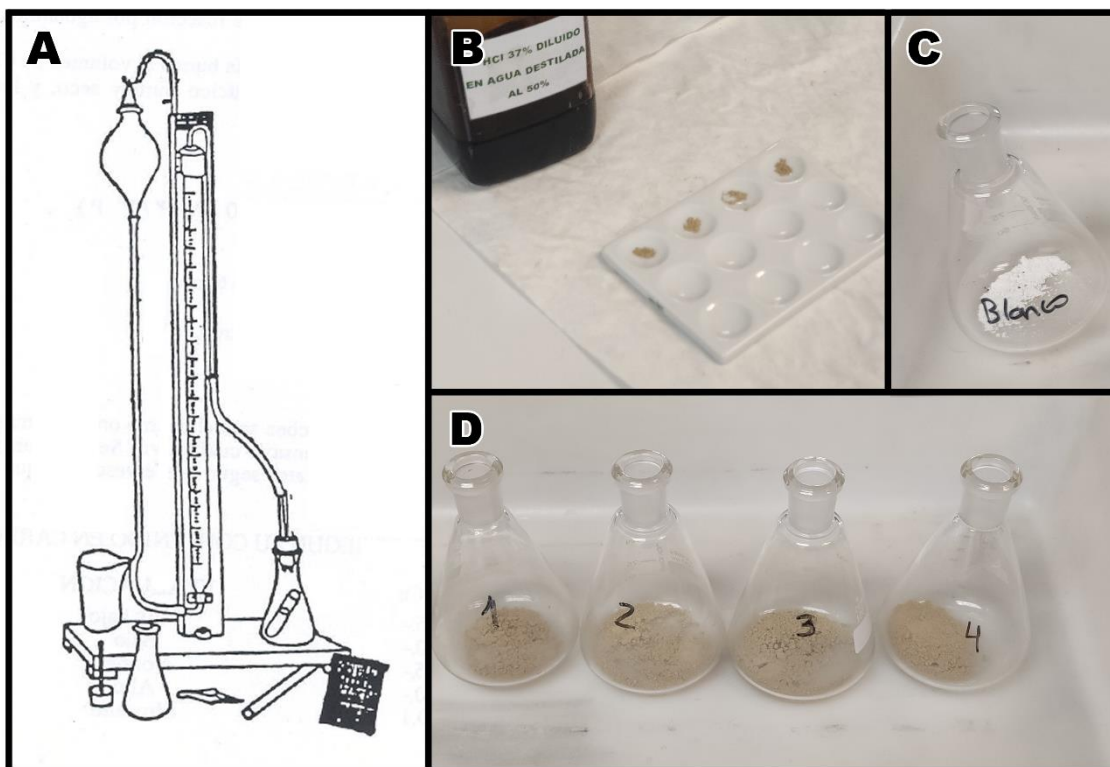


Figura 9. A) Ilustración de un calcímetro de Bernard (modificada del protocolo). B) Preparación de muestras para observar su reactividad ante HCl. C) Muestra de carbonato cálcico puro (denominado "blanco") utilizado en el procedimiento. D) Muestras de suelo analizadas (fotografías de la autora (18/07/23)).

Una vez obtenido el porcentaje de carbonatos presente en cada muestra, se siguen los criterios de clasificación indicados en el protocolo y recogidos en la Tabla 2. Esta clasificación contempla valores de contenido porcentual de carbonatos en un suelo de 0% a 40%:

| % de CaCO ₃ | Denominación |
|------------------------|--------------|
| 0 – 5 | Muy bajo |
| 5 – 10 | Bajo |
| 10 – 20 | Normal |
| 20 – 40 | Alto |
| > 40 | Muy alto |

Tabla 2. Criterios de clasificación del contenido de carbonato en suelo según el protocolo.

Valor de pH

El pH es una medida de la acidez o de la alcalinidad de un suelo a partir del cálculo de la actividad de los iones hidronio (H⁺) en una solución, pudiendo tomar valores entre 1 (más ácido) y 14 (más básico), siendo 7 el valor neutro. Este parámetro es considerado una de las principales variables del estudio de suelos, ya que condiciona muchos de los procesos químicos que allí se producen como la movilidad de nutrientes o el tipo de reacciones que se producen.

En este caso se utilizará el método potenciométrico, que permite determinar el valor de pH de soluciones turbias (como las suspensiones de suelo). Para ello, se ha seguido el protocolo oficial del Servicio de Análisis de Instituto Pirenaico de Ecología para el método potenciométrico:

1. Preparar una solución de muestra (10 g) en agua destilada (25 ml).
2. Calibrar el potenciómetro con tampones de pH 10, 7 y 4, en orden decreciente.
3. Limpiar los electrodos con agua destilada y secar adecuadamente.
4. Introducir el electrodo en la solución y medir el pH para cada muestra.

Finalmente se seguirán los criterios de clasificación establecidos por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) en lo relativo al pH en suelos, ya que se trata de la clasificación más adecuada según el protocolo (Tabla 3):

| Valor de pH | Denominación |
|-------------|--------------------------|
| < 3,5 | Ultra ácido |
| 3,5 – 4,4 | Extremadamente ácido |
| 4,5 – 5,0 | Muy fuertemente ácido |
| 5,1 – 5,5 | Fuertemente ácido |
| 5,6 – 6,0 | Moderadamente ácido |
| 6,1 – 6,5 | Ligeramente ácido |
| 6,6 – 7,3 | Neutro |
| 7,4 – 7,8 | Ligeramente alcalino |
| 7,9 – 8,4 | Moderadamente alcalino |
| 8,5 – 9,0 | Fuertemente alcalino |
| > 9,0 | Muy fuertemente alcalino |

Tabla 3. Clasificación de la acidez o alcalinidad de un suelo según su valor de pH (USDA, 1999).

Este valor de pH depende principalmente de la roca madre sobre la que se ha originado dicho suelo, ya que cuando esta es erosionada los iones que constituyen sus minerales pasan al suelo contribuyendo a la cantidad de iones presentes. Por otro lado, hay ciertos factores concretos que pueden contribuir a la acidez del suelo (como el uso de fertilizantes, presencia de desechos mineros o lluvia ácida) o su alcalinidad (como la acumulación de sales solubles que provoquen una alta saturación de cationes ácidos (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+) en el suelo).

Conductividad Eléctrica (CE)

Se trata de un parámetro asociado a la salinidad de los suelos, ya que su valor está directamente relacionado con la cantidad de sales solubles, tanto cationes (sodio, calcio, magnesio, potasio) como aniones (carbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos). Es un parámetro directamente relacionado con el valor de pH, con la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y con la capacidad de dispersión de las arcillas de un suelo. Además, la acumulación de estas sales en un suelo depende de las condiciones climáticas locales, especialmente de la evapotranspiración.

El cálculo de la conductividad eléctrica se ha realizado mediante conductimetría siguiendo el protocolo oficial del Servicio de Análisis del Instituto Pirenaico de Ecología:

1. Preparar una solución de muestra (10 g) en agua destilada (50 ml).
2. Agitar mecánicamente durante media hora y dejar reposar unos minutos.
3. Filtrar la solución con ayuda de papel filtro.
4. Introducir el electrodo del conductímetro en la solución filtrada y leer la conductividad.

Para clasificar el suelo según su valor de conductividad se seguirá los criterios de clasificación indicados en el protocolo anterior y que se muestran en la Tabla 4:

| Valor de conductividad [mS/cm] | Denominación |
|--------------------------------|--------------------------|
| < 2 | Suelo no salino |
| 2 – 4 | Suelo ligeramente salino |
| 4 – 8 | Suelo salino |
| 8 – 16 | Suelo muy salino |

Tabla 4. Clasificación para valores de conductividad según el protocolo.

Textura o granulometría

Todo suelo contiene componentes minerales de distintos tamaños, desde grandes fragmentos de roca hasta partículas microscópicas de carácter coloidal, por lo que el objetivo de esta técnica es obtener la proporción en la que se encuentran estos elementos en una muestra de suelo. La determinación de los elementos gruesos es más simple ya que se puede realizar a simple vista y con técnicas más sencillas, pero la determinación de la fracción fina presenta mayores dificultades y requiere del uso de técnicas más sofisticadas. Se ha recurrido al servicio de difracción láser de los laboratorios del Instituto Pirenaico de Ecología en la sede de Jaca.

3.2. Análisis geomorfológico

En este apartado se desarrolla el estudio realizado de los procesos de piping activos en el área de estudio y como estos afectan a los campos de cultivo próximos desde un punto de vista planimétrico y volumétrico a partir de la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y de un programa dedicado al procesamiento fotogramétrico de imágenes, respectivamente.

3.2.1. Estudio planimétrico

El punto de partida de esta parte ha consistido en ortofotografías históricas de periodos temporales sucesivos: 1957, 1977 y 1997 (Figura 10 A, B, C), así como ortofotografías del Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA) del año más reciente disponible (2021, Figura 10 E), permitiendo observar cambios en el área de estudio en un secuencia temporal más o menos regular (20 años para las ortofotografías históricas y 24 años para el periodo más actual). También se decidió incluir la del año 2009 para obtener un estudio más detallado para la última década de evolución (Figura 10 D). Todas ellas han sido obtenidas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) a través de su Centro de Descargas. Al tratarse de vuelos diferentes las características de cada ortofotografía varían de unas a otras, pudiéndose consultar en la Tabla 5.

| Año | Resolución | Bandas | Fuente |
|------|------------|--------------|-------------------------|
| 1957 | 0,50 m | Pancromático | Vuelo Americano Serie B |
| 1977 | 0,30 m | Pancromático | Vuelo Interministerial |
| 1997 | 1,00 m | Pancromático | Vuelo Olistat |
| 2009 | 0,50 m | RGB | Proyecto PNOA |
| 2021 | 0,25 m | RGB | Proyecto PNOA |

Tabla 5. Características técnicas de las ortofotografías utilizadas.

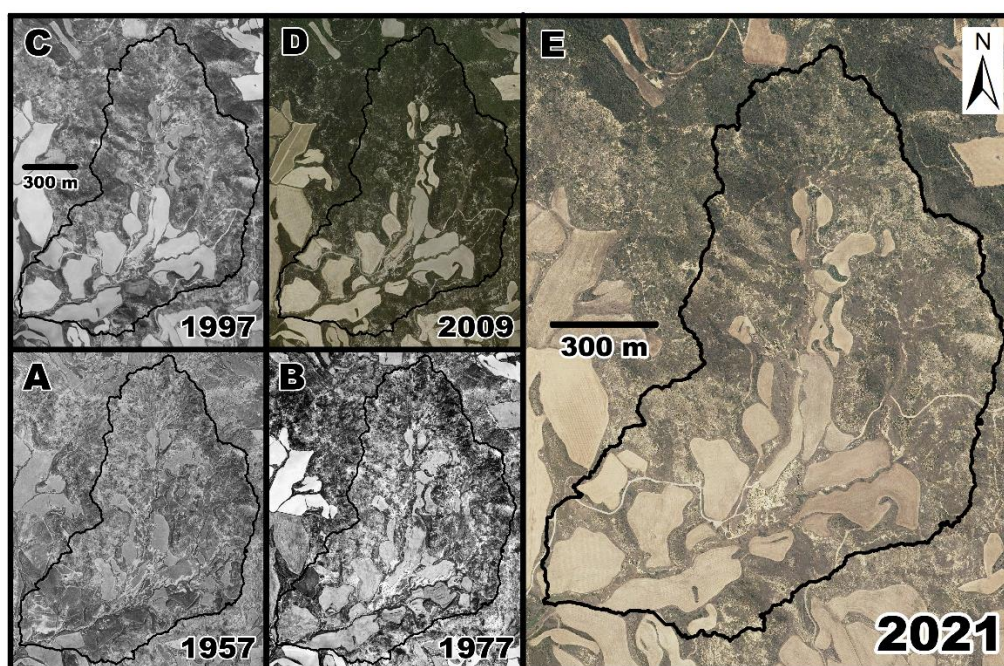


Figura 10. Ortofotografías utilizadas en el estudio planimétrico (obtenidas del CNIG).

Estas ortofotografías han constituido la base para digitalizar las superficies agrícolas de cada año mediante SIG, obteniendo una serie de polígonos (cada uno representando a un campo de cultivo individual) cuyas superficies son medibles y permitiendo obtener la superficie total ocupada por superficies agrícolas en el área de estudio a lo largo de los años (entre 1957 y 2021). Dicha digitalización se ha realizado gracias a las herramientas de edición de ArcMap, siempre usando misma escala de visión (1:2.000) para obtener resultados representativos. Esta primera fase de procesado ha permitido cuantificar la situación y obtener los primeros datos numéricos del estudio, que han sido exportados a hojas de cálculo del programa Excel para su tratamiento, realización de comparaciones y elaboración de diferentes gráficas, constituyendo la base para la discusión de diferentes aspectos de esta parte del estudio.

Contar con una digitalización veraz de las superficies agrícolas también ha permitido observar cambios entre superficies cultivadas de diferentes años. Comparar los polígonos para un año respecto a un periodo diferente permite observar diferentes situaciones: en ocasiones estos polígonos se superponen, indicando que dicha superficie agrícola se ha mantenido activa en ambos periodos, pero también se observan polígonos que se extienden más allá de lo que lo hacían en el otro periodo y viceversa, indicando superficies que han aumentado o disminuido. Las cartografías obtenidas para este proceso se han denominado cartografías de cambio y han permitido observar la evolución detallada de la extensión de los campos de cultivo entre diferentes años (sucesivos o no, en función de la escala de detalle deseada). Así, estas cartografías recogen cuatro tipo de situaciones: (i) superficies de campo abierto (donde no ha habido superficies agrícolas activas en ningún momento de los periodos temporales comparados, en el área de estudio suele corresponder a las cotas más altas), (ii) superficies de cultivo (donde se ha mantenido un aprovechamiento agrícola para ambos periodos), (iii) superficies de aumento (donde los campos han aumentado (agradación) su extensión), y (iv) superficies de reducción (donde los campos han disminuido (degradación) su extensión). La diferenciación de estas superficies de cambio ha permitido focalizar el cálculo de diferentes parámetros del terreno gracias a la aplicación de estadísticas zonales: herramienta de Arcmap que permite calcular diferentes valores de celdas dentro de zonas definidas. En este caso se ha optado por los valores de orientación, altitud y pendiente, permitiendo realizar observaciones concretas acerca de dichos parámetros en las zonas de cambio de mayor interés.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que existen una serie de incertezas y errores en este tipo de análisis. El principal tipo son los errores de georreferenciación, que surgen del propio proceso de georreferenciación y posterior creación del mosaico mediante programa SIG con relativa facilidad. También es importante tener en cuenta la resolución de los datos, especialmente en los casos en los que se emplean fotografías históricas, ya que los medios con los que eran tomadas dichas fotografías no poseen la misma calidad que las técnicas actuales (Llena *et al.*, 2018).

3.2.2. Estudio volumétrico

Su objetivo es cuantificar la magnitud de los procesos de erosión en el área de estudio de manera volumétrica, más allá de los cambios observados en su extensión superficial. Para ello es necesario contar con los Modelos Digitales del Terreno (MDT) de los diferentes periodos temporales, que se han conseguido de diferentes maneras: para los años 2010 y 2020 se han obtenido a partir del procesado de las nubes de puntos LiDAR (*Light Detection and Ranging*) ofrecidas por el proyecto PNOA-LiDAR, disponibles a través del CNIG. Se trata de una tecnología que permite medir la distancia entre el punto de emisión del láser hasta un objeto o superficie emitiendo un pulso de energía que puede volver al sensor como uno o varios retornos, dependiendo de la cantidad de superficies reflectantes que encuentre en su camino. El resultado final es una nube de puntos de alta precisión, los cuales son clasificados en función del tipo de objeto que reflejó el pulso láser gracias a un algoritmo automático por la clasificación definida por la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS). Este algoritmo distingue entre diferentes elementos como el suelo, diferentes tipos de vegetación (baja, media y alta), edificaciones, cuerpos de agua, etc. Sin embargo, se ha observado que dicha clasificación es poco precisa para gran parte del área de estudio, especialmente en aquellas zonas más afectadas por los procesos de erosión. Se estima que la razón de este error reside en la propia morfología del área, ya que el valle central forma desniveles muy pronunciados a la vez que presenta un gran número de estructuras piramidales producto de la acción de los procesos de erosión sobre el sedimento, además de presentar otras estructuras dispersas como colapsos y profundas cárcavas. Debido a esto, muchos de los puntos de las nubes de los años 2010 y 2020 están incorrectamente clasificados, por lo que para el presente trabajo se ha optado por realizar una reclasificación manual con el programa CloudCompare. Esto ha permitido diferenciar correctamente el tipo de punto y tener en cuenta únicamente los retornos correspondientes a suelo para obtener un MDT fiable y sin la influencia de otros elementos del paisaje (principalmente la vegetación).

La tecnología LiDAR es relativamente reciente: las primeras pruebas piloto para su incorporación al proyecto PNOA empezaron en el año 2009 en una primera fase que duró hasta el 2015, después de la cual hubo una segunda fase que empezó ese mismo año y finalizó en 2021. Por esto, la aplicación de dicha tecnología es limitada y tan solo permite obtener los MDTs para los años 2010 (como parte de la primera fase del proyecto) y 2020 (como parte de la segunda), años en los que se realizaron los vuelos sobre el área de estudio. Según sus características técnicas, estos conjuntos de datos van asociados a un error medio de 40 cm y 30 cm respectivamente. Aunque las ortofotografías utilizadas en el estudio planimétrico sean de los años 2009 y 2021, la diferencia temporal es pequeña (menor a un año) y permite establecer una conexión fiable entre ambos.

Dicha tecnología no es aplicable para la obtención de modelos de periodos anteriores al año 2009, por lo que para esos casos se ha optado por aplicar fotogrametría digital automatizada (*Structure from Motion* o SfM), una técnica novedosa que permite obtener nubes de puntos a partir de la identificación espacial de puntos comunes entre diferentes fotografías de una misma zona (normalmente más de tres). En este caso se ha empleado el programa fotogramétrico Agisoft Metashape, que a partir de diferentes fotogramas del área de estudio ha permitido obtener una primera nube de puntos de baja densidad de la que se ha derivado una nube de puntos densa y, finalmente, un ortomosaico a partir del cual generar un MDT. Esta técnica ha sido aplicada para generar el modelo del año 1977 a partir de los fotogramas históricos originales obtenidas del CNIG, obteniendo un MDT con un error de 0,81 m.

En definitiva, estos Modelos Digitales del Terreno representan la complejidad de la superficie topográfica (“falso 3D”) del área de estudio de los diferentes periodos temporales. Esto implica que la comparación (o diferencia) entre modelos de periodos sucesivos permite observar cambios geomórficos entre ellos y, finalmente, cambios volumétricos. La extensión *Geomorphic Change Detection* (GCD) disponible para SIG como ArcMap ha permitido calcular esta diferencia entre MDTs, generando modelos de cambio topográfico (*DEMs of Difference* o DoD): cartografías que muestran las zonas concretas donde se produce una pérdida o ganancia de volumen. En cualquier caso, siempre se debe calcular la diferencia respecto al año más reciente: por ejemplo, la diferencia entre los MDTs de los años 2020 y 2010 permite obtener el DoD que refleja los cambios volumétricos entre dichos periodos (Figura 11). Además, durante este proceso se realiza una propagación de errores (una para cada DoD) a partir de la fórmula del error cuadrático medio para descartar los puntos por debajo de este valor y obtener un resultado más fiable. Estos DoD permiten cuantificar la pérdida de suelo debido a la formación de cárcavas y abarrancamientos.

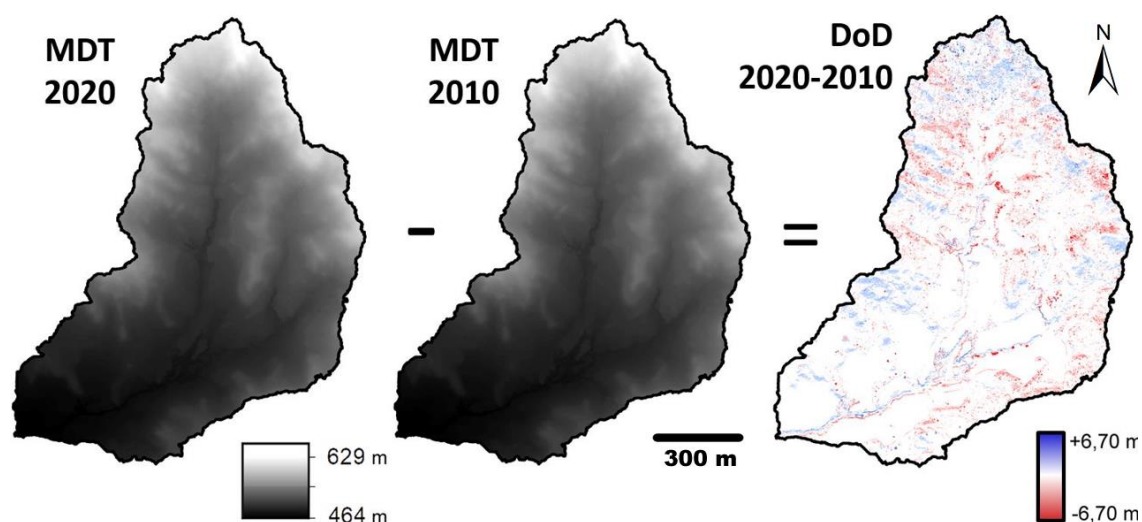


Figura 11. Proceso de creación de un DoD (elaboración propia a partir de los MDTs de los años 2010 y 2020 y el DoD resultante de la diferencia de dichos modelos).

4. Resultados

De igual modo que el apartado anterior, los resultados se presentan en dos bloques respetando el mismo orden en el que se han expuesto anteriormente, empezando con los resultados de la caracterización geológica (diferenciando cada parámetro obtenido en laboratorio por separado) y siguiendo con los resultados del análisis geomorfológico planimétrico y volumétrico.

4.1. Caracterización de materiales

4.1.1. Resultados de laboratorio

| | AG-1 | AG-2 | AG-3 | AG-4 |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|
| % CaCO ₃ | 18,410 | 22,580 | 20,040 | 25,390 |
| pH | 9,590 | 8,810 | 9,890 | 8,520 |
| CE [mS/cm] | 0,552 | 0,722 | 1,004 | 3,652 |

Tabla 6. Resultados de laboratorio de contenido en carbonatos, pH y conductividad eléctrica.

La Tabla 6 recoge los resultados obtenidos de cada parámetro estudiado en el laboratorio del Instituto Pirenaico de Ecología de Zaragoza (carbonatos, pH y conductividad eléctrica) para cada muestra (AG-1, AG-2, AG-3 y AG-4). En primer lugar, se observa que los carbonatos (tanto calcita como dolomita) constituyen una importante fracción de las muestras, cuyo valor varía entre el 18% de AG-1 hasta el 25% de AG-4. Según la clasificación establecida en la Tabla 2, estos valores corresponden a un contenido “alto” en carbonatos para todas las muestras excepto AG-1 (a la que le correspondería un contenido “normal”). En segundo lugar, los valores de pH de todas las muestras están por encima del valor neutro, por lo que se trata de valores alcalinos que, según la clasificación establecida en la Tabla 3, corresponden a valores “fuertemente alcalinos” en el caso de las muestras AG-2 y AG-4 y valores “muy fuertemente alcalinos” para las muestras AG-1 y AG-3. Por último, los valores de conductividad eléctrica no parecen ser muy significativos y, según la clasificación establecida en la Tabla 4, corresponden a valores típicos de suelos “no salinos” a excepción de la muestra AG-4, que corresponde a un suelo “ligeramente salino”.

Por último, en la Tabla 7 se recogen los resultados obtenidos de la granulometría.

| | % Arcilla (< 2 µm) | % Limo (2 – 50 µm) | % Arena (50 – 2.000 µm) | Clase textural |
|------|--------------------|--------------------|-------------------------|-----------------------|
| AG-1 | 20,219 | 42,492 | 37,289 | Franco |
| AG-2 | 32,155 | 56,680 | 11,165 | Franco arcillo limoso |
| AG-3 | 29,993 | 67,845 | 2,162 | Franco arcillo limoso |
| AG-4 | 37,378 | 50,203 | 12,419 | Franco arcillo limoso |

Tabla 7. Resultados de la granulometría con difracción láser.

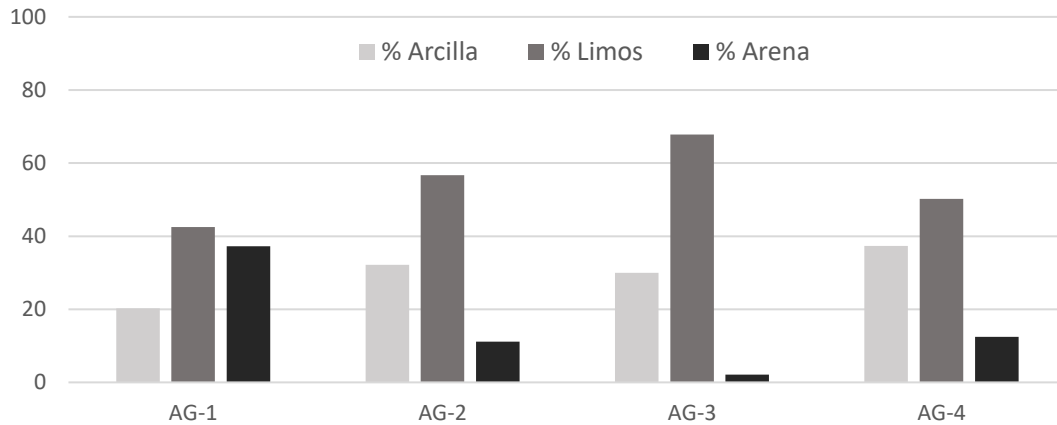


Figura 12. Representación gráfica de los resultados recogidos en la Tabla 7.

Según la Figura 12, la fracción predominante en todas las muestras es el limo (2 – 50 μm), siendo especialmente abundante en las muestras AG-2 y AG-3 constituyendo más de la mitad de la muestra (hasta un 67% en AG-3). La fracción arcillosa (< 2 μm) es relativamente similar en las muestras a excepción de AG-1, donde tan solo representa un 20% del total. Por otro lado, la fracción arenosa (50 – 2.000 μm) es la que mayor variación presenta: constituye hasta un 37% de la muestra AG-4, pero es prácticamente inexistente en la muestra AG-3 (2%).

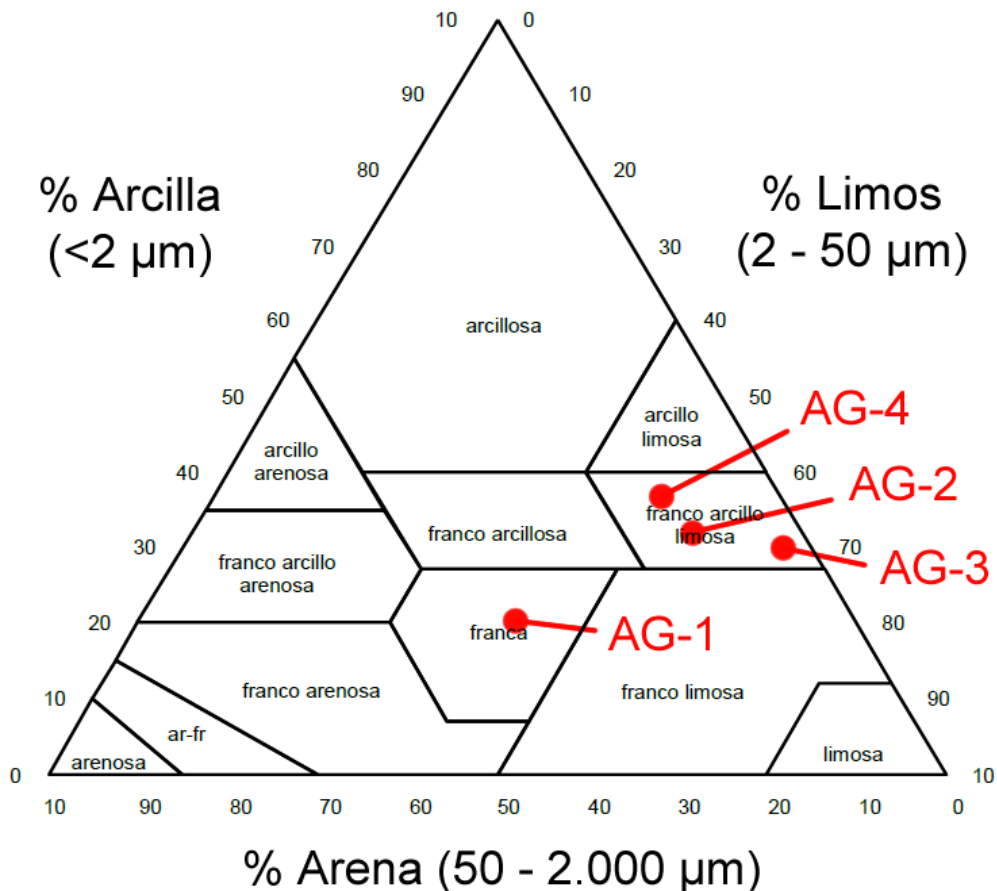


Figura 13. Representación gráfica de los resultados granulométricos obtenidos para las muestras en el diagrama ternario de texturas del suelo, indicando la denominación de cada muestra (modificado de USDA (1999)).

Representando estos valores en el diagrama ternario de clasificación de la USDA (Figura 13) se observa que tres de las cuatro muestras corresponden a un suelo franco arcillo limoso, un tipo de suelo caracterizado por una presencia notable de arcillas y limo en la muestra. La excepción es AG-1, que según la clasificación corresponde a un suelo franco: un tipo de suelo más uniforme y adecuado para la agricultura gracias a la soltura que proporciona la arena, la fertilidad aportada por los limos y la adecuada retención de humedad de las arcillas.

4.2. Análisis geomorfológico

4.2.1. Estudio planimétrico

La Figura 14 refleja el resultado de la superposición de todos los polígonos obtenidos a partir de la digitalización de las superficies agrícolas respecto a la posición del LIG.

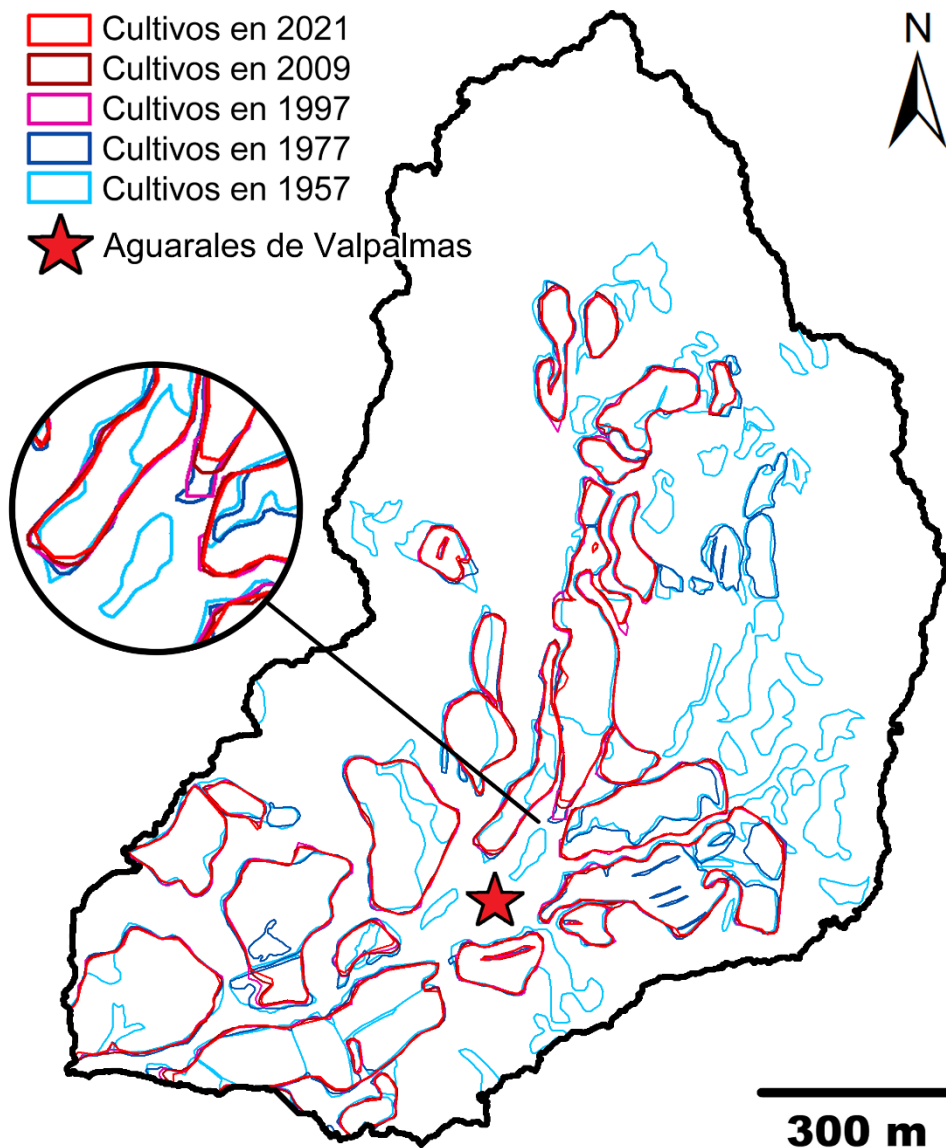


Figura 14. Cartografía que refleja la extensión de las superficies agrícolas para cada año, donde cada polígono representa un campo de cultivo individual (elaboración propia).

La Tabla 8 refleja la superficie total de estos campos de cultivo en cada año:

| Año | 1957 | 1977 | 1997 | 2009 | 2021 |
|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Superficie agrícola [m ²] | 352.018,53 | 303.539,23 | 300.025,77 | 293.688,50 | 282.412,91 |

Tabla 8. Valores numéricos de la extensión total de las superficies agrícolas reflejadas en la Figura 14.

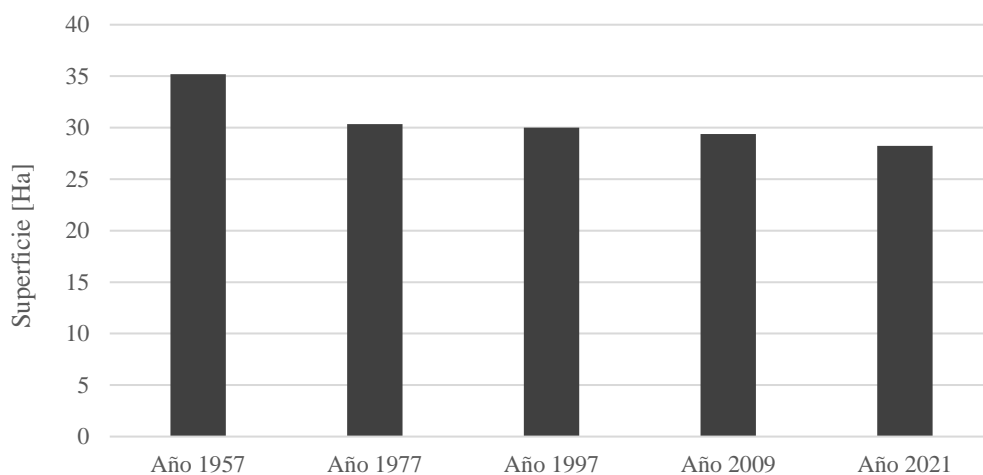


Figura 15. Representación gráfica de los resultados recogidos en la Tabla 8.

Tal y como se observa en la Figura 15, la extensión de las superficies agrícolas en el área de estudio disminuye con el paso del tiempo. Esta pérdida de superficie es especialmente acusada en el paso de 1957 a 1977, en el cual se pierden un total de 48.479,30 m² de campos de cultivo. En el resto de los periodos no es tan elevada, pero en todos los casos el balance es negativo: se pierden 3.513,33 m² en el paso de 1977 a 1997; 6.337,27 m² en el paso de 1997 a 2009 y, por último, 11.275,59 m² en el paso de 2009 a 2021. Finalmente, si comparamos la situación de las superficies agrícolas entre los periodos temporales extremos (1957 y 2021) se obtiene una pérdida total de 69.605,62 m² de superficie agrícola (o 6,96 hectáreas). Teniendo en cuenta que la situación inicial en 1957 era de 352.018,53 m², esto represento una pérdida del 19,77% de la superficie inicial.

Estos campos de cultivo son considerados como bienes inmuebles rústicos y, teniendo en cuenta que el cultivo principal es cereal de secano, corresponden a Tierras Arables de Secano (TAS). Los módulos de valor de cultivos representativos (o valor medio de los productos inmobiliarios representativos por zonas del territorio) se pueden consultar en la Sede Electrónica del Catastro. En el caso del municipio de Valpalmas el precio por hectárea de superficie agrícola dedicada a TAS es 2.500 €/ha. Con esto, se puede estimar que una pérdida de 6,96 hectáreas equivale a una pérdida económica de 17.400 € en términos de bienes inmuebles.

A continuación, la Figura 16 recoge las cartografías de cambio entre los diferentes periodos temporales sucesivos (las figuras únicamente reflejan las superficies que se han reducido o agrandado para facilitar la interpretación). Coincidiendo con las observaciones realizadas en los

párrafos anteriores, se observa un cambio mucho mayor en la cartografía del primer periodo (comparación entre las superficies agrícolas de 1957 y 1977), en la que se calcula un cambio superficial total de 133.262 m² entre las superficies agradadas y degradadas, según la Tabla 9. El siguiente periodo (comparación entre 1977 y 1997) muestra un cambio total menor (53.160 m²), pero mayor que los siguientes periodos (que en conjunto suman 34.609 m², para realizar una comparación más equitativa entre periodos de más o menos 20 años (de 1997 a 2021)).

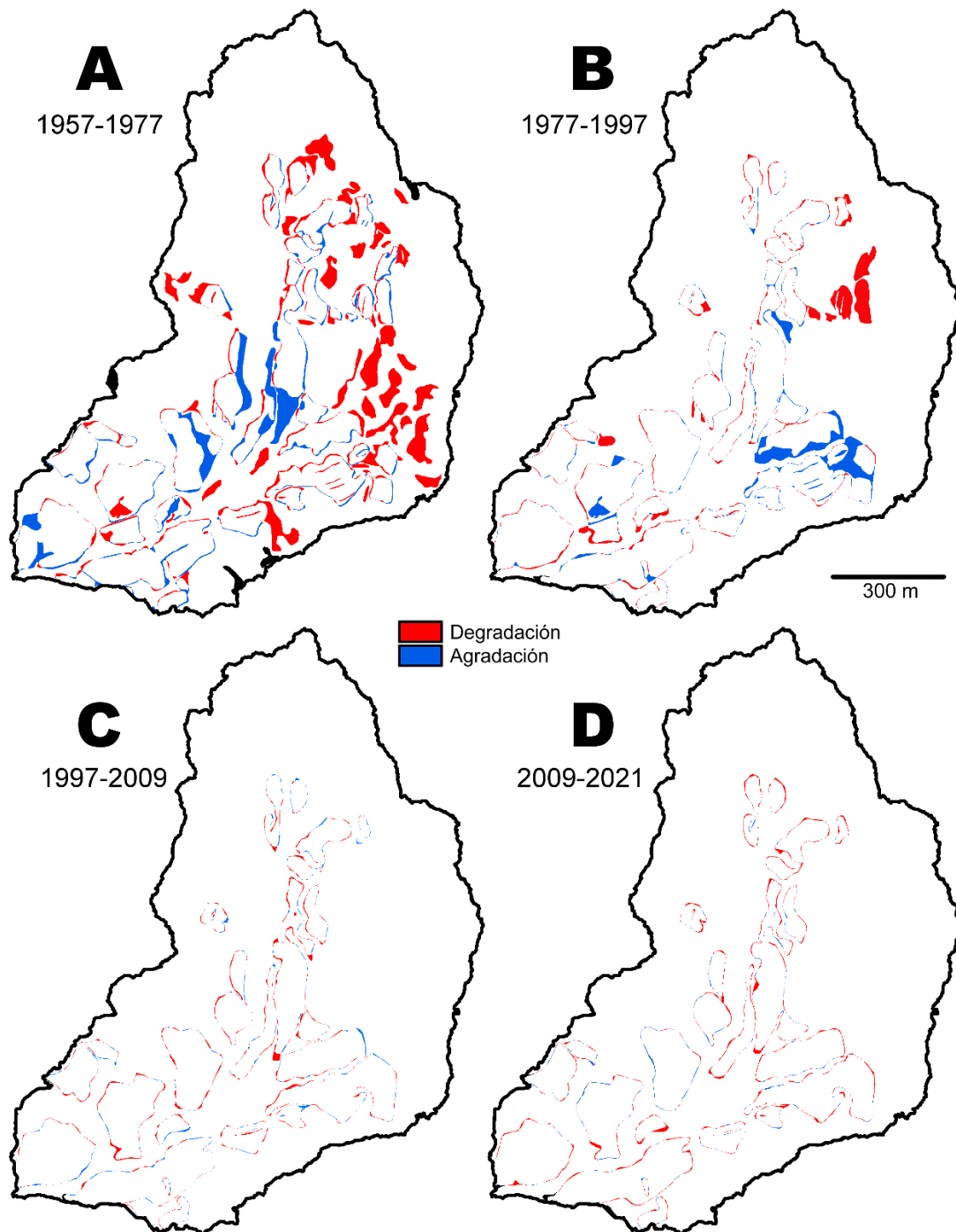


Figura 16. Cartografías de cambio de las superficies agrícolas entre años sucesivos, reflejando cambios negativos (degradación, rojo) y positivos (agradación, azul) (elaboración propia).

| | Degradación (m ²) | Agradación (m ²) | Cambio total (m ²) | Cambio neto (m ²) |
|-------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 1957 – 1977 | 90.936 | 42.326 | 133.262 | -48.610 |
| 1977 – 1997 | 28.195 | 24.965 | 53.160 | -3.230 |
| 1997 – 2009 | 11.676 | 5.318 | 16.994 | -6.358 |
| 2009 – 2021 | 14.444 | 3.171 | 17.615 | -11.273 |
| 1957 – 2021 | 114.986 | 45.515 | 160.501 | -69.471 |

Tabla 9. Datos cuantitativos de la extensión de la disminución y expansión de las superficies agrícolas.

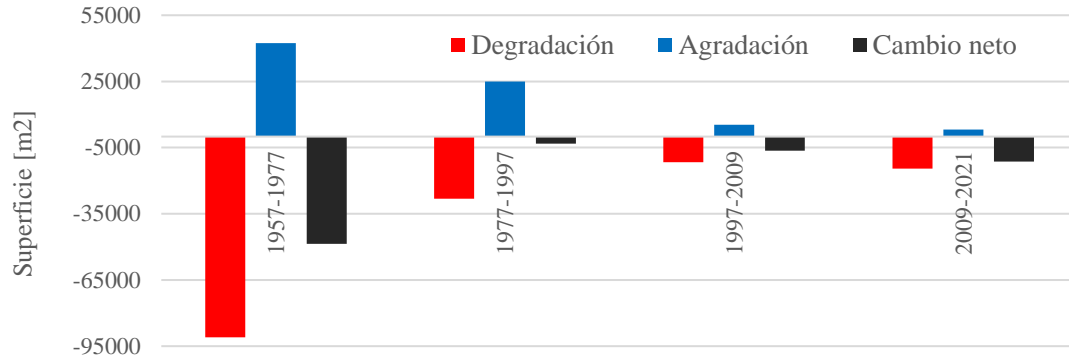


Figura 17. Representación gráfica de los resultados recogidos en la Tabla 9.

Estos resultados se han plasmado de manera gráfica en la Figura 17 y también se ha elaborado una cartografía de cambio entre los años extremos con el objetivo de observar los cambios totales que se han producido en 64 años de evolución (Figura 18).

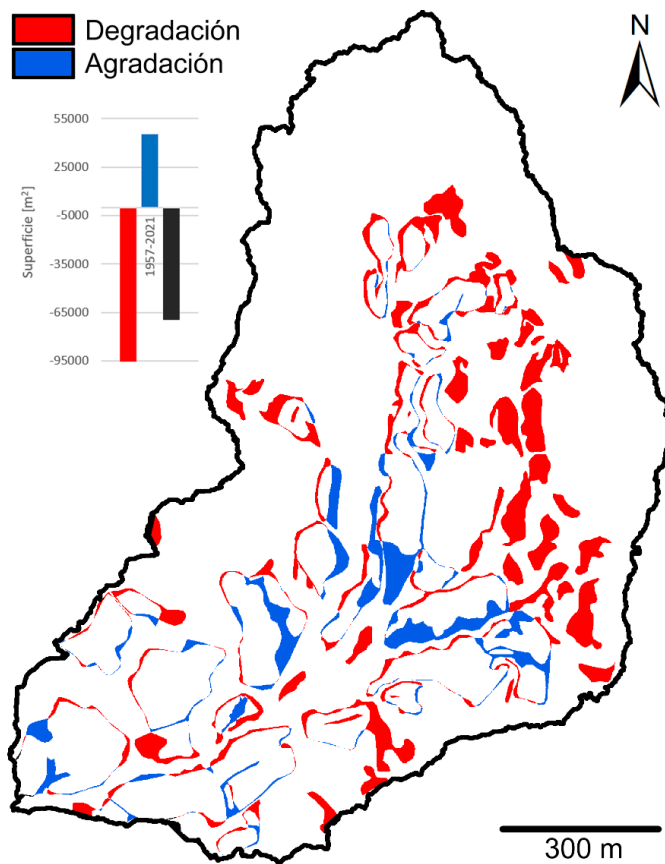


Figura 18. Cartografía de cambio entre 1957 y 2021 y gráfica asociada (elaboración propia).

La obtención de estas superficies de cambio ha sido fundamental para obtener las estadísticas zonales de orientación, altitud y pendiente. La Tabla 10 refleja los valores medios para cada una de las diferentes zonas diferenciadas en las cartografías de cambio: (i) superficies que nunca han sido explotadas como campos de cultivo (“nunca campo”), (ii) superficies de campos de cultivo que se han reducido (“reducción”), (iii) superficies se han mantenido como campos de cultivo activos durante todo el periodo temporal (“siempre campo”) y (iv) superficies de campos de cultivo que han aumentado (“agradación”).

| Periodo | Clase | Orientación media (°) | Altitud media (m) | Pendiente media (°) |
|-------------|---------------|-----------------------|-------------------|---------------------|
| 1957 – 1977 | Nunca campo | 190,52 | 528,26 | 17,92 |
| | Reducción | 216,38 | 510,53 | 11,05 |
| | Siempre campo | 222,71 | 492,68 | 5,09 |
| | Agradación | 199,42 | 493,55 | 6,03 |
| 1977 – 1997 | Nunca campo | 192,05 | 527,45 | 17,54 |
| | Reducción | 191,40 | 506,65 | 9,77 |
| | Siempre campo | 222,32 | 491,38 | 4,76 |
| | Agradación | 228,59 | 493,41 | 6,73 |
| 1997 – 2009 | Nunca campo | 191,97 | 527,01 | 17,35 |
| | Reducción | 194,71 | 495,17 | 9,41 |
| | Siempre campo | 223,99 | 491,40 | 4,69 |
| | Agradación | 204,17 | 495,43 | 10,72 |
| 2009 – 2021 | Nunca campo | 192,03 | 526,73 | 17,30 |
| | Reducción | 207,43 | 494,95 | 8,78 |
| | Siempre campo | 224,46 | 491,30 | 4,56 |
| | Agradación | 182,38 | 493,88 | 8,48 |

Tabla 10. Estadísticas zonales calculadas para las superficies de cambio entre periodos sucesivos.

Con estos valores se han elaborado una serie de gráficas con el fin de facilitar su interpretación. En la Figura 19 se han representado los valores de orientación media mediante diagramas circulares (uno para cada periodo) en los que los valores de cada clase se han representado en un color diferente: amarillo para la orientación de las superficies que nunca han sido campos de cultivo, rojo para la orientación de las superficies que se han reducido, verde para la orientación de las superficies que siempre se han mantenido como campos activos y azul para la orientación de las superficies que se han agradado.

A continuación, la Figura 20 y la Figura 21 representan la variación de la altitud de las zonas de reducción y agradación respectivamente. También se han incluido los valores de altitud máximos (símbolo triangular) y mínimos (símbolo de guion) (incluidos en el Anexo x) para tener una mejor idea de cómo este valor ha ido variando en el tiempo según el tipo de superficie.

Por último, la Figura 22 representa gráficamente el valor de pendiente media de las zonas de reducción y agradación para cada periodo.

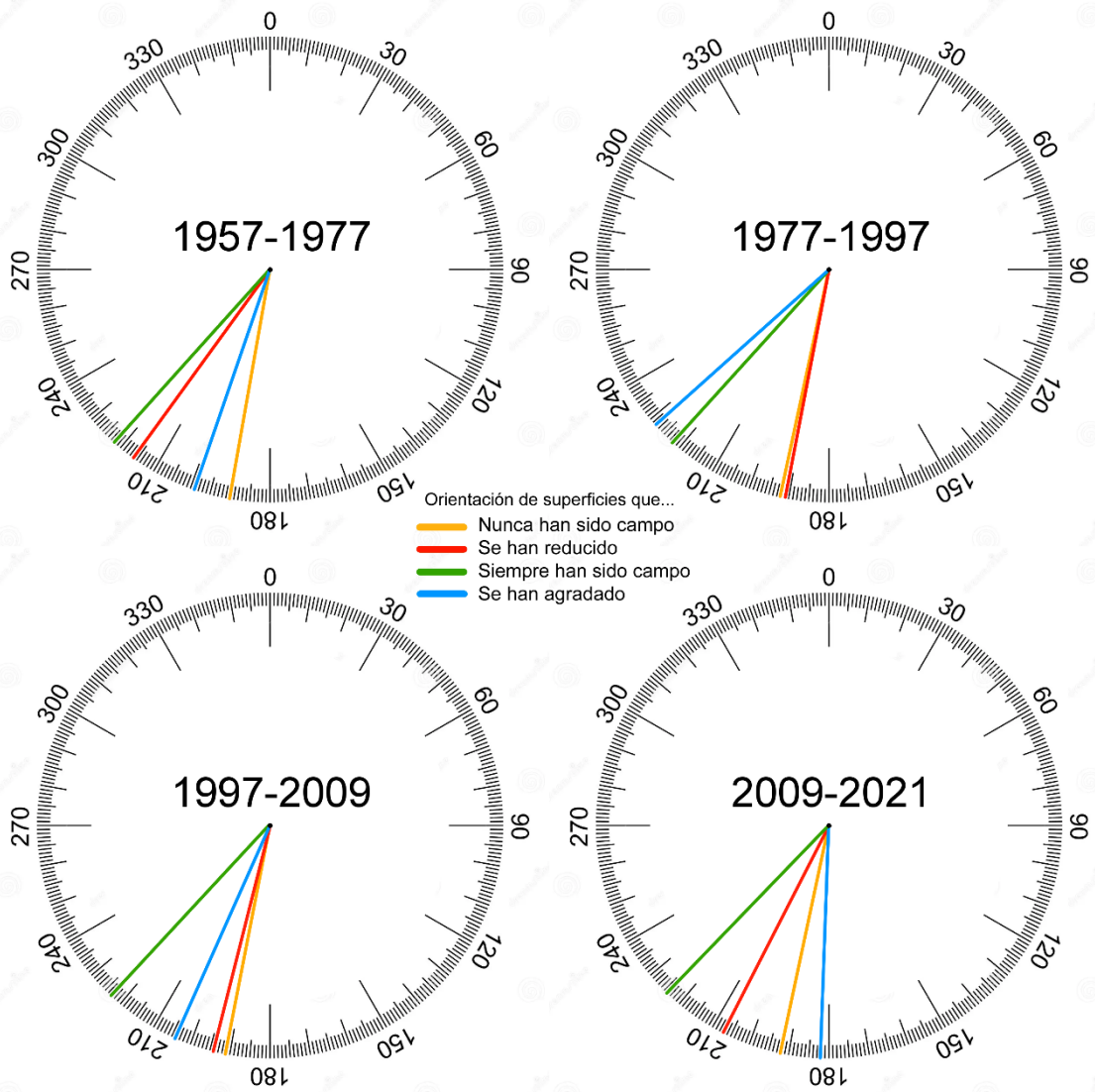


Figura 19. Representación gráfica de los valores de orientación media de las superficies de cambio.

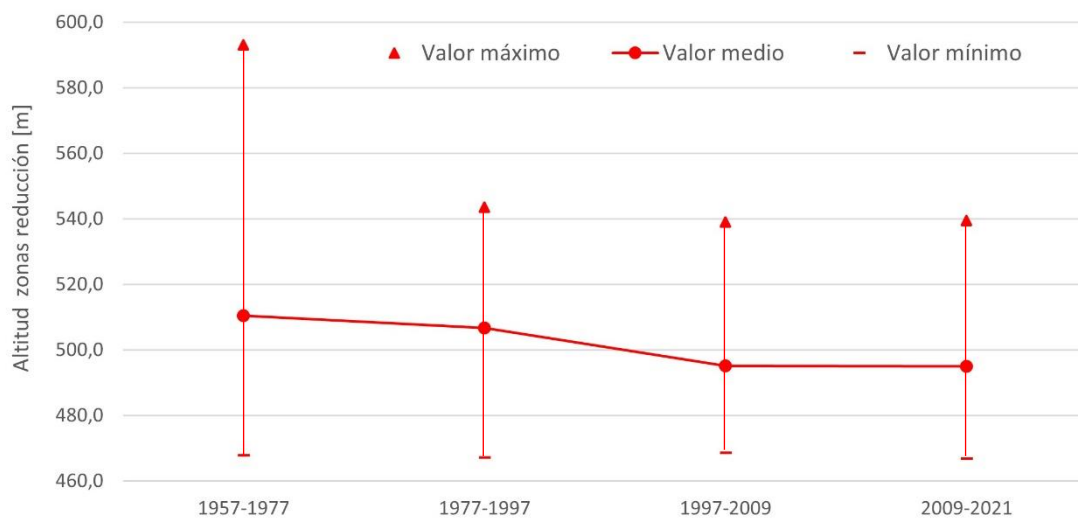


Figura 20. Representación gráfica de la variación de altitud en las zonas de cambio negativas (reducción) obtenidas para cada periodo, donde el triángulo representa el valor máximo, el punto el valor medio y el guion el valor mínimo.

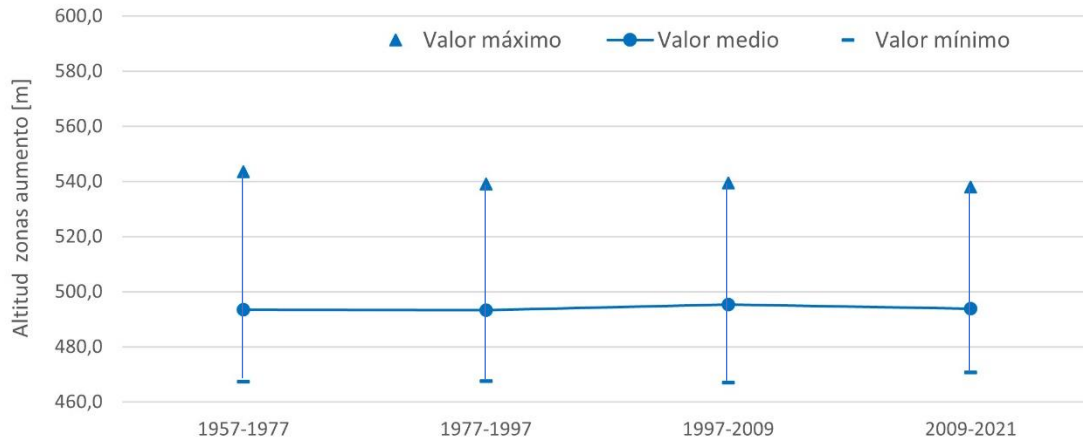


Figura 21. Representación gráfica de la variación de altitud en las zonas de cambio positivas (agradación) obtenidas para cada periodo, donde el triángulo representa el valor máximo, el punto el valor medio y el guion el valor mínimo.

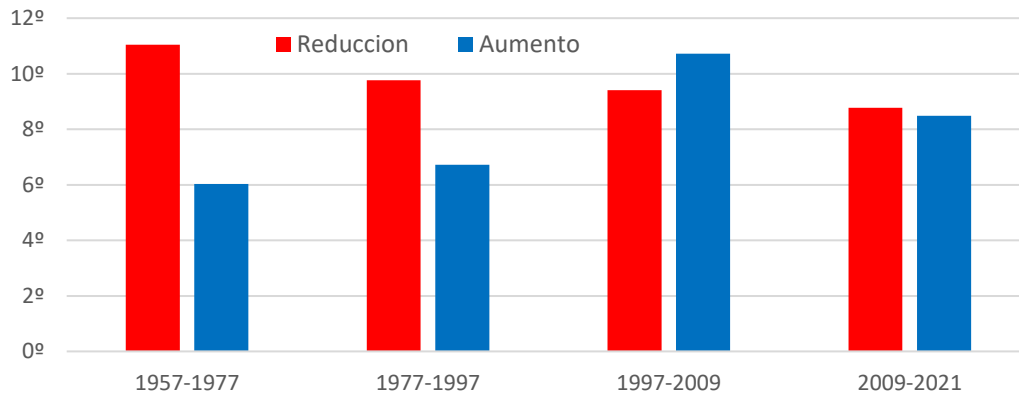


Figura 22. Representación gráfica de la pendiente media en las zonas de cambio.

4.2.2. Estudio volumétrico

La elaboración de las diferencias de modelos de elevación del terreno o DoD constituye una parte fundamental del presente trabajo y abarca uno de sus principales objetivos: el estudio de superficies agrícolas a partir de la reconstrucción del paisaje histórico con fotogrametría digital automatizada. Con esto se ha elaborado la Figura 23, donde se observa el DoD obtenido de la diferencia de los MDTs de los años 1977 y 2010 (DoD 1977-2010) en los que los cambios de volumen son representados en seis clases (tres para valores positivos (sedimentación, en naranja y rojo) y tres para valores negativos (erosión, en celeste y añil)). Esto permite diferenciar entre cambios leves (de cero a un metro), notables (de tres a ocho metros) y graves (más de ocho metros). También se ha indicado en el DoD la posición de los Aguerales (con una estrella) junto a una ampliación de la cartografía en dicha zona con el fin de observar en mayor detalle los cambios volumétricos que han experimentado, así como parte de las ortofotografías del área de estudio para un mejor contexto gráfico. De la misma manera se ha elaborado la Figura 24, donde se observa el DoD resultado de la diferencia de los modelos de elevación de los años 2010 y 2010.

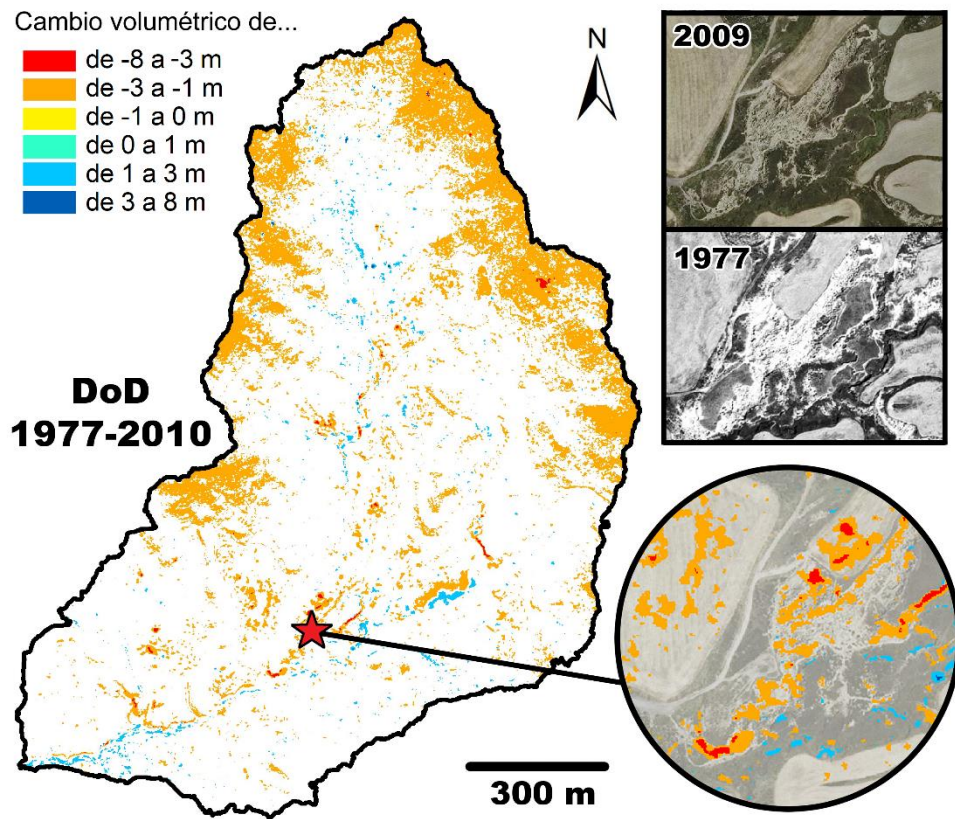


Figura 23. DoD entre los años 1977 y 2010 con ampliación de la cartografía en los Aguarales (elaboración propia).

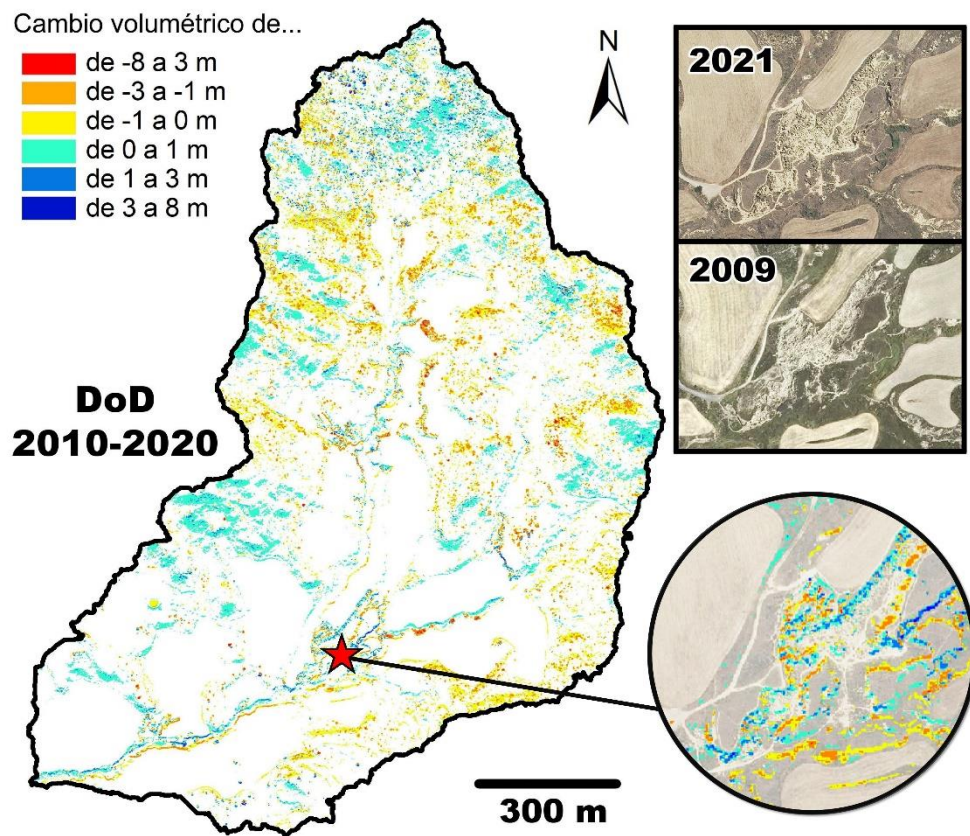


Figura 24. DoD entre los años 2010 y 2020 con ampliación de la cartografía en los Aguarales (elaboración propia).

| | DoD 1977 – 2009 | DoD 2009 – 2021 |
|----------------------------------------------|-----------------|-----------------|
| Volumen reducido (m ³) | 2.283,60 | 650,05 |
| Volumen agradado (m ³) | 141,27 | 182,96 |
| Cambio total (m ³) | 2.424,87 | 833,01 |
| Diferencia de volumen neta (m ³) | -2.142,33 | -467,09 |

Tabla 11. Valores numéricos obtenidos a partir de los DoD en superficies de campo negativas (reducción).

El primer DoD (Figura 23) representa un intervalo temporal de 33 años (desde 1977 hasta 2010), mientras que el segundo (Figura 24) tan solo abarca 10 años (desde 2010 hasta 2020), por lo que se deberá de tener en cuenta la diferencia de perspectiva temporal entre ambas cartografías. En total, representan un intervalo temporal de 44 años en los que se ha podido cuantificar los cambios volumétricos en el área de estudio. Ambos DoD se han elaborado a escala de cuenca, pero dado a que el presente trabajo se centra en la degradación de las superficies agrícolas se ha optado por limitar esta cuantificación a las zonas donde se ha observado una reducción de dichas superficies en las cartografías de cambio (las realizadas para los periodos que coinciden con los de cada DoD) (Tabla 11). Así, las superficies de reducción obtenidas en la cartografía de cambio entre los años 1977 y 2009 se ha aplicado al DoD de 1977-2010 para realizar la segregación, del mismo modo que se ha realizado para el DoD de 2010-2020 con la cartografía de cambio entre los años 2009 y 2021. En este último caso cabe destacar que, aunque los periodos temporales no coincidan con exactitud (ortofotografía de 2009 con nube de puntos de 2010 y ortofotografía de 2021 con nube de puntos de 2020), existe una gran cercanía temporal entre ellos que los hace comparables.

Teniendo en cuenta ambos DoD y los datos numéricos de la Tabla 11, para el periodo entre 1977 y 2020 se estima un total de 2.933,65 m³ de suelo erosionado y un total de 324,23 m³ de sedimentación. El cálculo neto resulta en la pérdida de -2.609,42 m³ de suelo agrícola a lo largo de 44 años de evolución (1977-2020) del área de estudio.

5. Discusión

Una de las cuestiones que mayor interés ha suscitado en el creciente número de publicaciones dedicadas al estudio de los badlands y los procesos de erosión en general en las últimas décadas es la cuantificación de la pérdida de suelo, especialmente de suelo fértil y suelo agrícola. El presente trabajo analiza el caso de los Aguarales de Valpalmas, uno de los numerosos ejemplos que se pueden encontrar a lo largo de la Depresión del Ebro, empezando por el estudio de su dinámica geomorfológica. La extensa labor de revisión bibliográfica realizada a la vez que la existencia de trabajos previos en el área de estudio ha permitido la definición en detalle de los Aguarales permitiendo identificar su contexto desde diferentes perspectivas. Probablemente la más importante y la que guarda una mayor relación con los procesos de erosión es el contexto geológico de los Aguarales: situado sobre un basamento terciario constituido principalmente por sedimento fácilmente erosionable junto a la presencia de arcillas expansivas, ciertas características fisicoquímicas del suelo (como los elevados niveles de dispersión y sodio intercambiable) y factores locales favorables (como la pendiente o el gradiente hidráulico) hacen del área de estudio un lugar propicio para el desarrollo y la expansión de los procesos de erosión como el piping, ampliamente extendido en la actualidad.

La caracterización geológica realizada en el presente trabajo ha permitido observar estos hechos, destacando la importancia del trabajo de campo a la hora de confirmar las numerosas cuestiones que han ido surgiendo gabinete y la recogida de muestras de sedimento para su posterior análisis en laboratorio, que incluso ha permitido descubrir nuevos temas de interés que tratar o de los que constituir posibles puntos de partida para estudios futuros. Los resultados obtenidos para los diferentes parámetros químicos de las muestras de sedimento coinciden con los expuestos en otros trabajos del mismo área de estudio como Ferrer (2016), mostrando un notable contenido en carbonatos, elevados niveles de pH y bajos valores de conductividad eléctrica. Es probable que gran parte de estos carbonatos provengan de los sedimentos carbonatados de origen lacustre-palustre de la Unidad Galocha-Ontiñena, que muestra facies carbonatadas y pelíticas en la zona de contacto con la unidad suprayacente, la Unidad Bujaraloz-Sariñena, ambas presentes en el área de estudio según los mapas geológicos disponibles. El contenido en carbonato va en concordancia con los elevados niveles de pH, ya que los suelos alcalinos se caracterizan por presentar elevados niveles de carbonatos de calcio, magnesio y sodio. Por otro lado, los bajos niveles de conductividad eléctrica indican la relativa escasez de sales solubles en los sedimentos analizados, lo que permite suponer que los procesos de lavado en el área de estudio son intensos y arrastran estas sales a otras zonas de la cuenca. Además, la estimación de la textura o granulometría de las muestras de suelo ha permitido conocer que la mayoría corresponden a suelos franco arcillo limosos, un tipo de suelo que presenta una mayor proporción de partículas finas de tamaño arcilla y limo, a excepción de una de las muestras que ha sido clasificada como suelo franco.

Se podría decir que el análisis geomorfológico ha constituido la mayor parte del presente trabajo, donde una gran parte del tiempo ha sido destinado al desarrollo del estudio planimétrico y el estudio volumétrico. La digitalización de las superficies agrícolas para cada uno de los periodos temporales contemplados ha sido una de las tareas más importantes y base para muchos de los procedimientos posteriores. Como se ha comentado anteriormente, destaca la marcada reducción de las superficies agrícolas entre el año 1957 y 1977: esta época coincide con los años de máximo apogeo del abandono agrícola en las llanuras y montañas del campo español (Lasanta *et al.*, 2021), por lo que se estima que esta mayor pérdida no este únicamente relacionada con los efectos de los procesos de erosión sobre los campos de cultivo, sino también a los problemas encontrados por los agricultores de la zona a la hora de sacar partido a sus cultivos. Algunos de los campos que dejan de ser productivos después de 1957 se encuentran a una mayor altitud, a una mayor distancia de las principales (ya de por sí pocas) vías de comunicación en el área o poseen valores de pendiente elevados, haciéndolos poco adecuados para la implantación de las técnicas agrícolas mecanizadas que empezaron a desarrollarse durante la segunda mitad del S.XX y que son ampliamente utilizadas en la actualidad. Estos hechos pueden observarse en las estadísticas zonales, donde los valores de altitud y pendiente calculados para las zonas de reducción indican superficies perdidas a mayores altitudes y con mayor pendiente entre 1957 y 1997. Esto pudo provocar que muchos de estos campos peor accesibles fueran poco productivos y no rentables a largo plazo, propiciando su abandono en busca de terrenos que ofrezcan mejores oportunidades. Sin embargo, otros muchos campos de cultivo se han mantenido activos en el área de estudio (aunque hayan cambiado su forma o extensión a lo largo de los años), especialmente aquellos situados en la parte central de la cuenca, próximos al LIG. Se trata de la zona donde los procesos de erosión alcanzan su mayor magnitud, pero al mismo tiempo también es la zona que ofrece mejores condiciones para el laboreo agrícola al tratarse de superficies más o menos llanas próximas a vías de comunicación. Las estadísticas zonales muestran que las zonas de aumento elegidas a lo largo de los años se han mantenido en valores de altitud más o menos estables y con orientaciones similares, siempre hacia el suroeste (Figura 19), coincidiendo con el valor de orientación media obtenido para el resto de superficies consideradas (debido a la propia morfología de la cuenca). Sin embargo, muchos de estos nuevos campos ya están siendo afectados negativamente por los procesos de erosión, observándose el desarrollo de cárcavas y colapsos en los que están situados en las proximidades del valle central (lo que aumenta la pendiente observada en estas superficies según la Figura 22), aunque son evidentes los esfuerzos de la población local por intentar mantener estas superficies agrícolas durante el mayor tiempo posible. Las cavidades generadas por los colapsos son rellenadas con sedimento, y, en ocasiones, la morfología del campo es adaptada para rodear estas zonas problemáticas a la vez que se continua la actividad agrícola. Aunque se trate de una solución temporal que puede funcionar en algunos casos, es de esperar que la expansión de los procesos de erosión alcance magnitudes que no sean

posibles de compensar a largo plazo y los agricultores se vean obligados a abandonar estos campos o, al menos, reducir su extensión (como ya ha ocurrido en algunos casos). Partiendo de la base de que la magnitud de las actividades agrícolas en el área de estudio y sus alrededores no es de importancia significativa, es de esperar que la que se mantiene hoy en día acabe trasladándose a otras zonas de la Depresión del Ebro en las que se desarrollan grandes y productivas explotaciones o que, simplemente, vaya perdiendo entidad hasta convertirse en un uso residual del territorio.

Este proceso plantea nuevas cuestiones: ¿cuáles pueden ser los efectos hidrológicos y geomorfológicos del abandono de las tierras de cultivo? En general, se acepta que el abandono favorece una reducción de la erosión y de la escorrentía, pero no siempre es así, ya que también depende de las condiciones climáticas y del tipo de gestión a la que se sometan estas superficies después del abandono ([García-Ruiz y López-Bermúdez, 2009](#)). Estudios realizados en parcelas donde la pendiente es la principal causa de abandono como [Ruiz-Flaño \(1993\)](#) o [Molina \(2002\)](#) muestran una espectacular recuperación de la vegetación sobre los antiguos campos de cultivo y la expansión de espacios forestales, comprobando que durante las primeras décadas después del abandono se produce una colonización del espacio por especies herbáceas y matorrales, aunque en todo caso la velocidad de recuperación depende de la presión ganadera. Por otro lado, estudios dedicados al comportamiento de los procesos geomórficos tras el abandono de los campos como [Ruiz-Flaño \(1993\)](#) demuestran que los campos más antiguos son los que presentan deterioros más graves, exponiendo dos posibles interpretaciones: (i) tras el abandono los procesos de erosión son cada vez más activos, movilizandando más cantidad de suelo y aumentando la pedregosidad, aunque esta hipótesis contrasta con las observaciones de campo. Los resultados obtenidos de diferentes Estaciones Experimentales (como la de “Valle de Aísa”) muestran que lo habitual es que la colonización vegetal sea progresivamente más densa y frene la generación de escorrentía y la erosión. (ii) Otra posibilidad es que los campos abandonados hace más de 70 años correspondan a suelos de peor calidad, ya que los primeros en abandonarse fueron los que presentaban peores condiciones (más elevados, con mayores pendientes, con peores estructuras de conservación de suelo, etc.). Aunque esta hipótesis se acerque más a la realidad observada en las Estaciones Experimentales, no explica el elevado grado de deterioro y pedregosidad que persisten en algunas áreas. En definitiva, se trata de un problema complejo que autores como [Ruiz-Flaño et al. \(1992\)](#) asocian a la interacción entre la colonización vegetal y la gestión humana tras el abandono, especialmente aquella relativa al pastoreo y uso de los campos abandonados por el ganado.

Teniendo en cuenta esto, la acusada pérdida de superficies agrícolas entre los años 1957 y 1977 no se puede asociar únicamente a los procesos de erosión, se debe realizar una exclusión de los campos de cultivo que durante ese periodo fueron abandonados debido a las propias características del campo que hacía de su explotación una opción poco viable (problemas de

accesibilidad, pendientes pronunciadas, proximidad a núcleos de población, etc.). Para ello se ha elaborado una nueva cartografía (Figura 25) en la que se han señalado los campos cuya principal causa de abandono no tiene relación con los procesos de erosión. Considerando que la estimación inicial planteaba una pérdida del 19,77% de superficies agrícolas durante el periodo entre 1957 y 2021, la exclusión de estos campos que en total suman un total de 34.438 m² suponen una disminución de la estimación inicial casi a la mitad (10%).

Por otro lado, cabe destacar que la continuación de la actividad agrícola actual también puede favorecer el desarrollo de los procesos de erosión, ya que el propio ciclo vital de los cereales de secano (como el trigo, que se cultiva en la mayoría de los campos del área de estudio) hace que el suelo se mantenga expuesto durante largos periodos de tiempo, siendo más vulnerable a los efectos meteorológicos y a los procesos de erosión (Lasanta *et al.*, 2021).

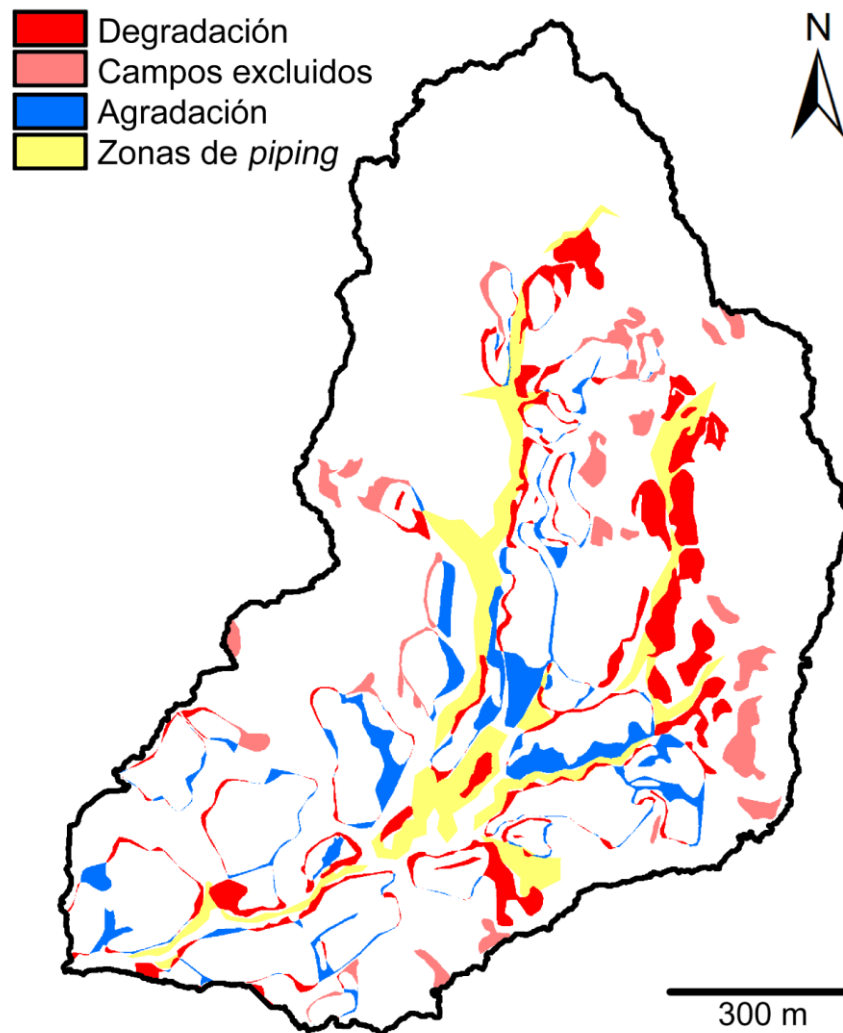


Figura 25. Cartografía de cambio entre los años 1957 y 2021, reflejando negativos (degradación, en rojo), positivos (agradación, en azul). En este caso se han diferenciado los campos de cultivos cuyo motivo principal de abandono no reside en la acción de los procesos de erosión (en rosa) y su situación respecto a las principales zonas del área de estudio donde se desarrolla el piping en la actualidad (en amarillo) (elaboración propia).

Respecto al estudio volumétrico, los resultados obtenidos a partir de la diferencia de MDTs permiten observar que gran parte de la pérdida de suelo se concentra en la zona central del área de estudio, próximos a los Aguarales, donde es más lógico que los procesos de erosión muestren una mayor magnitud. Sin embargo, también se ha observado que las zonas afectadas por el piping se han ido expandiendo por el área de estudio desde su centro, ramificándose en diferentes direcciones tal y como puede observarse en la Figura 25, especialmente hacia el norte y oeste.

En el presente trabajo se han realizado dos DoD: uno entre los MDT de los años 1977 y 2010 y otro entre los MDT de los años 2010 y 2020, por lo que en conjunto permite observar los cambios volumétricos a lo largo de 43 años en el área de estudio. El primero de ellos posee una mayor amplitud temporal (33 años), por lo que en este se puede observar una mayor densidad de cambios volumétricos. Estos se concentran en los montes de la parte norte de la cuenca, pero este hecho posee una razón metodológica: el modelo empleado para el año 1977 obtenido por fotogrametría se trata de un modelo digital de superficies, que incluye la vegetación, mientras que el modelo empleado para el año 2010 es un modelo digital del terreno, que es capaz de diferenciar la vegetación y no tenerla en cuenta. Por esto, la diferencia calculada en un punto para el que uno de los modelos no interpreta la vegetación respecto a otro que sí lo hace da lugar a dicha concentración de puntos considerados como cambio volumétrico negativo. Este problema es solventado centrando los cálculos en las zonas de reducción de las superficies agrícolas obtenidas en las cartografías correspondientes al periodo de cada DoD, ya que los cambios volumétricos que se produzcan en los montes que rodean la cuenca carecen de importancia para el objeto del presente estudio (dado a que allí no hay evidencias de procesos de erosión). Por otro lado, los cambios volumétricos observados en el segundo DoD son menos significativas, pero se solapan con las observadas en el primero, permitiendo confirmar una evolución continua de los procesos de erosión en el área de estudio. En este último los cambios se concentran en las lindes de los campos de cultivo que aún permanecen activos y en las zonas por las que el piping se ha expandido.

En todo caso, el estudio volumétrico se centra en las pérdidas de la zona central del valle, más concretamente en las superficies de cambio negativas obtenidas en las cartografías de cambio del estudio planimétrico, por lo que se ha optado por realizar una segmentación de los datos. Con esto se ha obtenido que la pérdida de suelo neta para el periodo entre 1977 y 2010 que asciende a $2.143,33 \text{ m}^3$, que sumado a los $467,09 \text{ m}^3$ que se pierden durante el periodo entre 2010 y 2020 hace un total de $2.610,42 \text{ m}^3$ de suelo perdido entre 1977 y 2020 tan solo en las zonas donde se ha producido una pérdida de superficie agrícola. Con estos resultados se puede obtener una tasa de pérdida de suelo anual aproximada para cada periodo: $66 \text{ m}^3/\text{año}$ para 1977-2010 y $38 \text{ m}^3/\text{año}$ para 2010-2020, observándose una disminución de la tasa de erosión en la actualidad, lo que podría indicar una aminoración del ritmo de los procesos de erosión. Para poder comparar la pérdida volumétrica de otros periodos sería necesario la obtención de MDTs de años anteriores a

1977: esto permitiría calcular la diferencia entre modelos de periodos pasados y tener una perspectiva temporal más amplia de los procesos de erosión en el área de estudio. Para ello sería necesario obtener los fotogramas del área de estudio de dichos años y aplicar la metodología explicada de fotogrametría. Teniendo en cuenta que también se dispone de otras muestras de campo de interés como los fragmentos de carbón (posibles indicadores de antiguos incendios en la zona) y restos óseos cuya datación puede arrojar resultados interesantes en lo respectivo a la evolución de la agricultura y ganadería de la zona, sería necesario la realización de trabajos futuros que a través del estudio de estos aspectos planteados pero no contemplados en el presente trabajo pudiesen dar mayor profundidad a los resultados obtenidos con una mayor perspectiva temporal de los procesos de erosión y la historia de los usos del territorio a lo largo de los años.

No cabe duda de que los procesos de erosión han tenido un impacto significativo en los Aguales de Valpalmas a través de la transformación el paisaje. La expansión del piping por el área de estudio ha provocado cambios tanto a nivel planimétrico como volumétrico, afectando directamente a las actividades humanas que se llevan a cabo en la zona y, en mayor o menor medida, a los residentes del municipio de Valpalmas. Mientras que estos procesos de erosión se han observado activos a lo largo de todo el periodo temporal considerado (1957-2021), cabe destacar que la interpretación de su evolución futura varía respecto el punto de vista planimétrico o volumétrico: la pérdida de extensión de superficies agrícolas parece aumentar ligeramente en las últimas décadas, mientras que la tasa de pérdida de suelo anual es menor en la actualidad que en periodos anteriores. Es probable que esta disminución de las superficies cultivadas se acentúe a medida que el piping se expanda por el área de estudio y los conductos subsuperficiales colapsen creando cavidades en superficie, obligando a los agricultores a adaptar sus cultivos a estos nuevos elementos del terreno, lo que supone en la mayoría de los casos a reducir el tamaño de los cultivos. Por otro lado, la progresión de los procesos de erosión a un nivel volumétrico no está tan claro y dependerá en gran medida del tiempo que estas superficies de cultivo aún activas mantengan su actividad (aunque también se ha visto que su abandono puede acentuar la erosión en función de las características del propio campo de cultivo). En todo caso, el nivel de detalle que ofrecen nuevas tecnologías como LiDAR permitiría monitorizar el área de estudio e incluso ofrecer la posibilidad de crear modelos que permitiesen predecir (hasta cierto punto) efectos de la erosión como la identificación de las lindes más vulnerables, campos en riesgo de perder superficie de cultivo, posibles áreas en las que sea más probable la aparición de nuevos colapsos, etc.

En definitiva, los procesos de erosión (especialmente el piping) que se desarrollan en los Aguales de Valpalmas constituyen un riesgo ambiental y socioeconómico que pueden desencadenar diversos efectos sobre el suelo. Las capas más superficiales concentran la mayoría de los nutrientes y su pérdida provoca una disminución notable de la calidad del suelo, disminuyendo su productividad a la vez que deteriora sus propiedades fisicoquímicas,

volviéndolo más vulnerable a la erosión hídrica. Se trata de uno de los primeros signos de desertificación del territorio, un fenómeno común en áreas áridas, semiáridas y subhúmedas secas cuyo desarrollo en diferentes partes del territorio español constituye una preocupación cada vez más acuciante. Según las indicaciones del Convenio de Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación (CLD), este fenómeno alcanza su máxima extensión en: (i) climas semiáridos con sequía estacional y precipitaciones torrenciales, (ii) suelos pobres con tendencia a la erosión, (iii) paisajes con relieve desigual o laderas escarpadas, (iv) zonas que han perdido su cubierta forestal debido a incendios y (v) campos de cultivo abandonados. En la Conferencia de las Naciones Unidas sobre la Desertificación celebrada en 1977 se elaboró un mapa de desiertos y áreas proclives a la desertificación a escala global en la que se observó que España era el único país de Europa occidental con importantes áreas del territorio sometidas a procesos de desertificación, a partir del cual han surgido instrumentos de ordenación como el Proyecto de Lucha contra la Desertificación en el Mediterráneo (LUCDEME) o el Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (PAND), cuyo objetivo es promover el conocimiento del proceso de desertificación en España y desarrollar formas de combatirlo. A pesar de los grandes avances científicos realizados en las últimas décadas, autores como [Reynolds et al. \(2005\)](#) consideran que los distintos programas que se han puesto en marcha para combatirlo son, en general, insuficientes y es necesaria una mayor implicación por parte de las administraciones por continuar su estudio y desarrollar estrategias adaptadas, especialmente en el caso de los países más afectados.

Como punto final del presente trabajo se quiere destacar el potencial de lugares como los Aguerales de Valpalmas como oportunidad económica desde el punto de vista del geoturismo: por definición, los Lugares de Interés Geológico o LIG consisten en zonas de especial interés científico, didáctico o turístico que, debido a su carácter único y/o representativo, son necesarias para el estudio e interpretación del origen y evolución de los grandes dominios geológicos españoles. Se trata de elementos inmuebles que forman parte del patrimonio geológico en forma de estructuras, modelados, formaciones, suelos o cualquier otra manifestación geológica que permiten conocer y estudiar el origen y evolución de la Tierra y los procesos que la han modelado. Así, España goza de una diversidad geológica amplia y diversa con un total de 144 LIG y 20 contextos geológicos de relevancia internacional. El auge de las actividades al aire libre en los últimos años plantea un buen panorama para la puesta en valor de estos espacios, haciendo del geoturismo una oportunidad de beneficio económico en el entorno rural español. En concreto, los Aguerales de Valpalmas se trata de un espacio desconocido para muchos que podría mejorar su presentación al público a través de la actualización de sus recursos didácticos (como la renovación de carteles informativos, la mejora de senderos o la planificación de rutas interpretativas) y aprovecharse de la presencia de otros espacios de interés cercanos como las Bardenas Reales como parte de un itinerario geoturístico a lo largo de la diversa comunidad autónoma de Aragón.

6. Conclusiones

1. La erosión del suelo es un proceso presente a escala global con especial representación en el territorio español, tanto por sus propias características naturales (climatología, litología, topografía) como por la intervención humana (presión sobre los recursos).
2. Los efectos que provocan los procesos de erosión son difíciles de estimar, siendo especialmente difícil la cuantificación de la acción del piping debido al desarrollo de conductos subsuperficiales que no suelen tener representación en superficie.
3. Los procesos de erosión son especialmente importantes en el área de estudio, cuyo desarrollo ha tenido un impacto directo sobre la actividad agrícola en la zona.
4. El uso de metodologías SIG para el análisis de cambios planimétricos y volumétricos sobre datos espaciales obtenidos mediante diferentes técnicas (incluyendo la fotogrametría histórica y el LiDAR) permite una estimación de los efectos de la erosión por piping sobre los campos de cultivo a largas escalas de tiempo.
5. Se han observado importantes cambios tanto a nivel planimétrico como a nivel volumétrico en el área de estudio: una pérdida del 10% de las superficies agrícolas en la actualidad respecto a la situación de 1957 o la pérdida de 2.600 m³ de suelo desde 1977 a 2021 en las zonas donde se han perdido campos de cultivo.

Bibliografía

- Alonso Sarría, F., Martínez Hernández, C., Belmonte Serrato, F., Fernández Carrillo, M.A. (2016a). Principales causas del abandono de cultivos en la Región de Murcia en Romero Díaz (Ed.), *Abandono de cultivos en la Región de Murcia. Consecuencias Ecogeomorfológicas* (pp. 203-226). Servicio de publicaciones de la Universidad de Murcia.
- Arnáez, J., Lasanta, T., Ortigosa, L., Ruiz-Flaño, P. (1990). Le processus d'abandon de l'espace agricole dans la montagne subméditerranéenne espagnole: Pyrénées centrales et Système Ibérique. *Revue de Géographie des Pyrénées et du Sud-Ouest*, 6 (2), 237-253. <https://doi.org/10.3406/rgpso.1990.3207>.
- Belnap, J. (2006). The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles. *Hydrological Processes*, 20, 3159–3178.
- Bernatek-Jakiel, A., Kondracka, M. (2016). Combining geomorphological mapping and near surface geophysics (GPR and ERT) to study piping systems. *Geomorphology*, 274, 193–209. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.09.018>.
- Bernatek-Jakiel, A., Poesen, J. (2018) Subsurface erosion by soil piping: significance and research needs. *Earth-Science Reviews*, 185, 1107–1128. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.006>.
- Bernatek-Jakiel, A., Gutiérrez, F., Nadal-Romero, E., Jakiel, M. (2019). Exploring the frequency-size relationships of pipe collapses in different morphoclimatic regions. *Geomorphology*, 345, 106845.
- Bernatek-Jakiel, A., Nadal-Romero, E. (2021). Can soil piping impact environment and society? Identifying new research gaps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 48, 72-86.
- Bocco, G. (1991). Gully erosion, processes and models. *Progress in Physical Geography*, 15, 392–406.
- Bochet, E., García-Fayos, P., Poesen, J. (2009). Topographic thresholds for plant colonization on semi-arid slopes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 1758–1771.
- Boellstorff, D., Benito, G. (2005). Impacts of sed-aside policy on risk of soil erosion in central Spanish. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 107, 231-243. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.11.002>.
- Bryan, R., Yair, A. (1982). *Badland Geomorphology and Piping*. Geobooks.
- Bryan, R.B., Jones, J.A.A. (1997) The significance of soil piping processes: inventory and prospect. *Geomorphology*, 20 (3-4), 209–218. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(97\)00024-X](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(97)00024-X).
- Calvo-Cases, A., Boix-Fayos, C., Arnau-Rosalen, E., Roxo, M.J. (2011). Cárcavas y regueros generados en suelos sódicos. Petrer (Alicante, España). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 37 (1), 25-40.
- Carrión, J.S., Riquelme, J.A., Navarro, C., Munuera, M. (2001). Pollen in hyaena coprolites reflects late glacial landscape in southern Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 176, 1-4.
- Carrión, J.S., Yll, E., Walker, M.J., Legaz, A.J., Chaín, C., López, A. (2003). Glacial refugia of temperate, Mediterranean and Ibero-North African flora in south-eastern Spain: new evidence from cave pollen at two Neanderthal man sites. *Global Ecology and Biogeography*, 12 (2), 119-129.
- Del Olmo, A., Salazar, A., Hernández, A., Barnolas, A., Robador, A. (1987). Mapa geológico de la Hoja nº 285 (Almudévar). Mapa Geológico de España E. 1:50.000. Segunda Serie (MAGNA), Primera Edición. IGME. Depósito legal: M-21.950-1995. ISBN: 84-7840-220-9.
- Del Olmo, A., Hernández, A., Salazar, A., Navarro, J.J., Simón, J.L., Rodríguez, R., Almoguera F.J., García, A., Soriano, C. (1990). Memoria de la Hoja nº 285 (Almudévar). Mapa Geológico de España E. 1:50.000 (MAGNA), Segunda SERIE, Primera Edición. IGME, 64 pp. Depósito legal: M-21.950-1995. ISBN: 84-7840-220-9.
- Del Prete, M., Bentivenga, M., Amato, M., Basso, F., Tacconi, P. (1997). Badland erosion processes and their interactions with vegetation: a case study from Pisticci, Basilicata, southern Italy. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 20, 147–155.

- Descroix, L., Mathys, N. (2003). Processes, spatio-temporal factors and measurements of current erosion in the French Southern Alps. *Hydrological Science Journal*, 47, 227–242.
- Desir, G., Marín C. (2011). Influencia de los procesos de piping en la evolución del modelado. Bardenas Reales (Navarra, España). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 37 (1), 67-78.
- Desir, G., Marín, C. (2013). Role of erosion processes on the morphogenesis of a semiarid badland area: Bardenas Reales (NE Spain). *Catena*, 106, 83-92.
- Díaz-Hernández, J.L. y Juliá, R. (2006). Geochronological position of badlands and geomorphological patterns in Guadix-Baza basin (SE Spain). *Quaternary Research*, 65, Issue 3, 467-477.
- Duarte F., Jones, N., Fleskens, L. (2008). Traditional olive orchards on sloping land: sustainability or abandonment? *Journal of Environmental Management*, 89, 86-98. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.05.024>.
- Espadas, A. (1996). Sanidad vegetal en Murcia. *Agricultura*, 766, 398-400.
- Fairbridge, R.W. (1968). *Encyclopedia of Geomorphology*. Routledge.
- FAO (2015). Status of the Worlds Soil Resources: Main Report, Intergovernmental Technical Panel on Soils. FAO, Rome, Italy.
- FAO, ITPS, GSBI, SCBD, EC. (2020) State of knowledge of soil biodiversity - Status, challenges and potentialities, Report 2020. Rome, FAO.
- Faulkner, H. (2013). Badlands in marl lithologies: a field guide to soil dispersion, subsurface erosion and piping-origin gullies. *Catena*, 106, 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.04.005>.
- Franco, J.A., Calatrava, J. (2010). Adopción y difusión de prácticas de no laboreo en el olivar de la provincia de Granada. *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 10 (1), 135-154. <https://doi.org/10.7201/earn.2010.01.08>.
- Ferrer, V. (2016). Estudio geomorfológico en los badlands de los Aguarales de Valpalmas (Zaragoza) mediante la aplicación de nuevas tecnologías. Trabajo de Fin de Máster de la Universidad de Zaragoza.
- Ferrer, V., Errea, P., Alonso, E., Nadal-Romero, E., Gómez-Gutiérrez, Á. (2017). A multiscale approach to assess geomorphological processes in a semiarid badland area (Ebro Depression, Spain). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 43 (1), 41-62. <https://doi.org/10.18172/cig.3139>.
- Fister, W., Ries, J.B. (2009). Wind erosion in the central Ebro Basin under changing land use management. Field experiments with a portable wind tunnel. *Journal of Arid Environments*, 73, 996-1004. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.05.006>.
- Gallart, F., Marignani, M., Pérez-Gallego, N., Santi, E., Maccherini, S. (2013). Thirty years of studies on badlands, from physical to vegetational approaches. A succinct review. *Catena*, 106, 4-11.
- Gallart, F., Solé, A., Puigdefábregas, J., Lázaro, R. (2002). Badlands systems in the Mediterranean en L.J. Bull y M.J. Kirkby (Eds.), *Dryland Rivers: Hydrology and Geomorphology of Semi-arid Channels*. John Wiley & Sons.
- García-Ruiz, J.M. (2011). Una revisión de los procesos de sufusión o piping en España. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 37 (1), 7-24.
- García-Ruiz, J.M., López-Bermúdez, F. (2009). *La erosión del suelo en España*. Sociedad Española de Geomorfología.
- 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, 50-93.
- Guerrero, M.M., Guirao, P., Martínez-Lluch, M.C., Tello, J.C., Lacasa, A. (2014). Soil fatigue and its specificity towards pepper plants in greenhouses. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 12 (3), 644-652. <https://doi.org/10.5424/sjar/2014123-5701>.

- Gutiérrez, M., Sancho, C., Benito, G., Sirvent, J., Desir, G. (1997). Quantitative study of piping in badlands areas of the Ebro basin, NE Spain. *Geomorphology*, 20, 237-253.
- Harvey, A. (2004). Badland en Fairbridge, R.W. (Ed.), *Encyclopedia of Geomorphology*. Routledge.
- Harvey, A., Calvo, A. (1989). Distribution of badlands in Southeast Spain: implications of climatic change en A.C. Imeson y R.S. de Groot (Eds.), *Landscape-ecological Impact of Climatic Change*.
- Higgins, C.G. (1990). Gully development en C.G. Higgins y D.R. Coates (Eds.), *Groundwater geomorphology: the role of subsurface water in earth-surface processes and landforms*. Geological Society of America.
- Keesstra, S., Sannigrahi, S., López-Vicente, M., Pulido, M., Novara, A., Visser, S., Kalantari, Z. (2021). The role of foils in regulation and provision of blue and green water. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 376 (1834), 20200175. <https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0175>.
- Kirkby, M.J., Atkinson, K., Lockwood, J (1990). Aspect, vegetation cover and erosion on semi-arid hillslopes en J.B. Thornes (Ed.), *Vegetation and Erosion*. John Wiley & Sons.
- Klein, J. (1936). *La Mesta: estudio de la historia económica española*. Alianza Editorial.
- Koppitke, P.M., Menzies, N.W., Wang, P., McKenna, B.A., Lombi, E. (2019). Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International*, 132, 105078. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>.
- Kosmas, C., Danalatos, N.G., López-Bermúdez, F., Romero-Díaz, A. (2002). The effect of land use on soil erosion and land degradation under Mediterranean conditions en N.A. Geeson, N.A., Brandt, C.J., Thornes, J.B. (Eds.), *Mediterranean Desertification: a mosaic of processes and responses*. John Wiley & Sons.
- Kozak, J., Ostapowicz, K., Szablowska-Midor, A., Widacki, W. (2004). Land abandonment in the Western Beskidy Mts and its environmental background. *Ekologia (Bratislava)*, 23 (1), 116-26.
- Kuhn, N., Yair, A., Kasanin-Grubin, M. (2004). Spatial distribution of surface properties, runoff generation and landscape development in the Zin Valley badlands, northern Negev, Israel. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 1417–1430.
- Lasanta, T. (1988a). The process of desertification of cultivated areas in the Central Spanish Pyrenees. *Pirineos*, 132, 15-36.
- Lasanta, T. (1996). El proceso de marginación de tierras en España en T. Lasanta, J.M. García-Ruiz (Eds.), *Erosión y recuperación de tierras en áreas marginales*. Instituto de Estudios Riojanos – Sociedad Española de Geomorfología.
- Lasanta, T., Nadal-Romero, E., Khorchani, M., Romero-Díaz, A. (2021). Una revisión sobre las tierras abandonadas en España: de los paisajes locales a las estrategias globales de gestión. *Cuadernos de Investigación Científica*, 47, 477-521.
- Lesschen, J.P., Kok, K., Verburg, P.H., Cammeraat, L.H. (2007). Identification of vulnerable areas for gully erosion under different scenarios of land abandonment in Southeast Spain. *Catena*, 71, 110-121. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.05.014>.
- López-Bermúdez, F. (2002). *Erosión y desertificación: heridas en la Tierra*. Nivola.
- López-Bermúdez, F., Romero, A. (1989). Piping erosion and badland development in south-east Spain. *Catena*, 14, 59-73.
- Mathys, N., Brochot, S., Meunier, M., Richard, D. (2003). Erosion quantification in the small marly experimental catchments of Draix (Alpes de Haute Provence, France). Calibration of the ETC rainfall – runoff – erosion model. *Catena*, 50, 527-548.
- Meléndez-Pastor, I., Hernández, E.I., Navarro-Pedreño, J., Gómez, I. (2014). Socioeconomic factors influencing land cover changes in rural areas: the case of the Sierra de Albarracín (Spain). *Applied Geography*, 52, 34-45. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.04.013>.

- Molina, C.M. (2002). Estrategia forestal comunitaria, nacional y autonómica. *Eria*, 58, 177-181.
- Moreno-de las Heras, M., Gallart, F. (2016). Lithology controls the regional distribution and morphological diversity of montane Mediterranean badlands in the Upper Llobregat basin (eastern Pyrenees). *Geomorphology*, 273, 107-115.
- Moreno-de las Heras, M., Gallart, F. (2018). The Origin of Badlands. *Badlands Dynamics in the Context of Global Change*, Chapter 2. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813054-4.00002-2>.
- Nadal-Romero, E., Regüés, D., Martí-Bono, C., Serrano-Muela, P. (2007). Badland dynamics in the Central Pyrenees: temporal and spatial patterns of weathering process. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 888-904.
- Nadal-Romero, E., Regüés, D. (2010). Geomorphological dynamics of subhumid mountain badland areas – weathering, hydrological and suspended sediment transport processes: a case study in the Araguás catchment (Central Pyrenees) and implications for altered hydroclimatic regimes. *Progress in Physical Geography*, 34, 123–150.
- Nagendra, H., Southworth, J., Tucker, C. (2003). Accessibility as a determinant of landscape transformation in western Honduras: linking pattern and process. *Landscape Ecology*, 18 (2), 141-158. <https://doi.org/10.1023/A:1024430026953>.
- Nogueras, P., Burjachs, F., Gallart, F., Puigdefàbregas, J. (2000). Recent gully erosion in the El Cautivo badlands (Tabernas, SE Spain). *Catena*, 40 (2), 203-215. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00048-X](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00048-X).
- Llena, M., Vericat, D., Martínez-Casanovas, J.A. (2018). Aplicación de algoritmos Structure from Motion (SfM) para el análisis histórico de cambios en la geomorfología fluvial. *Cuaternario y Geomorfología*, 32, 53-73.
- Onega-López, F.J., Puppín de Oliveira, J.A., Crecente-Maseda, R. (2010). Planning innovations in land management and governance in fragmented rural areas: two examples from Galicia (Spain). *European Planning Studies*, 18 (5). <https://doi.org/10.1080/09654311003594967>.
- Parker, G., Higgins, C. (1990). Piping and pseudokarst in drylands en Higgins, C., Coates, D. (Eds.), *Groundwater Geomorphology. The Role of Subsurface Water in Earth-Surface Processes*. John Wiley & Sons.
- Regüés, D., Llorens, P., Pardini, G., Pini, R., Gallart, F. (1995). Physical weathering and regolith behaviour in a high erosion rate badland area at the Pyrenees: research design and first results. *Pirineos*, 141-142, 63–84. <https://doi.org/10.3989/pirineos.1993.v141-142.164>.
- Rey-Benayas, J.M., Martins, A., Nicolau, J.M., Schulz, J. (2007). Abandonment of agricultural land: an overview of drivers and consequences. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 2, 57. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR20072057>.
- Reynolds, J.F., Maestre, F.T., Huber-Sannwald, E., Herrick, J., Kemp, P.R. (2005). Aspectos socioeconómicos y biofísicos de la desertificación. *Ecosistemas*, 14 (3), 3-21.
- Richards, K.S., Reddy, K.R. (2007) Critical appraisal of piping phenomena in Earth dams. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66, 381–402. <https://doi.org/10.1007/s10064-007-0095-0>.
- Romero-Díaz, A., Marín-Sanleandro, P., Sánchez-Soriano, A., Belmonte-Serrato, F., Faulkner, H. (2007). The causes of piping in a set of abandoned agricultural terraces in Southeast Spain. *Catena*, 69, 282-293. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.07.008>.
- Ruiz-Flaño, P., García-Ruiz, J.M., Ortigosa, L. (1992a). Geomorphological evolution of abandoned fields. A case study in the Central Pyrenees. *Catena*, 19, 301-308.
- Ruiz-Flaño, P. (1993). *Procesos de erosión en campos abandonados del Pirineo*. Geoforma.
- Ruiz-Sinoga, J.D., Martínez-Murillo, J.F. (2009). Hydrological response of abandoned agricultural soils along a climatological gradient on metamorphic parent material in southern Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 2047-2056. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.11.004>.

- Strijker, D. (2005). Marginal lands in Europe: causes of decline. *Basic Applied Ecology*, 6, 99-106. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2005.01.001>.
- Ternan, J.L., Elmes, A., Fitzjohn, C., Williams, A.G. (1998). Piping susceptibility and the role of hydrogeomorphic controls in pipe development in alluvial sediments, Central Spain. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 42 (1), 75–87.
- Tóth, G., Gardi, C., Bódis, K., Ivits, É., Aksoy, E., Jones, A. et al. (2013). Continental-scale assessment of provisioning soil functions in Europe. *Ecological Processes*, 2, 32. <https://doi.org/10.1186/2192-1709-2-32>.
- United States Department of Agriculture (USDA). Soil Quality Test Kit Guide. 88 pp.
- Urteaga, L. (1987). La Tierra esquilmada: las ideas sobre la conservación de la naturaleza en la cultura española del siglo XVIII. Ediciones Serbal y Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), 221 pp.
- Van Leeuwen, C.C.E., Cammeraat, E.L.H., de Vente, J., Boix-Fayos, C. (2019). The evolution of soil conservation policies targeting land abandonment and soil erosion in Spain: a review. *Land Use Policy*, 83, 174-186. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.01.018>.
- Vera, F., Romero, J. (1994). Impacto Ambiental de la actividad agraria. *Agricultura y Sociedad*, 71, 153-181.
- Verger, F. (1995). Slikkes et Schorres: milieux et aménagement. *Norwis*, 165, 235-245.
- Vericat, D., Smith, M.W., Brasington, J. (2014). Patterns of topographic change in sub-humid badlands determined by high resolution multi-temporal topographic surveys. *Catena*, 120, 164–176.
- Wilson, G.V., Fox, G.A. (2013) Pore-water pressures associated with clogging of soil pipes: numerical analysis of laboratory experiments. *Soil Science Society of America Journal*, 77(4), 1168–1181. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0416>.
- Wilson, G.V., Wells, R.R., Kuhnle, R.A., Fox, G.A., Nieber, J. (2017a). Sediment detachment and transport processes associated with internal erosion of soil pipes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43, 45–63. <https://doi.org/10.1002/esp.4147>.
- Wilson, G.V., Wells, R.R., Kuhnle, R.A., Fox, G.A., Nieber, J. (2018) Sediment detachment and transport processes associated with internal erosion of soil pipes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43, 45–63. <https://doi.org/10.1002/esp.4147>.
- Wise, S.M., Thornes, J.B., Gilman, A. (1982). How old are the badlands? A case study from southeast Spain en Bryan, R.B. y Yair, A. (Eds.), *Badland Geomorphology and Piping*. Geobooks.
- Yair, A., Lavee, H. (1980). Runoff and erosion processes and rates in the Zin valley badlands, northern Negev, Israel. *Earth Surface Processes and Landforms*, 5, 205-225.