Conference Paper from the X Iberian Symposium on the Hydrographic Minho River Basin
("X Simpósio Ibérico sobre a Bacia Hidrográfica do Rio Minho")

e-ISSN: 2595-5527
Special Issue, p. 07-16, 2021
Doi: 10.32435/envsmoke/xibesymp.2

INVENTORY AND CHARACTERIZATION OF EROSIVE FORMS IN THE BARBANTIÑO RIVER (MIÑO BASIN, GALICIA, NW PENÍNSULA IBÉRICA)

INVENTARIO Y CARACTERIZACIÓN DE FORMAS EROSIVAS EN EL RÍO BARBANTIÑO (CUENCA DEL MIÑO, GALICIA, NW PENÍNSULA IBÉRICA)

Elena de Uña-Álvarez[1], Miguel Ángel Álvarez-Vázquez[2], Maria Luz Rodríguez-Blanco[3], Alexandra Maria Ramírez-Pérez[4]

Abstract

The existence of forms sculpted by fluvial erosion is frequent in Bedrock Rivers. Since 1999, the Area of Physical Geography of the University of Vigo (Ourense Campus) has been conducting research on these rock cavities in various reaches of the middle Miño River. The exploratory study that is presented corresponds to the case of a section upstream of the Barbantiño river waterfall (Ourense, Galicia). Carried out within the framework of a research line with the objectives of inventorying, characterizing, interpreting and evaluating the erosive forms in the rocky channels of the Miño River and its tributaries, the employed methodology included phases of field work, creation of a database, and statistical analysis. From the records in the sampled sectors of the Barbantiño River, an inventory was made with 60 erosive forms, considering quantitative variables (measurements of length, width, depth) and qualitative variables (morphology of the bottom, state of the walls, and presence of deposits). The preliminary results of the exploratory analysis provide new information on the sculpted forms in bedrock, allowing comparison with previous studies. The erosive forms of the studied section are characterized by great variability in their depth (between 2 cm and 2.7 m), length (between 7 cm and 2.5 m) and width (between 4 cm and 2 m); the strong correlation between surface and bottom dimensions (Spearman's r> 0.85); and the coexistence of cavities in an incipient state, furrows and potholes. These results contribute to the advancement of knowledge of a natural legacy that is part of the geodiversity of the Miño River basin, with a complex of values associated with its condition of geomorphological heritage.

Keywords: Bedrock River. Pothole. Furrow. Heritage. Iberian Massif. Barbantiño River. Galicia.

[1]Licenciada en Geografía, Doctora en Geografía Física. Área de Geografía Física, Grupo GEAAT, Campus de Ourense, Universidade de Vigo. e-mail: edeuna@uvigo.es

[2]Licenciado en Ciencias Ambientales, Doctor en Ciencias Ambientales. Área de Geografía Física, Grupo GEAAT, Campus de Ourense, Universidade de Vigo. e-mail: mianalva@uvigo.es

[3]Licenciada en Biología, Doctora en Biología. Área de Geografía Física, Grupo GEAAT, Campus de Ourense, Universidade de Vigo. e-mail: maria.luz.rodriguez.blanco@uvigo.es

[4]Licenciada en Ciencias Ambientales, Doctora en Ciencias Ambientales. Área de Geografía Física, Grupo GEAAT, Campus de Ourense, Universidade de Vigo. e-mail: alexandra@uvigo.es

Resumen

La existencia de formas esculpidas por la erosión fluvial es frecuente en los ríos sobre roca. Desde el año 1999, el Área de Geografía Física de la Universidad de Vigo (Campus de Ourense) desarrolla la investigación sobre estas cavidades rocosas en diversos tramos del Miño medio. El estudio exploratorio que se presenta corresponde al caso de un tramo aguas arriba de la cascada del río Barbantiño (Ourense, Galicia). Realizado en el marco de una línea de investigación con los objetivos de inventariar, caracterizar, interpretar y valorar las formas erosivas en los cauces rocosos del río Miño y sus afluentes, la metodología seguida incluyó fases de trabajo de campo, creación de base de datos, y análisis estadístico. A partir de los registros en los sectores muestreados del río Barbantiño, se elaboró un inventario con 60 formas erosivas, considerando variables cuantitativas (medidas de longitud, anchura, profundidad) y variables cualitativas (morfología del fondo, estado de las paredes, presencia de depósitos). Los resultados preliminares del análisis exploratorio aportan nueva información sobre las formas esculpidas en ríos sobre roca, posibilitando la comparación con los estudios previos.

Las formas erosivas del tramo estudiado se caracterizan por la gran variabilidad en su profundidad (entre 2 cm y 2,7 m), longitud (entre 7 cm y 2,5 m) y anchura (entre 4 cm y 2 m); la fuerte correlación entre las dimensiones de superficie y fondo (r de Spearman >0.85); y la coexistencia de cavidades en estado incipiente, surcos y marmitas. Estos resultados contribuyen al avance del conocimiento de un legado natural que forma parte de la geodiversidad de la cuenca del río Miño, con un complejo de valores asociados a su condición de patrimonio geomorfológico.

Palabras clave: Río sobre roca. Marmita. Surco. Patrimonio. Macizo Ibérico. Río Barbantiño. Galicia.

Submitted on: 15 Nov. 2021
Accepted on: 17 Dec. 2021
Published on: 31 Dec. 2021

© Copyright 2021

1 Introducción

La presencia de marmitas fluviales (potholes), surcos (furrows) y gubiazos (scallops) es frecuente en los ríos sobre roca. Estas formas esculpidas por la erosión fluvial constituyen un legado geomorfológico de gran interés ya que guardan la memoria de los procesos de incisión vertical y lateral en los cauces rocosos. La importancia de la función informativa del patrimonio geomorfológico respecto al pasado fue definida explícitamente en la Declaración Internacional sobre los Derechos de la Memoria de la Tierra (1991), redactada durante el Primer Simposio Internacional sobre Protección del Patrimonio Geológico. Una década más tarde, la relevancia de su consideración en las iniciativas de desarrollo fue señalada por la Carta de la Tierra (2000), resultado de un movimiento internacional para impulsar la sostenibilidad ambiental. Desde el comienzo del siglo XXI, una serie de declaraciones institucionales inciden en la necesidad de proteger y salvaguardar la diversidad geomorfológica.

Reconociendo que procesos y formas son una parte esencial del patrimonio europeo, el Consejo de Ministros de la Unión Europea (COUNCIL OF EUROPE, 2004) recomendó promover su conservación y protección para las generaciones presentes y futuras en el marco de la planificación del desarrollo socioeconómico. En el mismo sentido, la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza manifestó la importancia de fomentar la visibilidad y la sensibilidad respecto a la diversidad geomorfológica; en las resoluciones adoptadas durante su IV Congreso Internacional (IUCN, 2008) apuntó la necesidad de salvaguardar su conjunto de valores (estéticos, científicos, paisajísticos, culturales, económicos) para promover el conocimiento y lograr una gestión apropiada en diferentes escalas espacio-temporales. Los beneficios de estas acciones para la población en la dimensión local, nacional e internacional (referidos especialmente a su valor para la educación, la cultura y el soporte de los ecosistemas) fueron recogidos en la Declaración de Reykjavik (2015), aprobada en el VIII Simposio Internacional ProGEO; en ella se manifiesta que la realización de inventarios y su caracterización es fundamental para identificar lugares de interés científico, educativo, cultural y socioeconómico. En el horizonte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (BRILHA; GRAY; PEREIRA; PEREIRA, 2018) se enfatiza la consideración del importante papel de los elementos abióticos de la naturaleza, incluyendo los geomorfológicos, en las estrategias destinadas a la mejora de las condiciones vitales de las comunidades humanas.

La investigación de los componentes geomorfológicos como elementos patrimoniales se encuentra fundamentada en su relevancia para el entendimiento de la historia de la Tierra (GRAY, 2013) y en su valor para la sociedad (CROFTS, 2018; GORDON, 2018; GRAY, 2019). Desde esta perspectiva, la elaboración de un inventario de las formas esculpidas por la erosión fluvial parte de su definición como elementos representativos del patrimonio natural, considerando que su caracterización, clasificación y análisis generan información significativa tanto para conservar y proteger el patrimonio geomorfológico como para fomentar sus usos sostenibles (SHARPLES, 1993; GRANDGIRARD, 1997). El conjunto de las formas erosivas identificadas en los ríos sobre roca, conectadas a otros bienes naturales o culturales, define lugares de interés geomorfológico, también denominados geomorfositios (PANIZZA, 2001; REYNARD, 2005) o sitios de la geodiversidad (BRILHA, 2016) con propiedades específicas de carácter dinámico, escénico y sociocultural (ORTEGA; DURÁN, 2010; CORATZA; HOBLÉA, 2018). En ellos, la diversidad de las formas erosivas refleja la dinámica fluvial a lo largo de varios cientos o miles de años (TINKLER; WOHL, 1998) en respuesta a los cambios tectónicos y climáticos (WHIPPLE; DIBIASE; CROSBY, 2013). Los estudios acerca de la génesis de estos bienes geomorfológicos destacan la importancia de las variaciones del nivel de base y de las rupturas de pendiente en el perfil longitudinal de los ríos (GOODE; WOHL, 2010) así como del sistema de fracturas o diaclasas en la roca (ORTEGA; GÓMEZ-HERAS; PÉREZ-LÓPEZ; WOHL, 2014; SCOTT; WOHL, 2019). Además, revelan el papel decisivo de los mecanismos de retroalimentación ligados a la formación de vórtices de turbulencia y los diferentes procesos de erosión fluvial (WHIPPLE; HANCOCK; ANDERSON, 2000). La evolución de las formas erosivas en ambiente exógeno está determinada por el aumento de sus dimensiones (SPRINGER; TOOTH; WOHL, 2006; PELLETIER; SWEENEY; ROERING; FINNEGAN, 2015; DHALI, 2019) con procesos de coalescencia y/o colapso que suponen cambios en la configuración de sus planos de apertura y de su perfil transversal. La creación de bases de datos con registros dimensionales y morfológicos para analizar las formas erosivas fluviales representa un procedimiento fundamental para definir su valor, que precede a las acciones destinadas a impulsar su conocimiento y aprecio público debido a su interés como bienes de la geodiversidad (MIGOŃ, 2021; BRILHA; GRAY; MATTHEWS; ZWOLIŃSKI, 2021).

Desde el año 1999, el área de Geografía Física en el Campus de Ourense (Universidade de Vigo) desarrolla una línea de investigación centrada en el inventario, evaluación e interpretación de las formas erosivas fluviales en varios tramos de la red de drenaje del río Miño. El planteamiento de esta línea está dirigido hacia el avance de su conocimiento, valoración e integración como bienes patrimoniales y geo-recursos en la protección y dinamización del territorio interior de Galicia. Los estudios realizados en este marco han valorado la diversidad de las formas erosivas fluviales, sus patrones evolutivos, su potencial educativo y su interés como geo-recursos territoriales tanto en el entorno de la ciudad de

Ourense considerando el tramo urbano del río Miño (DE UÑA-ÁLVAREZ; ÁLVAREZ-VÁZQUEZ; RODRÍGUEZ MARTÍNEZ-CONDE, 2014; ÁLVAREZ-VAZQUEZ; DE UÑA-ÁLVAREZ, 2015; DE UÑA-ÁLVAREZ; ÁLVAREZ-VÁZQUEZ, 2016; ÁLVAREZ-VAZQUEZ; DE UÑA-ÁLVAREZ, 2017a; ÁLVAREZ-VAZQUEZ; DE UÑA-ÁLVAREZ, 2017b) como en el tramo medio de su afluente, el río Loña, aguas arriba del embalse de Cachamuiña (DE UÑA-ÁLVAREZ; VIDAL ROMANÍ; RODRÍGUEZ MARTÍNEZ-CONDE, 2009; DE UÑA-ÁLVAREZ; ÁLVAREZ-VÁZQUEZ; PREGO, 2018; ÁLVAREZ-VÁZQUEZ; DE UÑA-ÁLVAREZ, 2021). El estudio de las formas erosivas en el río Barbantiño continúa esa línea, aportando nuevos datos para la comprensión del carácter de las formas y generando referencias para su posterior evaluación en el ámbito del patrimonio geomorfológico local. En consecuencia, los objetivos que fundamentan el estudio son: (i) identificar e inventariar las formas de erosión fluvial en tramos de ríos sobre roca; (ii) caracterizar e interpretar estas formas para contribuir a definir su valor como patrimonio geomorfológico; y (iii) obtener información y resultados de referencia para el desarrollo de futuras investigaciones.

2 Material y Métodos

Área de estudio

El río Barbantiño, afluente del río Miño en Galicia, nace en las estribaciones de los Montes de Orbán (600 m s.n.m., municipio de Vilamarín, provincia de Ourense). Desde su nacimiento sigue una dirección general NNE-SSW hasta confluir con el río Miño en la localidad de Santa Cruz de Arrabaldo (100 m s.n.m.) al oeste de la ciudad de Ourense. El sustrato rocoso de su cuenca corresponde a granitos de dos micas moderadamente leucocráticos, de grano medio-grueso (IGME, 1989). El Barbantiño es un pequeño río de tipo cántabro-atlántico silíceo (longitud de 22,6 km) y drena una cuenca con 175,28 km2 de extensión superficial (CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA MIÑO-SIL, 2021). Una vez recogidas las aguas de cabecera, discurre por un replano topográfico con altitud media de 400 m s.n.m. y antes de confluir con el río Formigueiro, su tributario de mayor importancia, fluye a través de un valle muy encajado con un notable incremento de la incisión vertical (Figura 1). En este sector se localiza la Cascada del Barbantiño (en lengua gallega, Fervenza do Barbantiño), salvando 15 m de desnivel; aguas arriba de la cascada destaca la presencia de un conjunto de formas erosivas fluviales.

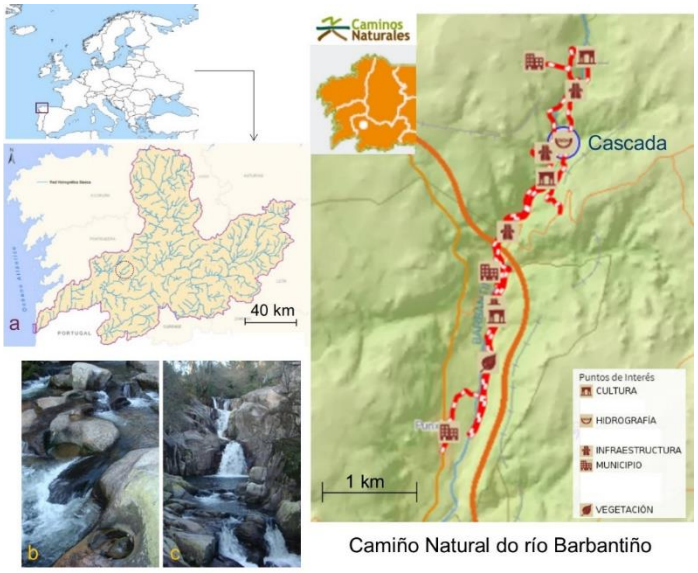

Figura 1. Área de estudio: a) Localización en la Demarcación Hidrográfica Miño-Sil; b) Vista del sector aguas arriba de la cascada; c) Imagen de la cascada y situación en el Camino Natural del río Barbantiño. (Fuentes: Confederación Hidrográfica Miño-Sil, Programa Nacional de Caminos Naturales de España. Fotografías: E. De Uña-Álvarez).

La cascada es uno de los hitos del Camino Natural del río Barbantiño, integrado en la Red de Caminos Naturales de España (código Noroeste 16; Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación). La promoción de este camino, dentro de un programa nacional que fomenta los usos deportivos, culturales y educativos para impulsar el conocimiento de la naturaleza y el desarrollo rural, detalla la presencia de un conjunto de bienes patrimoniales. Junto con la cascada, la explicación del recorrido a través de un sendero que bordea el río (10 km) señala el elevado grado de interés de los bienes naturales: los pequeños manantiales de aguas minero-medicinales, los bosques de ribera -con alisos (Alnus glutinosa), fresnos (Fraxinus sp.), chopos (Populus sp.), sauces (Salix sp.) y helechos (Osmunda regalis)- y las formaciones arbóreas de robles (Quercus robur, Quercus pyrenaica) o pinos (Pinus pinaster); también indica la presencia, con alto grado de interés, de los bienes culturales: las infraestructuras hidráulicas tradicionales como los molinos, los caneiros (diques artesanales de piedra para estancar y desviar el agua), los puentes o los espacios recreativos. Por lo que respecta a las formas erosivas fluviales, particularmente desarrolladas aguas arriba de la cascada y en el frente del salto de agua, son pobremente definidas como “rocas graníticas esmaltadas por el agua” en la promoción del camino natural.

El área de estudio está delimitada en el contexto de importancia internacional Red fluvial y Relieves del Macizo Ibérico, reconocido por el Proyecto Global Geosites, que desarrolla desde 1995 la Unión Internacional de Ciencias Geológicas y la UNESCO, tutelado en España

por el Instituto Geológico y Minero (CARCAVILLA; PALACIO, 2019). Dentro de las categorías contempladas para identificar los Lugares de Interés Geomorfológico en Galicia, la cascada del Barbantiño pertenece al grupo de las Cascadas de los afluentes del río Miño (RAMIL REGO, 2012); y actualmente está incluida en el registro de cascadas con protección especial (código 1110100237) de la Demarcación Hidrográfica Miño-Sil en Galicia.

Metodología

El primer reconocimiento de las formas erosivas in situ tuvo lugar durante el verano de 1996. En febrero de 2002 se realizó el segundo reconocimiento del área, con un muestreo exploratorio. Posteriormente, se avanzó en el diseño del estudio y la recogida de información tanto del ámbito temático como del caso específico del río Barbantiño; en este marco se configuró la planificación del muestreo definitivo de las formas erosivas. El trabajo de campo se realizó en dos fases (2011-2012 y 2014-2016), cumplimentando los registros de 60 formas erosivas mediante un muestreo lineal en los márgenes y el centro del cauce rocoso. El protocolo de registro incluyó variables cuantitativas y cualitativas. Además de la posición de las formas en el cauce, se registraron las siguientes medidas (en cm): ejes de su plano de apertura en superficie (S) y fondo (F), correspondiendo la longitud al eje mayor (S1, F1) y la anchura al eje menor (S2, F2) respectivamente; y profundidad máxima en el eje vertical (P). Otras variables como la relación con el sistema de diaclasas; la morfología del fondo (plano, cóncavo, o compuesto); el tipo de contorno (regular, irregular, o lobulado); el estado de las paredes (lisas, rebajadas, o sobre-excavadas); y la presencia de depósitos (cantos, gravas, o arenas) se registraron utilizando categorías nominales.

Una vez creada la base de datos con el programa Statgraphics Centurion 18-X64, se elaboró un análisis estadístico exploratorio de los registros cuantitativos. A partir del examen de la distribución de los datos fueron seleccionadas las técnicas adecuadas para su tratamiento. Los índices morfométricos de compacidad (IC) se obtuvieron utilizando los datos de apertura en superficie (ICS = S1/S2) y fondo (ICF = F1/F2). El análisis de los estadísticos de la muestra y de las correlaciones estadísticamente significativas (p-valor <0.05) avanzó la diferenciación de grupos de formas. Con los resultados del análisis estadístico y el análisis de la información cualitativa, se realizó la caracterización de las formas erosivas inventariadas. Las formas desarrolladas en el centro del salto de agua (con profundidades >5 m) no pudieron ser registradas según el protocolo expuesto debido a las dificultades de accesibilidad.

3 Resultados y discusión

Descripción morfológica

Las formas erosivas identificadas e inventariadas en el área de estudio presentan gran diversidad morfológica (Figura 2). Su distribución en las superficies rocosas está relacionada con el sistema de discontinuidades, que dirige la orientación del eje mayor de apertura y el desarrollo del ahondamiento en las cavidades.

En los márgenes del cauce, aguas arriba de la cascada (200-210 m s.n.m.), se encuentran formas con perfiles simétricos y fondos planos o cóncavos. Las medidas de S1 y S2 oscilan entre 19-43 cm y las de F1 y F2 entre 5-29 cm, siendo el registro más elevado para P de 25 cm. Existen casos de formas coalescentes, de contornos lobulados, con medidas de apertura superficial en el intervalo de 68-120 cm y registros de P que varían entre 20-27 cm. En el mismo sector, en el centro del cauce, las formas erosivas parcial o totalmente sumergidas poseen perfiles asimétricos, con paredes sobre-excavadas (hasta cuatro niveles de excavación en su interior), fondos compuestos y bordes rebajados. Están conectadas entre sí, con cantos que colmatan su fondo. Para las formas parcialmente sumergidas, que carecen de una de las paredes; las medidas de S1 y S2 varían entre 40-90 cm, las de F1 y F2 varían entre 28-90 cm; y las de P, entre 40-86 cm. Para las formas totalmente sumergidas las medidas de apertura en el fondo (F1 y F2, 120-130 cm) siempre superan las de apertura en superficie (S1 y S2, 109-120 cm); y las de P se encuentran entre 97 y 130 cm.

Antes del salto de la cascada (190-200 m s.n.m.), las formas con planta en herradura, paredes lisas y fondos cóncavos con arenas, configuran un canal de circulación secundario, son frecuentes en el margen del cauce; el registro más elevado de apertura superficial es de 40 cm para S1 y de 20 cm para S2, y el valor para P no supera habitualmente los 10 cm. La forma con mayor desarrollo entre estos casos, con depósitos de cantos en su fondo, posee 25 cm de profundidad máxima. En el centro del cauce se encuentran formas de pequeñas dimensiones y fondo plano (medidas de los ejes de apertura entre 11 y 47 cm), con medidas para P siempre <10 cm, localizadas en la superficie superior de los bloques. Además, existen formas similares a las ya mencionadas, parcialmente sumergidas, siendo el valor máximo de P de 60 cm.



Figura 2. Diversidad morfológica de las formas erosivas en el río Barbantiño: a) sector superior aguas arriba de la cascada; en el mismo sector, b) marmita incipiente en los márgenes del cauce, c) pequeña marmita que evoluciona siguiendo el sistema de diaclasas, d) marmitas parcialmente sumergidas en el centro del cauce con bordes rebajados; e) formas con planta en herradura y formas incipientes en el margen del cauce, f) marmitas en el centro del cauce y g) alineación de surcos antes del salto de la cascada; h) marmitas con dimensiones >5 m en el salto de la cascada. (Fotografías: E. De Uña-Álvarez).

Las formas erosivas de mayor dimensión están desarrolladas en el borde del salto de la cascada (190 m s.n.m.). Presentan paredes pulidas (lisas), en las que se observan marcas de varios niveles de agua. Los contornos del plano de apertura son irregulares. Los fondos son compuestos, con depósitos de cantos, y los perfiles asimétricos están sobre-excavados (hasta seis niveles de excavación en su interior). Las medidas de S1 y S2 oscilan entre 1.50 m y 2.70 m; las de F1 y F2, entre 90 cm y 2 m; y las de P, entre 1.20 m y 2.70 m.

Las propiedades de las formas y el rango dimensional de los registros cuantitativos (Figura 3) indican la coexistencia de diversos tipos de cavidades generadas por la erosión fluvial. Siguiendo la tipología morfológica general en los sistemas fluviales (RICHARDSON; CARLING, 2005) en la meso-macro escala espacial, en los márgenes del cauce están presentes los gubiazos (scallops, flutes) relacionados con marcas de percusión (formas con plano de apertura en herradura), los surcos (furrows) de contornos rectos o sinuosos (formas con plano de apertura elíptica) siguiendo las diaclasas, y los canales sinuosos (runnels) que conectan los puntos más bajos de la roca excavada y diversifican los flujos hídricos entre los resaltes rocosos, reteniendo gravas y arenas. Las marmitas fluviales, en diverso estado de desarrollo, se identifican en los márgenes y el centro del cauce.

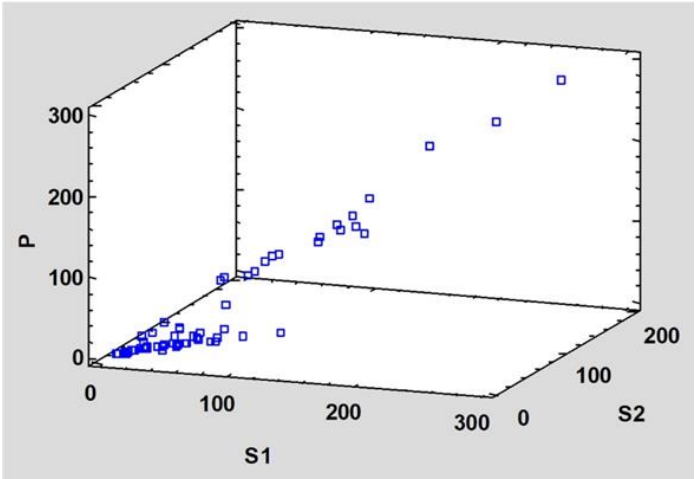

Figura 3. Rango dimensional de las formas erosivas inventariadas en el río Barbantiño (valores en cm). S1, valores del eje mayor de apertura en superficie. S2, valores del eje menor de apertura en superficie. P, valores de la profundidad máxima vertical. (Elaboración propia).

Análisis estadístico

Los estadísticos descriptivos de centralidad y de dispersión de la muestra (Tabla 1) reflejan la variabilidad de las dimensiones en las formas inventariadas. Los valores estandarizados del sesgo y la curtosis o apuntamiento están fuera del intervalo -2/+2, indicando que la distribución de las medidas (excepto para la curtosis de F1) está muy alejada de la normalidad. En consecuencia, con la finalidad de obtener resultados significativos, es aconsejable utilizar para el análisis los estadísticos robustos (Tabla 2). Los estadísticos de posición (percentiles) en la muestra de formas inventariadas aportan información relevante sobre su estado de desarrollo.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de la muestra (n=60) *

Estadísticos descriptivos	P	S1	S2	F1	F2
Mínimo Máximo Rango	2 270 268	7 250 243	4 200 196	5 190 185	2 180 178
Media Desviación estándar	46,15 61,55	64,68 52,06	46,76 43,99	55,21 45,99	38,30 39,40
Sesgo estandarizado Curtosis estandarizada	5,57 4,59	4,53 3,43	5,36 4,16	3,37 0,54	4,98 3,25

*Valores en cm de los registros de las formas erosivas. Eje mayor y menor de apertura: S1 y S2, en superficie; F1 y F2, en fondo. P, profundidad máxima del eje vertical.

Tabla 2. Estadísticos robustos de la muestra (n=60) *

Estadísticos robustos	P	S1	S2	F1	F2
Percentil 10	2	14	10	10	7
Percentil 25 (Cuartil 1)	4	22	20	20	12
Percentil 50 (Mediana)	17	47	28	40	20
Percentil 75 (Cuartil 3)	82	87	61	82	60
Percentil 90	124	137	110	130	100

*Valores en cm de los registros de las formas erosivas. Eje mayor y menor de apertura: S1 y S2, en superficie; F1 y F2, en fondo. P, profundidad máxima del eje vertical.

Los valores de las medianas expresan las medidas de centralidad de los registros, siempre <50 cm; la mayor dispersión central de los valores respecto a la mediana (desviación intercuartílica) resulta para P (78 cm), seguida por la obtenida para S1 y F1 (65 cm y 62 cm respectivamente), siendo mucho menor para S2 y F2 (41 cm y 48 cm respectivamente). Los valores del percentil 10 (≤14 cm) representan las dimensiones máximas de las formas erosivas con menor grado de desarrollo, en un estado inicial de crecimiento. Los valores del percentil 90 (≥1 m) representan las dimensiones mínimas de las formas erosivas con mayor grado de desarrollo, en un estado avanzado y/o estacionario de crecimiento, duplicando los resultados de las medianas. La diversidad morfológica de la muestra y su variabilidad dimensional (Figura 4) también se confirma por la existencia, en todos los registros, de valores alejados de la mediana.

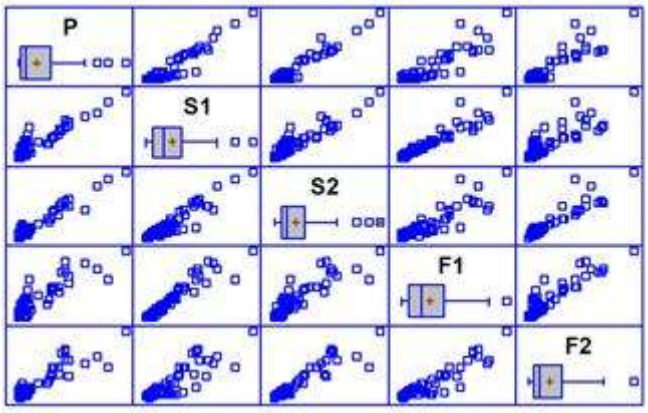

Figura 4. Distribución de los valores y diagramas de caja para los registros de apertura y de profundidad de las formas erosivas inventariadas. Eje mayor y menor de apertura: S1 y S2, en superficie; F1 y F2, en fondo. P, profundidad máxima del eje vertical. (Elaboración propia).

Los resultados obtenidos para el ICS (mediana = 1,29) y el ICF (mediana = 1,25) indican que la geometría de los planos de apertura superficial con mayor frecuencia es circular y ovalada; los planos de apertura elipsoidales (en el 10% de los casos muy alargados) son minoritarios en la muestra (Figura 5). En las formas erosivas con menor grado de desarrollo la geometría de los planos de apertura, tanto en superficie como en el fondo, es de tipo circular (para ICS e ICF, equivalente a 1,00).

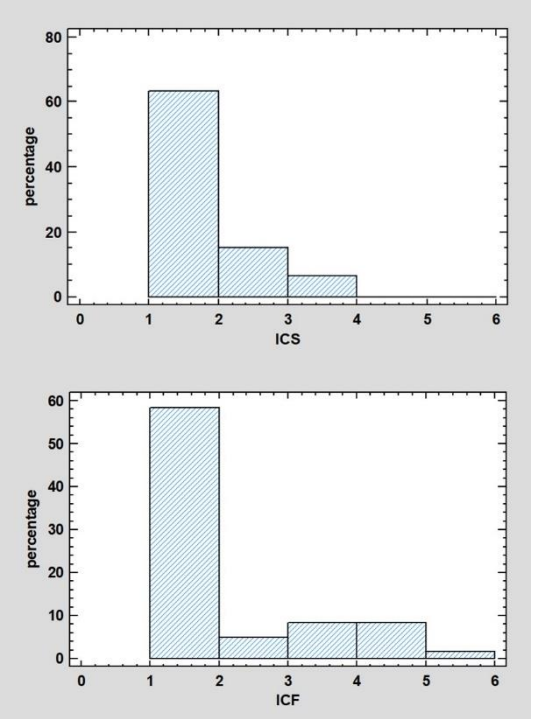

Figura 5. Distribución de frecuencias relativas para los resultados de ICS (S1/S2) y de ICF (F1/F2) en las formas erosivas del río Barbantiño (Elaboración propia).

Los resultados de las correlaciones por rangos (Spearman, p-valor <0,05), menos sensibles a la presencia de valores alejados y/o muy alejados de los promedios en una muestra, indican correlaciones estadísticamente significativas (elevada asociación positiva) entre los siguientes datos de las medidas de las formas (Tabla 3): S1 con F1, S2 con F2, S1 con S2, y P con S1. El proceso de crecimiento en las formas erosivas del Barbantiño está regulado, por tanto, mediante una dinámica de retroalimentación positiva (y auto-replicación) entre los planos de apertura de superficie y fondo al mismo tiempo que progresan los procesos de ahondamiento.

Tabla 3. Matriz de correlaciones por rangos (Spearman, p-valor <0,05)

	P	S1	S2	F1	F2
P		0,902	0,833	0,854	0,723
S1	0,902		0,898	0,971	0,779
S2	0,833	0,898		0,888	0,910
F1	0,854	0,971	0,888		0,826
F2	0,723	0,779	0,910	0,826	

Eje mayor y menor de apertura: S1 y S2, en superficie; F1 y F2, en fondo. P, profundidad máxima del eje vertical.

El sentido y el grado de asociación que muestran las correlaciones obtenidas es similar al de los resultados de

estudios previos realizados en tramos del río Miño y del río Loña, revelando que la profundidad máxima (coeficientes >0.8 con S1, S2 y F1) y de los índices morfométricos de apertura son variables clave en la caracterización de las formas erosivas.

Clasificación de las Formas

Considerando las relaciones dimensionales diferenciadas en las formas erosivas inventariadas (Tabla 4) en el cauce rocoso del río Barbantiño existen marmitas fluviales en estado de crecimiento junto con surcos o gubiazos (S1=S2>P, S1>S2>P), y marmitas fluviales en diverso estado de desarrollo. En el último grupo de casos mencionados (S1>P>S2, S1=P>S2, P>S1≥S2) el incremento de la profundidad de las cavidades (con valores máximos de 86 cm, 120 cm y 270 cm respectivamente) se acompaña de la pérdida de circularidad y simetría en los planos de apertura de superficie y de fondo, al tiempo que tiene lugar el rebajamiento de las paredes. En la muestra de formas, por tanto, se identifican a partir de estos criterios cavidades relacionadas con procesos erosivos estables o migrantes que generan coalescencias y rupturas de simetría representativas de la dinámica de los ríos sobre roca (e.g. ALEXANDER, 1932; IVES, 1948; TSCHANG, 1964). De particular importancia resulta la diferenciación de las marmitas fluviales que presentan valores críticos en sus relaciones dimensionales (LORENC; MUÑOZ BARCO; SAAVEDRA ALONSO, 1994 y 1995) cuando su profundidad equipara o supera el valor de los ejes de apertura, indicando un estado avanzado de crecimiento que implica secuencias erosivas antiguas en el cauce rocoso.

Tabla 4. Relaciones dimensionales en las formas inventariadas

Relación dimensional	Número de casos	Mediana ICS	Mediana ICF	Mediana P
S1=S2>P	17	1.1	1.0	3
S1>S2>P	22	2.3	2.9	12
S1>P>S2	8	1.3	1.6	83
S1=P>S2	3	1.5	1.3	83
P>S1≥S2	10	2.0	1.3	170

Eje mayor y menor de apertura: S1 y S2, en superficie. ICS (S1/S2), ICF (F1/F2). P, profundidad máxima del eje vertical.

En función de las variables analizadas y los resultados del análisis estadístico, el estado de las formas inventariadas en el río Barbantiño permite caracterizar tres grupos principales asociados a procesos erosivos en ríos sobre roca. Los resultados diferencian formas de desarrollo incipiente (grupo AR), surcos y gubiazos (grupo B) y marmitas fluviales evolucionadas (grupo A). El grupo A incluye marmitas que reflejan los procesos de erosión vertical desde la superficie y de erosión lateral en el fondo, formas muy excavadas, asimétricas, con valores de P que superan 80 cm; el grupo B corresponde a formas muy alargadas (gubiazos y surcos) mientras que el grupo AR comprende formas incipientes en estado inicial de crecimiento. En consecuencia, los procesos erosivos son activos en la actualidad si bien cabe señalar la existencia de formas heredadas, con alto valor patrimonial por lo que respecta al legado de la erosión fluvial.

Tal como demuestran los resultados del análisis morfológico y estadístico, acompañando el incremento del ahondamiento de las cavidades, en las secuencias iniciales de desarrollo de las marmitas los planos de apertura son redondeados y en las secuencias más avanzadas poseen una geometría elíptica. La variable P constituye el geo-indicador principal de su relación con las secuencias de incisión fluvial (Tabla 5), presentando diversas configuraciones que reflejan dinámicas de coalescencia, truncado y/o colapso como se ha observado en ríos sobre roca en Galicia (ÁLVAREZ-VÁZQUEZ; DE UÑA-ÁLVAREZ, 2017a) y otros ríos sobre roca de la Península Ibérica (NEMEC; LORENC; SAAVEDRA ALONSO, 1982; ORTEGA; GÓMEZ-HERAS; PÉREZ-LÓPEZ; WOHL, 2014; ORTEGA-BECERRIL; GÓMEZ-HERAS; FORT.; WOHL, 2017).

Tabla 5. Caracterización de las formas inventariadas

Grupo	n	% casos	Máximo ICS	Intervalo P
Río Barbantiño				
AR	15	28	1.1	2-11
B	19	37	4.0	2-27
A	26	35	1.2	12-270
*Río Miño**				
AR	23	11	1.1	2-17
B	134	62	5.0	2-28
A	59	27	1.4	16-240

Valores en cm, para n=número de casos. Intervalos de ICS (S1/S2), y de P, profundidad máxima del eje vertical. Datos de *Álvarez-Vázquez y De Uña-Álvarez, 2017a.

En la cuenca media del río Loña (DE UÑA-ÁLVAREZ; VIDAL-ROMANÍ; RODRÍGUEZ MARTÍNEZ-CONDE, 2009; ÁLVAREZ-VÁZQUEZ; DE UÑA-ÁLVAREZ, 2021) antes de entrar en el tramo urbano del río Miño en Ourense, también están presentes estas categorías de formas erosivas, si bien con mayor rango dimensional. Utilizando como valores de referencia los estadísticos robustos obtenidos para los registros de P en el río Barbantiño y para diversas muestras inventariadas en la cuenca del río Miño (Tabla 6), pueden distinguirse, además, secuencias de estado para formas erosivas con diverso grado de evolución. Las marmitas fluviales con mayor grado de desarrollo (evolucionadas y muy evolucionadas) representan el principal legado del patrimonio geomorfológico en el río Barbantiño.

Tabla 6. Umbrales de estado en las formas erosivas (variable P en cm)

Medida estadística	Umbral de desarrollo	Río Barbantiño	Río Loña[1]
Percentil 10	inicial	2	10

Percentil 25	incipiente	4	21
Percentil 50	moderado	17	59
Percentil 75	avanzado	82	110
Percentil 90	evolucionado	124	170
Percentil 95	muy evolucionado	185	230

[1]Aguas arriba del embalse de Cachamuiña (460 m s.n.m.)

4 Consideraciones Finales

El inventario y la caracterización de las formas erosivas fluviales en los ríos sobre roca contribuye al conocimiento de la dinámica fluvial y aporta información significativa para su consideración no solo como bienes del patrimonio geomorfológico sino también como geo-recursos territoriales. En el caso del río Barbantiño, las formas tipo marmita y tipo surco poseen un amplio conjunto de valores para el conocimiento científico, los usos educativos y el fomento de las actividades de ocio. Las formas erosivas presentan un especial interés en el ámbito local, donde son poco conocidas y, en consecuencia, poco apreciadas por el público general. Futuras investigaciones continuarán el proceso de inventario y caracterización de las formas en tramos de la red de drenaje de la cuenca del Miño, con la finalidad de avanzar en su definición como legado geomorfológico, su valoración para la gestión sostenible a través de diversos usos y su promoción como recursos en el marco de las políticas de ordenación del territorio.

REFERENCIAS

ALEXANDER, H.S. Pothole erosion. **Journal of Geology**, v. 40, n. 4, p. 305-337, 1932. Disponible en: https://doi.org/10.1086/623954

ÁLVAREZ-VAZQUEZ, M.A.; DE UÑA-ÁLVAREZ, E. Recursos Geomorfológicos: Evolución Morfológica de las Marmitas de Erosión en el Miño Medio. En: SIMPÓSIO IBÉRICO SOBRE A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MINHO, VII, 2014, Vila Nova de Cerveira. **Actas**, 2015, p. 1-5. Disponible en: https://aquamuseu.cm-vncerveira.pt/cmvncerveira/uploads/document/file/807/VII_simposio.pdf

ÁLVAREZ-VAZQUEZ, M.A.; DE UÑA-ÁLVAREZ, E. Growth of sculpted forms in bedrock channels (Miño River, northwest Spain). **Current Science**, v. 112, n. 5, p. 996-1002, 2017a. Disponible en: https://doi.org/10.18520/cs/v112/i05/996-1002

ÁLVAREZ-VAZQUEZ, M.A.; DE UÑA-ÁLVAREZ, E. Inventory and Assessment of Fluvial Potholes to Promote Geoheritage Sustainability (Miño River, NW Spain). **Geoheritage**, v. 9, n. 4, p. 549-570, 2017b. Disponible en: https://doi.org/10.1007/s12371-016-0213-0

ÁLVAREZ-VAZQUEZ, M.A.; DE UÑA-ÁLVAREZ, E. An exploratory study to test sediments trapped by potholes in Bedrock Rivers as environmental indicators (NW Iberian Massif). **Cuaternario y Geomorfología**, v. 35, n. 1/2, p. 59-77, 2021. Disponible en: https://doi.org/10.17735/cyg.v35i1-2.89054

BRILHA, J. Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites: A review. **Geoheritage**, v. 8, n. 2, p. 119–134, 2016. Disponible en: https://doi.org/10.1007/s12371-014-0139-3

BRILHA, J.; GRAY, M.; PEREIRA, D.I.; PEREIRA, P. Geodiversity: An integrative review as a contribution to the sustainable management of the whole of nature. **Environmental Science and Policy**, v. 86, p. 19-28, 2018. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.05.001

BRILHA, J.; GRAY, M.; MATTHEWS, J.; ZWOLIŃSKI, Z. (2021) International Geodiversity Day: developing a global outreach initiative. In: LOZANO, G.; LUENGO, J.; CABRERA, A.; VEGAS, J. (Ed.). **Building connections for global geoconservation**. Madrid: Ministerio de Ciencia e Innovación, Instituto Geológico y Minero de España. 2021. p. 131-132.

CAMINOS NATURALES DE ESPAÑA. **Noroeste 16**. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Programa Nacional de Caminos Naturales. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/caminos-naturales/

CARCAVILLA, L.; PALACIO, J. **Proyecto Geosites: la aportación española al patrimonio geológico mundial**. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 2019.

CARTA DE LA TIERRA. **La Carta de la Tierra**, 2000. The Earth Charter. Disponible en: https://cartadelatierra.org/lea-la-carta-de-la-tierra/descargar-la-carta/

CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA MIÑO-SIL. **Documentos del Plan Hidrológico 2016-2021**. Disponible en: https://www.chminosil.es/es/chms/planificacionhidrologica/plan-hidrologico-2015-2021-vigente-rd-1-2016

CORATZA, P.; HOBLÉA, F. The Specificities of Geomorphological Heritage. In: REYNARD, E.; BRILHA, J. (Ed.). **Geoheritage**. Chennai: Elsevier, 2018, p. 87-106.

COUNCIL OF EUROPE. **Recommendation Rec (2004)3 on conservation of the geological heritage and areas of special geological interest.** Disponible en: https://search.coe.int/cm/Pages/result_details.aspx?ObjectID=09000016805dd15a.

CROFTS, R. Putting geoheritage conservation on all agendas. **Geoheritage**, v. 10, p. 231-238, 2018. Disponible en: https://doi.org/10.1007/s12371-017-0239-y

DHALI, M.K. Dynamic evolution of riverbed potholes in the granitic bedrock of Chota Nagpur Plateau, middle part of Subarnarekha River basin, India. **Journal of Hydrology**, v. 571, p. 819-836, 2019. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.022

DECLARACIÓN DE DIGNE. **Memoires de la Societé Geologique de France**, Nouvelle Serie n. 1165, 1991. Disponible en: https://www.igme.es/patrimonio/links/declaracionDigne.htm

DECLARACIÓN DE REYKJAVIK. **The Declaration of Reykjavik, approved at the eighth International ProGEO Symposium,** 2015. Disponible en: http://www.progeo.ngo/downloads/PROGEO_news_2015_3.pdf

DE UÑA-ÁLVAREZ, E.; ÁLVAREZ-VÁZQUEZ, M.A. Geo-recursos para la sostenibilidad del territorio. Evaluación preliminar del interés de las marmitas fluviales (Río Miño, Península Ibérica). En: UNIVERSIDADE DO MINHO; UMDGEO-DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA (Ed.). **A Geografia Física e a Gestão de Territórios Resilientes e Sustentáveis**. Guimarães: Publicações da Universidade do Minho, 2016. p. 687-696.

DE UÑA-ÁLVAREZ, E.; VIDAL ROMANÍ, J.R.; RODRÍGUEZ MARTÍNEZ-CONDE, R. Erosive Forms in River Systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE IN MEMORY OF PROFESSOR JOHN B. THORNES, 2009, Murcia. **Advances in studies on desertification**, 2009, Universidad de Murcia, p. 465-468.

DE UÑA-ÁLVAREZ, E.; ÁLVAREZ-VÁZQUEZ, M.A.; RODRÍGUEZ MARTÍNEZ-CONDE, R. Tipología de formas graníticas en el tramo medio del rio Miño (Ourense, Galicia, NW del Macizo Ibérico). En: SCHNABEL, S.; GÓMEZ GUTIÉRREZ, A. (Ed.). **Avances de la Geomorfología en España 2012-2014**. Cáceres: Sociedad Española de Geomorfología, 2014. p. 434-437.

DE UÑA-ÁLVAREZ, E.; ÁLVAREZ-VÁZQUEZ, M.A.; PREGO, R. Caracterización de elementos traza en sedimentos atrapados por marmitas fluviales. Resultados preliminares en el caso de un pequeño río sobre roca en la cuenca del Miño (Noroeste de España). En: SIMPÓSIO IBÉRICO SOBRE A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MINHO, IX, 2018, Vila Nova de Cerveira. **Actas**, 2018, p. 18-24. Disponible en: https://aquamuseu.cm-vncerveira.pt/cmvncerveira/uploads/document/file/3959/Livro_Atas_Dig.pdf

GOODE, J.R.; WOHL, E.E. Substrate Controls on the Longitudinal Profile of Bedrock Channels: Implications for Reach-Scale Roughness. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 115, n. F3, p. 1-14, 2010. Disponible en: https://doi.org/10.1029/2008JF001188

GORDON, J. E. Geoheritage, geotourism and the cultural landscape: Enhancing the visitor experience and promoting geoconservation. **Geosciences**, v. 8, n. 4, 136, 2018. Disponible en: https://doi.org/10.3390/geosciences8040136

GRANDGIRARD, V. Géomorphologie et gestion du patrimoine naturel. La mémoire de la Terre est notre mémoire. **Geographica Helvetica**, v. 52, p. 47-56, 1997. Disponible en: https://doi.org/10.5194/gh-52-47-1997

GRAY, M. **Geodiversity: Valuing and conserving abiotic nature**. Second ed. Chichester: Wiley-Blackwell, 2013.

GRAY, M. Geodiversity, geoheritage and geoconservation for society. **International Journal of Geoheritage and Parks**, v. 7, n.4, p. 226–236, 2019. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2019.11.001

IGME. **Memoria del mapa geológico de España, Ourense/Verín**. Madrid: Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1989.

IUCN. **Resolution 4 040: Conservation of geodiversity and geological heritage.** Gland: Resolutions and Recommendations adopted at the fourth IUCN World Conservation Congress, 2008. Disponible en: https://portals.iucn.org/library/node/44190

IVES, R, L. Plunge pools, potholes and related features. **Rock and Minerals**, v. 23, n. 1, p. 3-10, 1948.

LORENC, M.W.; MUÑOZ BARCO, P.; SAAVEDRA ALONSO, J. The evolution of potholes in granite bedrock, W Spain. **Catena**, v. 22, n. 4, p. 265-274, 1994. Disponible en: https://doi.org/10.1016/0341-8162(94)90037-X

LORENC, M.W.; MUÑOZ BARCO, P.; SAAVEDRA ALONSO, J. Marmitas de gigante en el valle del río Jerte como ejemplo de erosión fluvial intensiva por remolinos e influencia tectónica en su distribución y morfología. **Cuaternario y Geomorfología**, v. 9, n. 1/2, p. 17-26, 1995. Disponible en: http://tierra.rediris.es/CuaternarioyGeomorfologia/images/vol9_1/cuaternario9(1-2)_02-.pdf

MIGOŃ, P. Granite Landscapes, Geodiversity and Geoheritage - Global context. **Heritage**, v. 4, n. 1, p. 198-219, 2021. Disponible en: https://doi.org/10.3390/heritage40100124

NEMEC, W.; LORENC, M.W.; SAAVEDRA ALONSO, J. Potholed granite terrace in the río Salor valley, western Spain: a study of bedrock erosion by floods. **Tecniterrae**, v. 9, n. 50, p. 6-21, 1982.

ORTEGA, J.A.; DURÁN, J.J. (ed.) **Patrimonio geológico: Los ríos en roca de la Península Ibérica.** Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 2010.

ORTEGA, J.A.; GOMEZ-HERAS, M.; PEREZ-LOPEZ, R.; WOHL, E.E. Multiscale Structural and Lithologic Controls in the Development of Stream Potholes on Granite Bedrock Rivers. **Geomorphology**, v. 204, n. 1, p. 588-598, 2014. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.09.005

ORTEGA-BECERRIL J. A.; GÓMEZ-HERAS, M.; FORT, R.; WOHL, E.E. How does anisotropy in bedrock river granitic outcrops influence pothole genesis and development? **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 42, n. 6, p. 956-968, 2017. Disponible en: https://doi.org/10.1002/esp.4054

PANIZZA, M. Geomorphosites: concepts, methods and examples of geomorphological survey. **Chinese Science Bulletin**, v. 46, p. 4-6, 2001. Disponible en: https://doi.org/10.1007/BF03187227

PELLETIER, J.D.; SWEENEY, K.E.; ROERING, J.J.; FINNEGAN, N.J. Controls on the Geometry of Potholes in Bedrock Channels. **Geophysical Research Letters**, v. 42, n. 3, p. 797-803, 2015. Disponible en: https://doi.org/10.1002/2014GL062900

RAMIL-REGO, P. (coord.). **Plan Director da Rede Natura 2000 de Galicia. Anexo I. Patrimonio natural e Biodiversidade**. Santiago de Compostela: Xunta de Galicia, 2012.

REYNARD, E. Géomorphosites et paysages. **Géomorphologie: relief, processus, environment**, v. 11, n. 3, p. 181-188, 2005. Disponible en: https://doi.org/10.4000/geomorphologie.338

RICHARDSON, K.; CARLING, P.A. **A Typology of Sculpted Forms in Open Bedrock Channels**. Boulder: Geological Society of America, 2005.

SHARPLES, C. A. **Methodology for the Identification of Significant Landforms and Geological Sites for Geoconservation Purposes**. Tasmania: Report to the Forestry Commission, 1993.

SPRINGER, G.S.; TOOTH, S.; WOHL, E.E. Theoretical Modelling of Stream Potholes Based upon Empirical Observations from the Orange River, Republic of South Africa. **Geomorphology**, n. 82, p. 160-176, 2006. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.09.023

SCOTT, D.N.; WOHL, E.E. Bedrock fracture influences on geomorphic process and form across process domains and scales. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 44, p. 27-45, 2019. Disponible en: https://doi.org/10.1002/esp.4473

TINKLER, K.J.; WOHL, E.E. (ed.) **Rivers over Rock: Fluvial Processes in Bedrock Channels**. Washington: American Geophysical Union, 1998.

TSCHANG, H.I. The Fluvial Potholes of Hong Kong. **Chung Chi Journal**, v. 3, n. 2, p. 118-131, 1964.

WHIPPLE, K.X.; HANCOCK, G.S.; ANDERSON, R.S. River incision into Bedrock: Mechanics and relative efficacy of plucking, abrasion, and cavitation. **GSA Bulletin**, v. 112, n. 3, p. 490-503, 2000. Disponible en: https://doi.org/10.1130/0016-7606(2000)112<490:RIIBMA>2.0.CO;2

WHIPPLE, K.X.; DIBIASE, R.A.; CROSBY, B.T. Bedrock Rivers. In: SHRODER, J. (Ed.). **Treatise on Geomorphology**. San Diego: Academic Press, 2013. p. 550-573.