

J. HORACIO GARCÍA<sup>a,b</sup>  
AUGUSTO PÉREZ-ALBERTI<sup>c</sup>

## APROXIMACIÓN A LA IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE RÍOS EN ROCA A ESCALA REGIONAL MEDIANTE VARIABLES TOPO- GEOMORFOLÓGICAS (GALICIA, NOROESTE DE LA PENÍNSULA IBÉRICA)

### RESUMEN

Las clasificaciones de ríos son un procedimiento técnico de utilidad para simplificar la realidad y discriminar tipos con características homogéneas. El ensayo experimental que se presenta en este trabajo, desarrollado sobre la red fluvial de Galicia, tiene el objetivo de combinar sistemas de información geográfica y tres variables topo-geomorfológicas (litología, pendiente y densidad de fracturas) para identificar potenciales tramos de ríos en roca. El método aplicado se estructuró en cuatro etapas secuenciales: (i) inventario de tramos en roca, (ii) caracterización de los tramos inventariados, (iii) tipificación de la red de drenaje y (iv) validación del método aplicado. Los resultados obtenidos arrojan una primera cartografía de probabilidad de presencia de ríos en roca para más de 30.000 km de cauces. Un 37 % de la red tiene una probabilidad alta de ser río en roca y un 21 % una probabilidad baja o nula. El 42 % restante se mueve en una probabilidad media. Conocer la distribución espacial de este tipo de ríos debería ser de utilidad para los organismos de cuenca y el establecimiento de protocolos de actuación que consideren, primero, las características de los ríos en roca en la gestión de las masas de

---

a Departamento de Geografía, Universidad de Santiago de Compostela. Praza da Universidade, 1. 15703 Santiago de Compostela, A Coruña. horacio.garcia@usc.es. <https://orcid.org/0000-0002-3116-015X>.

b Laboratorio de Tecnología Ambiental, Instituto de Investigaciones Tecnológicas, Universidad de Santiago de Compostela. Campus Vida, s/n. 15782 Santiago de Compostela, A Coruña.

c Departamento de Edafología y Química Agrícola, Facultad de Biología. Campus Vida, s/n. 15782 Santiago de Compostela, A Coruña. <https://orcid.org/0000-0001-7428-4622>.

Fecha de recepción: 03-08-2021. Fecha de aceptación: 29-12-2021.

agua por su singularidad y repercusión en la dinámica del río y, segundo, el florecimiento de figuras de protección basadas en la geodiversidad.

PALABRAS CLAVE: geomorfología fluvial; clasificación fluvial; SIG; planificación.

## APPROACH FOR THE IDENTIFICATION AND CHARACTERIZATION OF BEDROCK RIVERS ON A REGIONAL SCALE USING TOPO-GEOMORPHOLOGICAL VARIABLES (GALICIA, NW IBERIAN PENINSULA)

### ABSTRACT

River classifications are a useful technical procedure to simplify reality and discriminate into types with homogeneous characteristics. The experimental test presented, developed on the Galician fluvial network, try to combine Geographic Information Systems and three geomorphological variables (lithology, slope, and density of fractures) to identify potential reaches of rivers over rock. The method used was structured in four sequential stages: (i) inventory of bedrock river sites, (ii) characterization of the inventoried sites, (iii) typification of the drainage network and (iv) method validation. The results achieved provide a first mapping to know the probability to exist a bedrock river (reach) for more than 30.000 km of channels. 37% of the network has a high probability of being a bedrock river and 21% a low or no probability. The remaining 42% move at medium probability. Spatial distribution by type of rivers should be useful for basin authorities and that their protocols which consider, firstly, the characteristics of bedrock rivers due to their singularity and repercussion on the dynamics of the river, and, secondly, the flourishing of rules to protect the geodiversity.

KEYWORDS: fluvial geomorphology; river classification; GIS; land planning.

### INTRODUCCIÓN

Los ríos en roca se distinguen de los ríos aluviales por presentar un porcentaje de roca expuesta superior al 50 % (Tinkler & Wohl, 1998), aunque otros autores hablan de porcentajes más elevados (Montgomery & Buffington, 1997). Bajo un marco teórico, los ríos en roca son el opuesto a los ríos coluviales, caracterizados estos últimos por una capacidad de transporte limitada y un elevado aporte de sedimentos (Montgomery & Buffington, 1997). Entre ambos modelos de ríos aparecen los de tipo aluvial, definidos por presentar material no cohesivo que se desplaza libremente.

En términos de procesos de dinámica sedimentaria, en los ríos en roca (en adelante, ReR), erosión y transporte son generalmente más importantes que producción (i. e., capacidad de un río para generar sedimentos por meteorización y erosión del lecho) y almacenamiento (i. e., escasa presencia de sedimentos) (Wohl, 2015), mientras que, por el contrario, en los ríos aluviales, producción y almacenamiento están más presentes que erosión y transporte. A diferencia de ríos totalmente aluviales, la morfología de aquellos horadados en roca refleja las interacciones entre procesos erosivos y la resistencia del sustrato por el que transitan. Sobre estas concepciones teóricas se alternan multitud de

situaciones intermedias derivadas de las diversas variedades energéticas y granulométricas de los ReR (Ortega, 2010) o, por ejemplo, cómo durante las crecidas erosión y transporte dominan sobre producción y almacenamiento en los ríos aluviales (Whipple et al., 2013).

Las singularidades geomorfológicas de los ReR los convierten en ríos con un elevado valor ecológico, escénico, paisajístico y de interés recreativo. A diferencia de los ríos aluviales, los ReR han sido a nivel global los grandes olvidados de la geomorfología fluvial (Garzón, 2010). En el caso de Galicia, son todavía escasos los trabajos tanto sobre dinámica geomorfológica fluvial como sobre ríos en roca, aunque destacan algunos de tipo descriptivo (Pérez-Alberti, 1982, 1985), otros sobre formas graníticas (Álvarez-Vázquez & De Uña-Álvarez, 2017; De Uña-Álvarez et al., 2014, 2009), u otros que incluyen los ReR como parte de procesos de clasificación (García, 2014). La obra referencia de los ríos en roca de la Península Ibérica (Ortega & Durán, 2010) no incluye Galicia, posiblemente por esta falta de estudios sobre los ReR a pesar de contar con una representación rica y variada. Este vacío, no subsanado en la última década, debe suponer un reto y una necesidad a la que este artículo trata de contribuir.

El objetivo del estudio, en consecuencia, consiste en aplicar una metodología apoyada en sistemas de información geográfica (SIG) que permita discriminar entre ríos potencialmente en roca de los que potencialmente no lo son. La interpretación de las características de los ReR es muy dependiente de la escala (Gómez-Heras et al., 2019), pudiéndose estudiar desde una microescala (milimétrica-centimétrica) a otra macro (de metros  $10^0$ - $10^2$  a kilómetros  $10^2$ - $10^4$  km<sup>2</sup>). En este trabajo nos centramos en una tipificación de la red de drenaje de Galicia, por lo tanto, en unos valores que se podrían situar entre  $10^2$ - $10^3$  m a tenor del material cartográfico empleado para el desarrollo metodológico (ver sección correspondiente).

A lo largo del estudio se abre también una discusión sobre la importancia de conocer dónde se ubican los ReR, por la repercusión que tienen en la dinámica geomorfológica de un río en su recorrido longitudinal (Goldrick & Bishop, 1995). Pero también por la necesidad de que sean considerados desde los planes hidrológicos de cuenca por su singularidad y repercusión en la dinámica del río. Esto ayudará a un mejor manejo y gestión de los ReR, por cuanto se trata de tramos muy singulares donde los cambios son difícilmente reversibles, y en los que, además, los tiempos de respuesta son diferentes a los sistemas aluviales convencionales.

## ÁREA DE ESTUDIO

Galicia está situada en el noroeste de la Península Ibérica (ver figura 2). Su relieve se caracteriza por una topografía contrastada entre áreas dominadas por la horizontalidad y otras en las que la verticalidad de las laderas es dominante. Este hecho se debe a la existencia de una amplia red fluvial que corta antiguos niveles de aplanamiento, lo que ha dado lugar a numerosos valles que se han encajado en el terreno debido a intensos procesos de antecedencia, puestos en marcha desde mediados del Cenozoico hasta los inicios del Cuaternario, pero que continúan en la actualidad. De este modo, superficies aplanadas, depresiones tectónicas y valles fluviales se encadenan en el territorio, desde la costa hasta los más de 2.000 m que se alcanzan en las sierras orientales (Pena Trevinca 2.124 m; Cuiña, 1.998 m).

Litológicamente, domina un substrato rocoso de edad precámbrica, compuesto fundamentalmente por rocas ígneas y metamórficas. Se pueden diferenciar tres amplias bandas que se alargan de norte a sur: la occidental, la central y la oriental. En la primera dominan las rocas graníticas, concretamente los granitos de dos micas y las granodioritas, junto con pequeños afloramientos de gabros. En la segunda, junto a algún pequeño afloramiento de granito de dos micas, sobresale el complejo metamórfico de rocas máficas y ultramáficas de Cabo Ortegal y los esquistos de Ordes. La tercera es el dominio de las rocas metamórficas, caso de las pizarras, gneis y cuarcitas, con pequeños afloramientos de calizas y dolomías. Los materiales se encuentran intensamente fracturados por un amplio sistema de discontinuidades que siguen direcciones NE-SO, NO-SE y O-E. Las fracturas se relacionan con la orogenia varisca y con la alpina, y condicionan de manera evidente el sistema de drenaje fluvial (Pérez-Alberti, 1993).

La situación de Galicia en latitudes medias propicia la existencia de evidentes contrastes climáticos entre la costa, en donde se pueden superar los 2.500 mm de precipitación anual, y el interior, en donde existen sectores que no llegan a los 800 mm. Las temperaturas oscilan entre los 15 °C de media en el interior, especialmente en el valle del Sil, y los 13 °C de la costa. Otro dato significativo es la oscilación térmica, que se sitúa en los 9 °C en la costa y en los 15 °C en las comarcas del sudeste. Todo ello provoca importantes cambios en la existencia de agua en las cuencas, y destaca una fuerte aridez estival en la cuenca del Sil.

La red hidrográfica está dominada por un modelo dendrítico, pero con alguna connotación subdendrítica o incluso áreas con presencia de modelos rectangulares. En cuanto al caudal, el flujo superficial está presente todo el año sin, por lo general, la presencia de un periodo de estiaje tan profundo como para llegar a secar los cauces. El régimen hidrológico de la mayor parte de los ríos de Galicia se caracteriza por un intenso periodo de aguas altas en otoño e invierno y aguas bajas en verano (tipo de régimen pluvial oceánico, a excepción de las áreas más montañosas, que tienen cierta innivación). El prototipo de curva representativa del régimen hidrológico presenta una fase de aguas altas en enero-febrero, seguido de un leve segundo rebrote a finales de abril-mayo, que sirve para frenar ligeramente el lánguido descenso de caudal que se experimenta durante la primavera. El caudal alcanza su punto más crítico en los meses de agosto y septiembre. A partir de la primera quincena de diciembre se llega, generalmente, al módulo medio, valor que se mantiene hasta, aproximadamente, el mes de mayo (Rodríguez, 2001).

## MÉTODO Y DATOS

### *Procedimiento de trabajo*

#### Marco conceptual

Las formas del terreno generadas por los sistemas fluviales son consecuencia directa de los “elementos control”: estructura (tectónica + litología) y clima. Su combinación con el tiempo y la acción antrópica han ido configurando lo que se podría denominar como “topografía fluvial” (i. e., formas del relieve características, pendiente, geometría del valle). A grandes rasgos, la “topografía fluvial” de los ríos en roca suele responder a paisajes agrestes, encajados y estrechos, con un marcado dominio de la

verticalidad sobre la horizontalidad. Entre litología y topografía hay una estrecha relación, de modo que las formas erosivas que predominan una determinada litología son inherentes a sus características isotrópicas y condiciones climáticas. Se entiende entonces que, ante las mismas condiciones climáticas y estructurales, un paisaje calizo sea muy diferente a un paisaje granítico.

Las condiciones climáticas juegan un importante papel en el desarrollo de las formas fluviales de los ríos en roca. No obstante, para este trabajo, no se considera el clima como una variable generadora de ríos en roca, sino como una variable modeladora que actúa sobre una estructura previamente definida. La génesis de los ríos en roca recae, en consecuencia, sobre la estructura (tectónica + litología). Por tectónica nos referimos a los agentes de la geodinámica interna causantes de la disposición y las dimensiones del paisaje. Es decir, por ejemplo, en la Sierra del Courel, ubicada al sur de la provincia de Lugo, las grandes líneas del relieve, como dirección de los valles y de los interfluvios e inclinación de las laderas, están marcadas por la combinación de pliegues y fracturas (estructura tectónica). La incisión fluvial aprovechó las zonas de debilidad para labrar una intensa red sobre roca.

Desde una perspectiva metodológica, para este trabajo hemos seguido un procedimiento inductivo-deductivo. En una primera etapa (método inductivo), identificamos desde gabinete y campo tramos rocosos según el criterio fijado por Tinkler & Wohl (1998) y analizamos sus características para extraer los descriptores geomorfológicos preponderantes (figura 1). En una segunda etapa (procedimiento deductivo), se aplicaron los descriptores previamente definidos para predecir potenciales tramos de ReR.



Figura 1. Ejemplo de diversos tramos de río en roca (ReR) en Galicia: (1) río Sor, (2) río Lor, (3) río de Vilameá, (4) río Homem (Portugal, en frontera con Galicia), (5) río de Tronceda y (6) río Guilfonso.

## Flujo de trabajo

El procedimiento de trabajo está estructurado en cuatro etapas, con un orden de ejecución secuencial.

1. Inventario de tramos en roca. El procedimiento consistió en un vaciado de sitios potenciales a partir de diversas fuentes bibliográficas (García, 2014; Muñiz de las Cuevas & Fontenla, 2009; Muñiz de las Cuevas, 2001, 2006) y digitales (Frade, 2021). Este conjunto de fuentes se basa, principalmente, en catálogos deportivos de descenso de barrancos y guías de turismo de naturaleza. También se hizo un filtrado en la página web Wikiloc (*mashup* para almacenar y compartir rutas georreferenciadas) empleando el término “fervenza” (“cascada” en idioma gallego) y “poza(s)”. Posteriormente, se consideraron como ReR aquellos sitios que cumplieron alguna de las siguientes condiciones: (i) identificarse nítidamente a partir de las ortofotos de máxima actualidad del Instituto Geográfico Nacional (puntualmente con apoyo en Google Earth), (ii) disponer de imágenes *in situ* del sitio que se verifique que es un sector en roca según los criterios científicos establecidos para su designación, y (iii) por conocimiento propio de los autores y/o visitas de campo. Los sitios seleccionados van desde *knickpoints* a otros con una longitud de tramo en roca superior a los 1.000 m.
2. Caracterización de los ReR inventariados. Se emplearon como variables caracterizadoras litología (L), pendiente (P) y densidad de fracturas (F). Según el tipo de dato, las tres variables caracterizadoras son de naturaleza diferente. La variable litológica es de tipo cualitativo nominal (politómica), mientras que pendiente y densidad de fracturas son variables cuantitativas discretas. Para poder medir la relación entre variables, fue necesario convertir las segundas a variables de tipo nominal. A través del algoritmo de agrupación jerárquica de Ward se fijaron grupos (categorías) con características similares para las variables cuantitativas. Posteriormente, por medio de la prueba estadística chi-cuadrado se analizó la relación de dependencia entre las variables, en donde la hipótesis nula ( $H_0$ ) sugiere que las variables son independientes y la hipótesis alternativa ( $H_a$ ) que estas están asociadas (un rechazo de  $H_0$  señala que las variables están asociadas). En último lugar, los grupos salientes fueron relacionados con el tipo litológico mediante tablas de contingencia y análisis de correspondencias.
3. Tipificación de la red de drenaje. Se establecieron tres niveles de probabilidad de presencia de ReR (alta, media, baja). Se consideró como probabilidad alta al grado de asociación más intenso recogido en el análisis de componentes múltiple realizado. La probabilidad baja se asoció a las categorías litológicas no presentes en los ReR seleccionados, independientemente de su pendiente o densidad de fracturación. Los tramos con probabilidad media se obtuvieron por exclusión. Mediante la intersección espacial de la red de drenaje sobre las tres variables se pudo saber para cada kilómetro de río su tipo litológico, pendiente y densidad de fracturación, los cuales fueron reclasificados siguiendo el criterio de probabilidad establecido.
4. Validación del método. La tipificación de la red de drenaje se validó analizando los resultados obtenidos para el Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas do Courel.

El Geoparque alberga una amplia red de drenaje de ReR, lo que ha servido para fijar una comparativa de calidad.

### Datos

#### Modelo digital del terreno

Se confeccionó un modelo digital del terreno (MDT)  $5 \times 5$  m para toda el área de estudio mediante la creación de un mosaico con los modelos MDT05 del Instituto Geográfico Nacional (IGN). A partir del MDT05 se obtuvo el producto derivado modelo digital de pendiente (MDP05) en grados. El MDT05 fue redimensionado mediante un procedimiento bilineal a nuevos ráster con tamaño de píxel  $25 \times 25$  m,  $100 \times 100$  m y  $500 \times 500$  m, de los que también se obtuvieron los correspondientes modelos digitales de pendientes (MDP). Las diferentes resoluciones espaciales se emplearon para comparar cuál de ellas es la de uso más adecuado según las finalidades del estudio.

#### Litología

Los datos litológicos utilizados se corresponden con la serie MAGNA del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) a escala 1:50.000. La cartografía original contiene para la zona de estudio trece unidades litológicas clasificadas según diferentes variables (e. g., tipo de roca, edad, grado de permeabilidad, alterabilidad). Los datos fueron suministrados en una capa vectorial SIG.

#### Fracturas

Los datos referidos a fracturas se obtuvieron del mapa geológico del IGME, de manera que aquellas con una dimensión menor a 200 m fueron eliminadas (Pérez-Alberti et al., 2013; De Vicente & Vegas 2009). Posteriormente se cartografiaron nuevas fracturas (García, 2014) a partir del sombreado de los modelos digitales del terreno ASTER y SRTM (para seguir el mismo procedimiento empleado por Pérez-Alberti et al., 2013). Esta identificación se ha ido desarrollando a escala 1:65.000 siguiendo las mallas 1:25.000 del Mapa Topográfico Nacional (MTN25). La unificación de las tres fuentes de fracturas suma un total de  $\sim 19.600$  km, de los cuales el 52 % pertenece al IGME, el 30 % a García (2014) y Pérez-Alberti et al. (2013), y el 18 % a De Vicente & Vegas (2009).

En último lugar, se calculó la densidad de fracturas por kilómetro cuadrado. Para ello, se estimó mediante una operatoria con SIG la densidad de líneas en una vecindad asociada a una circunferencia de  $50 \text{ km}^2$ , lo que supone utilizar un radio de búsqueda de  $\sim 4.000$  m (área circunferencia =  $(50 / \pi)^{1/2} \times 1.000$ ).

#### Red hidrográfica

Se empleó la red hidrográfica oficial del Instituto de Estudios do Territorio (denominado anteriormente SITGA) desarrollada a escala 1:25.000 y en formato vectorial SIG. La red presenta una longitud total de  $\sim 31.000$  km. Los tramos artificializados por embalses fueron eliminados ( $\sim 2$  % del total).

## RESULTADOS

*Cartografía base y acondicionamiento estadístico*

## Localización de ríos en roca (inventariado)

Se localizaron un total de 86 ReR para la zona de estudio según el procedimiento de búsqueda señalado y el cumplimiento de condiciones propuesto para ser ReR (anexo A). Para las características de pendiente y densidad de fracturación se emplearon los 86 ReR, pero 84 para los análisis que incluyen la litología al retirarse los ReR del tipo gabro (rocas máficas y ultramáficas) por su baja representatividad (<3 %) (figura 2). Igualmente, cinco ReR fueron recategorizados a rocas graníticas y metamórficas, cuatro del tipo depósitos detríticos cuaternarios y uno del tipo roca filoniana, al no corresponderse, por cuestiones de escala, con la asignación otorgada por el mapa geológico.

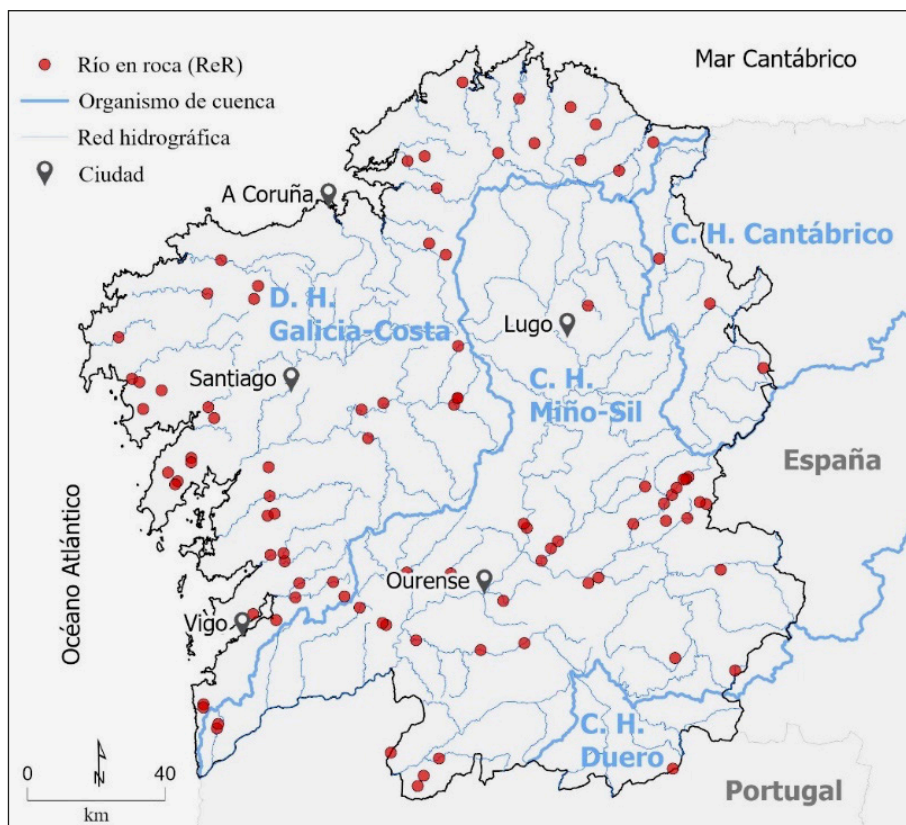


Figura 2. Distribución de los tramos en roca (ReR) localizados en el área de estudio (ver también anexo A).



Atendiendo a aspectos administrativos, la distribución de los ReR por organismo de cuenca arroja que 48 % pertenecen a la Demarcación Hidrográfica Galicia-Costa, 43 % a la Confederación Hidrográfica Miño-Sil y 10 % a otras (Cantábrico, Duero y Limia).

Cartografía de las variables topo-geomorfológicas litología, pendiente y fracturas

En la figura 3 se recoge la cartografía de las variables geomorfológicas empleadas. La litología se simplificó en cinco grandes unidades, mientras que pendiente y densidad de fracturas se presentan clasificadas en tres categorías.

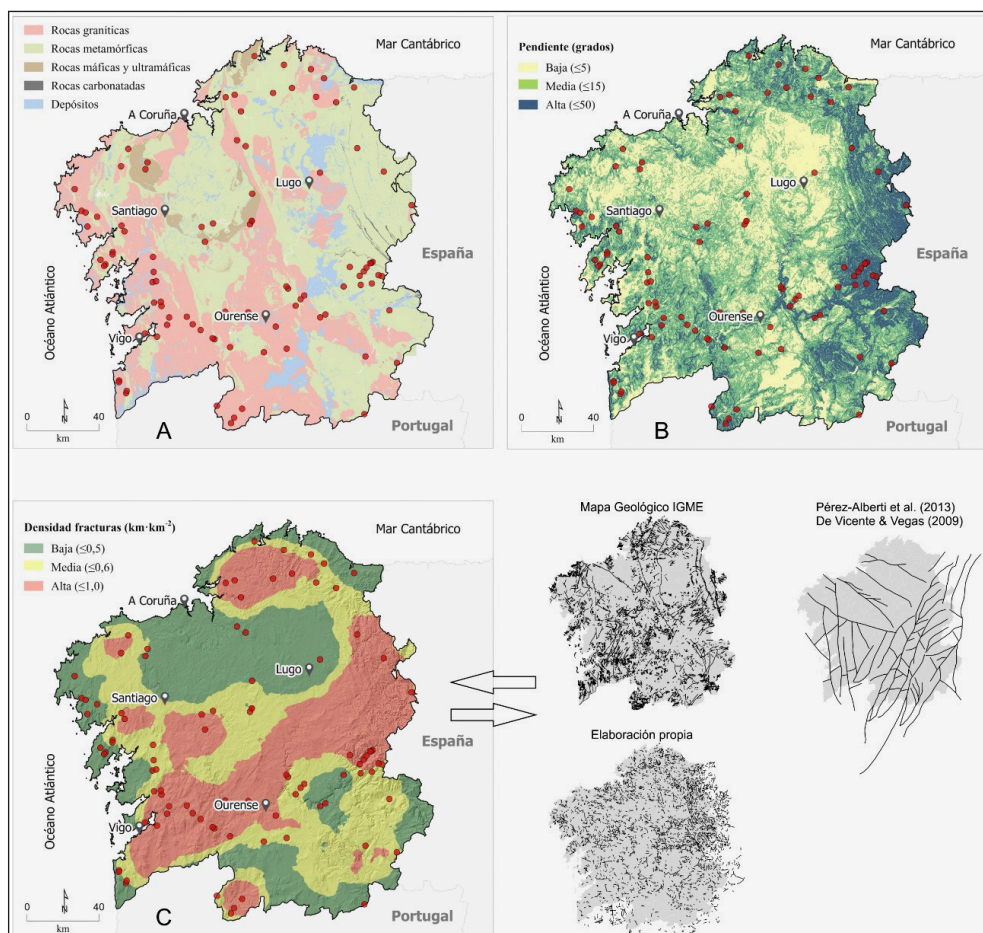


Figura 3. (A) Mapa litológico simplificado, (B) mapa de pendientes reclasificado a tres niveles y (C) mapa de densidad de fracturas desarrollado a partir de la fusión de todas las fracturas inventariadas.

### Categorización de las variables cuantitativas (pendiente y fracturas)

La variable litológica es, como se señaló, de tipo cualitativo nominal. Las variables cuantitativas pendiente y densidad de fracturas se organizaron en cuatro categorías según el análisis de clasificación jerárquica aplicado (figura 4). Cada una de estas categorías presenta unas características de pendiente y densidad de fracturas internamente homogéneas pero claramente diferenciables de las otras.

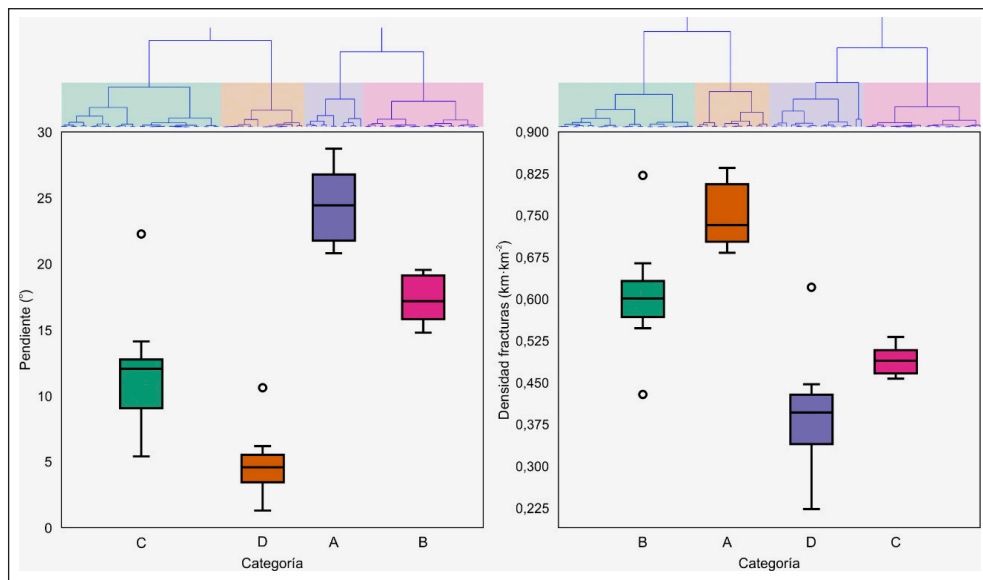


Figura 4. Clasificación y características de los ríos en roca a partir de sus valores de pendiente y densidad de fracturas.

Las categorías A agrupan los valores más elevados y las D, los más bajos (figura 4). Así, por ejemplo, los ReR pertenecientes al grupo A de pendiente presentan un valor medio de  $24^\circ$ , con máximos ligeramente inferiores a  $30^\circ$  y mínimos de  $\sim 21^\circ$ . La categoría D, ubicada en el extremo opuesto, tiene un valor medio de  $5^\circ$ . En el caso de la variable densidad de fracturas, las categorías A y D generan un gradiente que se mueve entre valores medios de  $0,8$  y  $0,4 \text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$ , respectivamente.

### Caracterización de los tramos en roca

#### Análisis exploratorio

En términos litológicos, solo las regiones graníticas y metamórficas tienen presencia de ReR, que a su vez se dividen, por una parte, en granito alcalino y calcoalcalino y, por otra, en gneis, pizarra (y cuarcita) y esquisto (tabla 1). Los ReR graníticos representan el 56 %, perteneciendo el 40 % al tipo

litológico granito alcalino. Los ReR metamórficos están dominados por las pizarras (19 % del total), seguido de los esquistos (13 %) y gneis (12 %).

Tabla 1. Características de los ríos en roca según litología, pendiente y densidad de fracturas. Los tipos A-B-C-D de las variables pendiente y densidad de fracturas se corresponden con los tipos salientes de la clasificación clúster (ver figura 4).

Pendiente (categorías)	Roca granítica (% ReR)		Roca metamórfica (% ReR)			Total
	Granit. alcalino	Granit. calcoalc.	Gneis	Pizarra	Esquisto	
A (alta)	36	0	55	0	9	11
B	38	13	17	17	17	24
C	47	28	6	3	16	32
D (baja)	35	6	18	29	12	17
Total	34	13	10	16	11	
Dens. fracturas (categorías)						
A (alta)	43	0	7	29	21	14
B	34	17	14	21	14	29
C	39	22	13	17	9	23
D (baja)	50	17	11	11	11	18
Total	34	13	10	16	11	

Las pendientes altas (categorías A y B:  $\pm >15^\circ$ ) representan el  $\sim 40\%$  de los ReR, mientras que las zonas con densidades de fracturas altas (categorías A y B:  $\pm >0,6 \text{ km}\cdot\text{km}^2$ ) y bajas acaparan el  $50\%$  cada una (tabla 1). Las categorías intermedias de ambas variables (B y C) son las que recogen el mayor número de ReR.

#### Relación entre variables topo-geomorfológicas

El empleo de tablas de contingencia sirvió para analizar la asociación de las tres variables y determinar que el valor de p (alfa = 0,05) entre P (pendiente) y F (densidad de fracturación) (0,656), P y L (tipo litológico) (0,041) y F y L (0,522) no es significativo. Se cumple, por lo tanto, la hipótesis nula que señala la independencia de las variables, es decir, la densidad de fracturación (F) no es dependiente de la intensidad de la pendiente (P) o el tipo litológico (L) analizado (rocas graníticas y metamórficas), de igual modo que tampoco lo es la pendiente. La prueba no paramétrica de Spearman también apunta en esta dirección para P y F (-0,01).

Es preciso señalar que la relación de independencia entre variables no alude al conjunto del territorio de Galicia, sino que lo hace a las características de los ReR analizados. Estos se encuadran, por lo general, en una “topografía fluvial” concreta. Por ello, es importante poner en contexto los valores de las variables

que caracterizan los ReR con los datos del conjunto de la zona de estudio (P para Galicia: de 0° a 52°, con una media de 8,7°; F de 0,124 km·km<sup>-2</sup> a 1,0024 km·km<sup>-2</sup>, con una media de 0,536 km·km<sup>-2</sup>).

El análisis de correspondencias múltiple entre las tres variables geomorfológicas (figura 5) sugiere que es la variable L la que presenta mayor carga discriminativa, seguida de P y F. Por categorías, se observa una buena asociación de los ReR sobre pizarras con P y F muy elevadas. Los granitoides dominan en ambientes con P y F más bajas. La asociación de los ReR sobre esquistos muestra una aproximación a valores también elevados de P y F. Los ReR sobre gneis no reflejan una correspondencia nítida con algunas de las categorías de P y F.

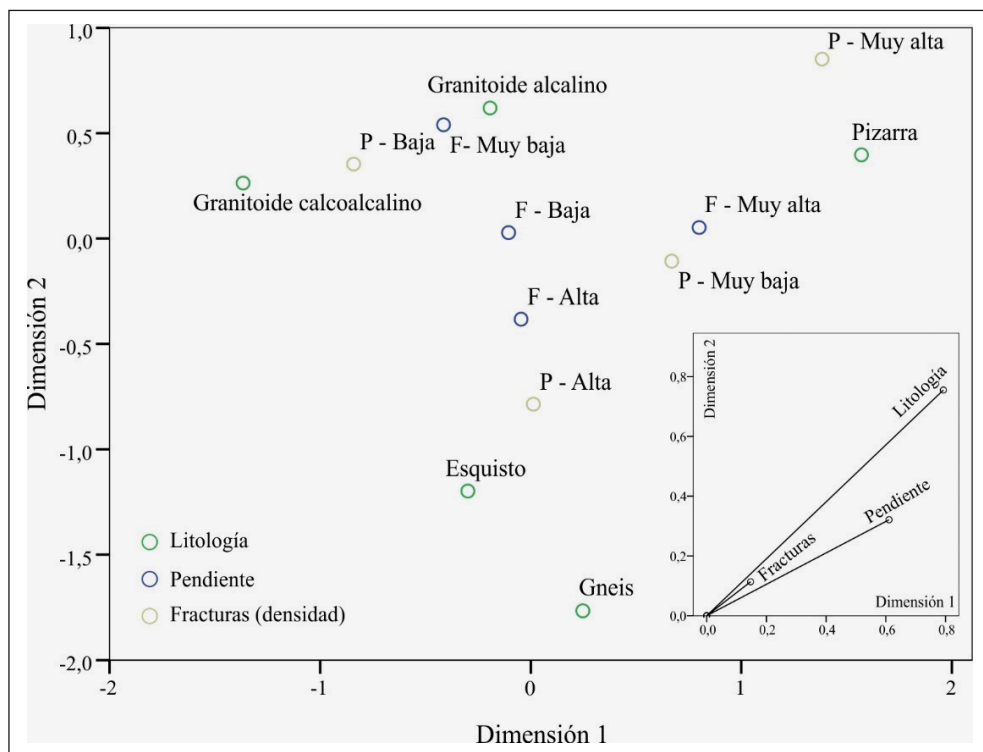


Figura 5. Gráfico de asociación entre las variables topo-geomorfológicas litología (L), pendiente (P) y densidad de fracturas (F). En la parte inferior derecha se muestra un gráfico con las medidas de discriminación para las tres variables.

*Tipificación de la red de drenaje*

La red de drenaje de la zona de estudio se tipificó en tres niveles de probabilidad de presencia de ReR (figura 6). En total, se cartografiaron más de  $31 \cdot 10^3$  km de ríos, de los cuales el 37 % tiene una probabilidad alta de ser un ReR, el 42 % una probabilidad media, y el 21 % una probabilidad baja o nula, especialmente las zonas dominadas por depósitos. Los tres tipos aparecen distribuidos por toda el área de estudio, aunque también se pueden observar áreas con cierta extensión dominadas por algún tipo en concreto. La mayor concentración de tramos con probabilidad alta aparece en el sector oriental del área de estudio.

Los sectores con sedimentos cuaternarios y terciarios no consolidados es poco probable que alberguen ríos en roca (Hayakawa & Oguchi, 2006). Por el contrario, áreas con dominio de batolitos graníticos (por citar un ejemplo) tienen una alta probabilidad de presentar ReR. Es también poco probable que un ReR transite por fondos de valle amplios, aunque puntualmente pueda hacerlo por afloramiento de alguna superficie, ya sea de modo natural como inducida por un impacto antrópico (p. e., Ferrer-Boix & Martín-Vide, 2019).

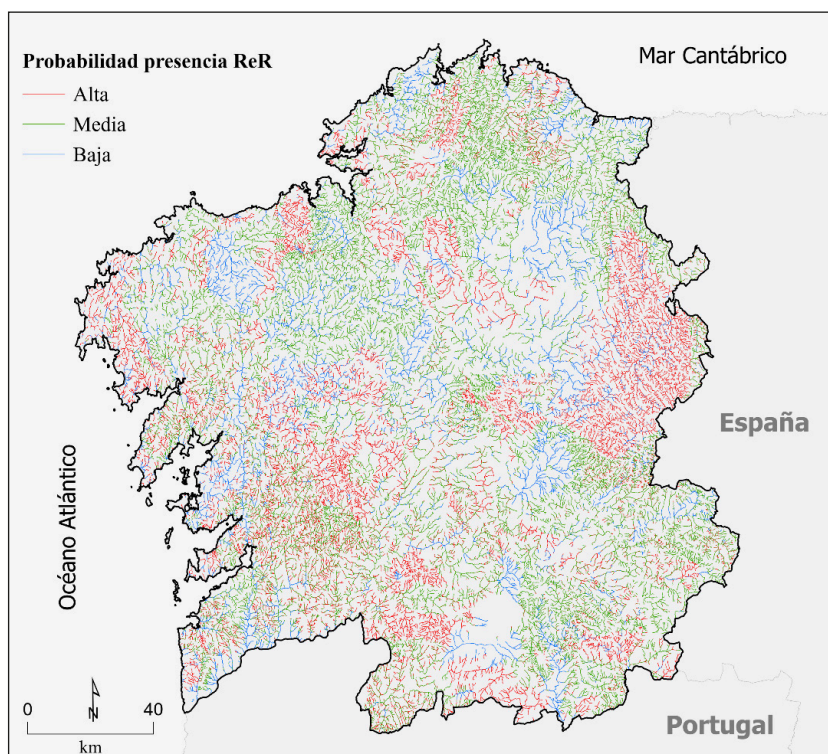


Figura 6. Tipificación de la red de drenaje de Galicia según la probabilidad de presencia de río en roca (ReR).

### Validación

Se empleó la red de drenaje comprendida dentro del Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas del Courel (~580 km<sup>2</sup>) para validar los resultados (figura 7). De los ~800 km de ríos que engloba el Geoparque, menos de un 15 % se clasifica con una probabilidad baja o nula de albergar tramos en roca. Estos tramos se ubican fundamentalmente en los ríos Quiroga y Lor. El sector noroccidental del Geoparque concentra el mayor número de kilómetros de ríos con alta probabilidad de ser ReR.

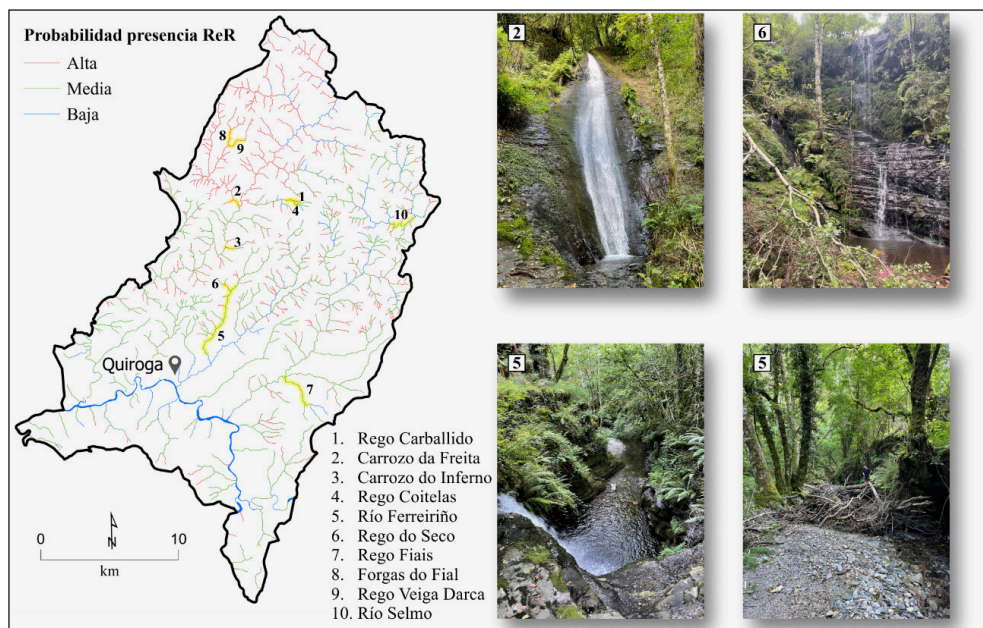


Figura 7. Tipificación de la red de drenaje en el Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas del Courel. Se señalan en amarillo algunos de los principales cañones y barrancos de tipo río en roca (ReR).

La red de cauces seleccionada (figura 7) es prácticamente en su totalidad de tipo ReR. Los resultados muestran que ninguno de los tramos presenta una probabilidad baja de ser ReR. Los ríos Carrozo da Freitas, Forgas do Fial y Rego Veiga Darca son exclusivamente de probabilidad alta. En el resto de los casos se combina una probabilidad alta con otra media.

La presencia de sectores de río con una probabilidad media cuando se tiene constancia de que son ReR la atribuimos, fundamentalmente, a tres características de la variable pendiente. La primera se refiere al tamaño del píxel empleado (100 × 100 m). También se hicieron ensayos con modelos de 25 × 25 m y 500 × 500 m, si bien los primeros son solo válidos para redes de drenaje de un ancho de

cauce muy bajo (casi exclusivamente ríos de orden 1), mientras que, en los segundos, el dato de pendiente queda desvirtualizado para ríos de orden bajo al coger una extensión alejada del propio valle del río. La opción de una resolución de  $100 \times 100$  m parece adecuada para numerosos ríos de Galicia, aunque para las principales masas de agua (aproximadamente ríos a partir de orden 4-5) el valor de pendiente está infravalorado porque parte del cálculo se corresponde con la propia masa de agua del río. El segundo motivo alude a la ubicación del píxel con respecto al trazado del río, por lo que puede suceder que exista una marcada disimetría respecto al cauce. En esos casos el valor de pendiente pondera más una parte del valle que la otra. La razón de que suceda esto es atribuible a que la red hidrográfica empleada no fue desarrollada a partir del modelo digital del terreno usado. El tercer motivo, de tipo técnico, se refiere a los problemas generados por la vegetación para el desarrollo de modelos digitales del terreno. Buena parte de los ríos de Galicia cuentan con una tupida vegetación. No obstante, este tercer motivo, además de insalvable, consideramos que tiene una influencia baja en la tipificación.

## DISCUSIÓN

### *Fortalezas y debilidades del procedimiento de tipificación*

El método propuesto ofrece una primera *tramificación* de la red hidrográfica gallega (figura 6). A tenor de los datos de validación, se puede afirmar, primero, que las variables propuestas para la tipificación resultaron adecuadas para cartografiar tramos con probabilidad de ser ReR; y segundo, que esta aproximación secciona los ríos en tramos con un comportamiento geomorfológico potencialmente parecido (ReR). Trasladado a un ambiente más biológico, cada tipología de tramo estará también más estrechamente vinculada a tipos de hábitats específicos (Kondolf et al., 2016; Bizzi & Lerner, 2012; Montgomery, 1999). La tipificación supone no solo una diferenciación geomorfológica de tipos de río, sino que proporciona un contexto más adecuado para identificar tramos fluviales con condiciones ecológicas similares.

La implementación del procedimiento desde técnicas SIG ha permitido cubrir grandes áreas a bajo coste. No obstante, el resultado final y su calidad están siempre sujetos a una serie de debilidades inherentes al propio diseño de la investigación. La primera alude a los ReR seleccionados. Esto puede suponer un sesgo en los procedimientos estadísticos aplicados si se localizaron más ReR en, por ejemplo, un tipo litológico que en otro. Aunque es un aspecto difícilmente salvable, sí es aconsejable repetir el procedimiento SIG si se aumenta el número de ReR seleccionados y afinar, con ello, más en la tipificación. En este sentido, cabe señalar que para este estudio no se llegó a revisar el recientemente publicado trabajo de Redondas & Ares (2021) sobre barrancos de Galicia y norte de Portugal.

La segunda debilidad responde a la cuestión de por qué las tres variables topo-geomorfológicas seleccionadas son adecuadas para caracterizar ReR. La respuesta más evidente es que el proceso de validación ha ofrecido unos resultados que se pueden calificar como óptimos (buena relación entre alta densidad de fracturas y baja pendiente, y viceversa; Scott & Wohl, 2019). Cada variable empleada, de uso habitual en los estudios de geomorfología fluvial (Charlton, 2008), busca informar sobre una característica topo-geomorfológica relevante. Así, la litología lo hace del comportamiento de la roca frente a la erosión. La

pendiente define el ambiente energético que envuelve al cauce (Knighton, 1998), ejerciendo un control primario en los procesos geomorfológicos a lo largo del río (Notebaert & Piégay, 2013; Ollero, 2007; Nanson & Croke, 1992). Y, por último, la variable densidad de fracturas es un proxy de tasas de erosión y formas del paisaje (Molnar et al., 2007). Las fracturas son el registro visible de las tensiones tectónicas, formadas como respuesta al estrés de las rocas. Selby (1993) las define como cualquier separación que genere espacio o discontinuidad entre materiales. Bajo esta definición englobamos fracturas y fallas, ya que generalmente no hay diferencias en términos de repercusión en los procesos geomórficos, con una tendencia a explotar las fracturas como zonas débiles, independientemente de su mecanismo de formación (Scott & Wohl, 2019). Las fracturas pueden afectar tanto a regiones amplias como a zonas más locales. Precisamente los cambios a escala local son los que caracterizan a los ReR, que muchas veces son solo tramos de unos pocos metros o cientos de metros y suelen estar relacionados con cambios en alguna de las variables geomorfológicas (litológica o fracturación), las cuales, a su vez, derivan en cambios en la tercera (pendiente). Los procesos regionales de formación de fracturas tienden a formar una geometría de fractura más predecible, espacialmente uniforme o que varía gradualmente (Scott & Wohl, 2019).

### *Geodiversidad fluvial y gestión: una “necesidad necesaria”*

#### Sobre la importancia de identificar ríos (tramos) en roca

Como ya se señaló, los ReR han sido durante décadas los grandes olvidados en detrimento de unos sistemas fluviales aluviales mucho más trabajados (Garzón, 2010). La geodiversidad asociada a este tipo de ríos, poseedores de unas condiciones ambientales particulares, es un valor en sí mismo que debe ser protegido y valorado como elementos del patrimonio geológico (Boothroyd & McHenry, 2019; Ortega et al., 2017, 2019; Ollero, 2017; Gray, 2008).

Los procesos geomorfológicos y sus formas asociadas determinan la estructura de un sistema fluvial (Brierley et al., 2013), y ambos componentes son críticos para la rehabilitación sostenible de los ecosistemas acuáticos (Brierley et al., 2002). En los ríos aluviales, la dinámica y las características geomorfológicas del cauce reflejan las condiciones biofísicas de la cuenca y los procesos que ahí se desarrollan (Simon et al., 2016; Ibisate et al., 2011). No obstante, las condiciones “duras” de los ríos (tramos) en roca actúan como elementos control de la dinámica longitudinal del río (Garzón et al., 2008; Wohl, 1998). Y aunque los lechos de los ríos sean ajustables en dimensión y forma de acuerdo con los cambios en el volumen de agua y sedimentos (Church & Ferguson, 2015), estos procesos llevan ritmos muy diferentes en los ReR (Ortega, 2007).

La eficacia fluvial en los ríos aluviales se logra mediante el reajuste de su anchura (fundamentalmente) y profundidad; sin embargo, en ReR los mecanismos de adaptación difieren. La potencia fluvial (competencia de erosión y arrastre) de los ReR es mayor a las posibilidades verdaderas de evacuación de sedimentos, muy por debajo a causa de la baja carga detrítica presente en esta tipología fluvial (Wohl, 2015). En esta línea, la potencia específica y el tamaño medio de sedimento ( $d_{50}$ ) son dos de las variables geomorfológicas que mejor responden a la evolución de los procesos y formas de un río a escala de cauce/tramo (Schmitt, 2007; CEN, 2002; Knighton, 1998). Horacio et al. (2017) concluyeron en su



clasificación geomorfológica basada en las variables potencia y tamaño medio del sedimento que los ReR presentan un estilo fluvial propio que se aleja del comportamiento geomorfológico de los ríos aluviales.



Figura 8. Marmita abierta aislada lateral en un tramo granítico (río Ulla en Mácara, Palas de Rei) (izda.) y arranque y arrastre en un sector de roca metamórfica (río Ferreiroiño, Quiroga, O Courel) (dcha.).

Las clasificaciones geomórficas de ríos que más se han utilizado en los últimos años se han basado en el estudio de sus procesos y/o formas (Tadaki et al., 2014), aunque en ocasiones sea complejo definir (o separar) causa y efecto (Kasprak et al., 2016). La forma de un río es el reflejo directo de múltiples procesos que interactúan y, por lo tanto, la forma implica proceso (Kasprak et al., 2016) (i. e., detrás de cada proceso hay una forma asociada). En la figura 8 se recogen dos imágenes de ReR desarrollados sobre material masivo (roca granítica) y sobre material metamórfico. Las formas talladas sobre la roca y los procesos erosivos que las generan son diferentes dado que la morfología es, en efecto, consecuencia del tipo litológico, la estratificación o, entre otros, el diaclasado (Wohl, 1998). En la imagen de la izquierda (figura 8) se muestra una forma cóncava tipo marmita de un tramo dominado por una morfología salto-pozas. En la imagen de la derecha se observan formas erosivas generadas por arrancamiento al aprovechar las fuerzas hidráulicas los planos de estratificación.

La tipificación desarrollada (figura 6) identifica áreas con topografía y litología similares y, por lo tanto, con procesos geomorfológicos, *a priori*, con cierta analogía (Montgomery, 1996). Pero, por otro lado, los ReR también se pueden separar por el tipo litológico (en este estudio roca granítica y roca metamórfica), cuyos mecanismos y formas erosivas cambian. Por todo ello, y en visos de una gestión más adaptada, se hace esencial *tramificar* la red hidrográfica atendiendo a los procesos dominantes y formas asociadas en cada sector del río. Por citar un ejemplo, en los ReR con presencia de marmitas estas pueden actuar como trampas de sedimentos y almacenar materiales tóxicos derivados de actividades aguas arriba o elementos traza como indicadores ambientales (Álvarez-Vázquez & De Uña-Álvarez, 2021).

### Mirando a la Directiva Marco del Agua 2000/60/CE

Las herramientas y los procedimientos geomorfológicos son reconocidos por la Directiva Marco del Agua 2000/60/CE (en adelante, DMA) como vitales para el buen funcionamiento ecológico de los ríos. Sin embargo, aunque los criterios geomorfológicos han pasado en los últimos años del campo científico al técnico, las variables hidrogeomorfológicas propuestas por la Directiva son todavía opcionales e insuficientes (Ollero et al., 2003). El método de clasificación propuesto por la Directiva tampoco es válido para recoger toda la diversidad de ambientes fluviales existente, incluso cuando se abordan zonas de estudio relativamente pequeñas como la aquí abordada ( $\sim 30 \cdot 10^3 \text{ km}^2$ ).

El artículo 4 (1) de la DMA señala que los Estados miembros deben: “(...) alcanzar un buen estado de las aguas superficiales a más tardar quince años después de la entrada en vigor de la presente Directiva”. Más de dos décadas después, este objetivo no se ha cumplido en muchos ríos europeos. La ausencia de geomorfólogos en los organismos de administración y gestión probablemente ayudase al incumplimiento de este objetivo (García et al., 2021), aunque consideramos que otro factor clave es la falta de clasificaciones capaces de separar los ríos aluviales de los ReR. En esta línea, los tres ciclos de Planes hidrológicos de cuenca desarrollados hasta el presente raramente hacen mención a ReR como elementos singulares con unas características y dinámicas diferentes a los aluviales. Esta no consideración simplifica la geodiversidad de los ríos y empobrece las propuestas de gestión utilizadas en planes y proyectos de planificación, gestión y restauración.

### CONCLUSIONES

Las clasificaciones geomórficas de ríos, como cualquier tipo de clasificación, son un procedimiento técnico de utilidad para simplificar la realidad. Toda clasificación se basa en datos y elecciones subjetivas y conocimiento experto, por lo que, en consecuencia, está sujeta a un proceso de transformación que, de forma inherente, produce lagunas. Estas deben ser tenidas en cuenta, pero no deben ocultar el valor que aportan si logran responder a la pregunta para la que fueron diseñadas.

Los resultados obtenidos en este trabajo son alentadores y arrojan una primera cartografía de probabilidad de presencia de ReR en Galicia. El procedimiento podría replicarse para otros sectores de características lito-estructurales similares. De cara al futuro, y en visos de una mejora del procedimiento, se pretende (i) desarrollar una red de drenaje tomando como base el mismo modelo digital del terreno que se emplee para el cálculo de la pendiente; y (ii) ajustar la resolución espacial del modelo digital de pendientes según el orden del río (a mayor orden jerárquico menor resolución, y viceversa) para evitar una infravaloración del valor real de pendiente. Mirando a nuevas aplicaciones del método, también se proyecta (i) relacionar las características de los ReR aquí descritas con el porcentaje de abundancia de determinados tipos morfológicos de ReR (ver Ortega et al., 2017), y (ii) revalidar el procedimiento en zonas con una mayor diversidad geomorfológica, siguiendo el modelo de Hayakawa & Oguchi (2006).

En suma, es preciso comprender el sistema fluvial en sus diferentes componentes, tanto físicos como biológicos e, incluso, sociales para obtener resultados óptimos. El trabajo aquí desarrollado

debería ser de utilidad para los organismos de cuenca y el establecimiento de protocolos de actuación que consideren, primero, las características de los ReR en la gestión de las masas de agua y, segundo, el florecimiento de figuras de protección basadas en la geodiversidad.

#### AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría agradecer a diferentes personas la ayuda prestada para el buen desarrollo de este artículo. A Alfredo Ollero y Francisca Segura por invitarnos a formar parte de este monográfico. A José A. Ortega Becerril por proporcionar información bibliográfica de interés para el estudio; a Elena de Uña Álvarez por facilitar la ubicación de algunos de los ríos en roca trabajados; a Daniel Ballesteros por la información SIG proporcionada del Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas do Courel; a Ramón Vila y Martín Alemparte por su colaboración con información diversa sobre los ríos en roca del citado Geoparque; a Raquel Piñeiro Rebolo por su disponibilidad para transferir el conocimiento científico al plano administrativo. También a los/as dos revisores/as anónimos/as que dedicaron tiempo a la revisión y mejora de este artículo.

#### REFERENCIAS

- Álvarez-Vázquez, M. A. & De Uña-Álvarez, E. (2021). An exploratory study to test sediments trapped by potholes in Bedrock Rivers as environmental indicators (NW Iberian Massif). *Cuaternario y Geomorfología*, 35(1-2), 69-88.
- Bizzi, S. & Lerner, D.N. (2012). Characterizing physical habitats in rivers using map-derived drivers of fluvial geomorphic processes. *Geomorphology*, 169-170, 64-73.
- Boothroyd, A. & McHenry, M. (2019). Old processes, new movements: the inclusion of geodiversity in biological and ecological discourse. *Diversity*, 11(11), 216.
- Brierley, G., Fryirs, K., Cullum, C., Tadaki, M., Huang, H.Q., & Blue, B. (2013). Reading the landscape integrating the theory and practice of geomorphology to develop place-based understandings of river systems. *Progress in Physical Geography*, 37, 601-621.
- Brierley, G., Fryirs, K., Outhet, D., & Massey, C. (2002). Application of the river styles framework as a basis for river management in New South Wales, Australia. *Applied Geography*, 22, 91-122.
- CEN (2002). *A guidance standard for assessing the hydromorphological features of rivers*. Technical Report, CEN.
- Charlton, R. (2008). *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*. Nueva York: Routledge.
- Church, M. & Ferguson, R. I. (2015). Morphodynamics: rivers beyond steady state. *Water Resources Research*, 51, 1883-1897.
- De Uña-Álvarez, E., Álvarez-Vázquez, M. A., & Rodríguez, R. (2014). Tipología de formas graníticas en el tramo medio del río Miño (Ourense, Galicia, NW del Macizo Ibérico). En Schnabel, S. & Gómez-Gutiérrez, A. (eds.). *Avances de la Geomorfología en España 2012-2014* (pp. 434-437). Actas XIII Reunión Nacional de Geomorfología. Cáceres.

- De Uña-Álvarez, E., Vidal-Romaní, J. R. & Rodríguez, R. (2009). Erosive forms in river systems. En Romero, A., Belmonte, F., Alonso, F., & López, F. (eds.). *Advances in studies on desertification. Contributions to the International Conference in Memory of Professor J. B. Thornes* (pp. 465-468). Murcia.
- De Vicente, G. & Vegas, R. (2009). Large-scale distributed deformation controlled topography along the western Africa–Eurasia limit: Tectonic constraints. *Tectonophysics*, 474, 124-143.
- Ferrer-Boix, C. & Martín-Vide, J. P. (2019). *Estudio morfodinámico del río Bernesga en el tramo comprendido entre la confluencia con el arroyo Valdeposadas y su desembocadura en el río Esla en la provincia de León*. Informe técnico, Universitat Politècnica de Catalunya, Tragsatec, Ministerio para la Transición Ecológica. 216 p.
- Frade, C. (15 de mayo de 2021). Fervenzas de Galicia. <http://fervenzasdegalicia.blogspot.com/>
- García, J. H. (2014). *Geomorfología fluvial en sistemas atlánticos: metodología de caracterización, clasificación y restauración para los ríos de Galicia*. Tesis doctoral, inédita, Universidad de Santiago de Compostela. 565 p. + anexos.
- García, J. H., Ollero, A., Ibisate, A., Fuller, I. C., Death, R. G., & Piégay, H. (2021). Promoting fluvial geomorphology to “live with rivers” in the Anthropocene Era. *Geomorphology*, 380, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107649>
- Garzón, G. (2010). Significado de los ríos en roca y la importancia de su preservación. En Ortega, J. A. & Durán, J. J. (eds). *Patrimonio geológico: los ríos en roca de la Península Ibérica* (pp. 17-36). Madrid: Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie Geológica y Geofísica, 4.
- Garzón, G., Ortega, J. A., & Garrote, J. (2008). Morfología de perfiles de ríos en roca. Control tectónico y significado evolutivo en el Bajo Guadiana. *Geogaceta*, 44.
- Goldrick, G. & Bishop, P. (1995). Differentiating the Roles of Lithology and Uplift in the Steepening of Bedrock River Long Profiles: An Example from Southeastern Australia. *The Journal of Geology*, 103(2), 227-231.
- Gómez-Heras, M., Ortega, J. A., Garrote, J., Fort, R., & López-González, L. (2019). Morphometric measurements of bedrock rivers at different spatial scales and applications to geomorphological heritage research. *Progress in Earth and Planetary Science*, 6, 29.
- Gray, M. (2008). Geodiversity: developing the paradigm. *Proceedings of the Geologists' Association*, 119(3-4), 287-298.
- Hayakawa, Y. S. & Oguchi, T. (2006). DEM-based identification of fluvial knickzones and its application to Japanese mountain rivers. *Geomorphology*, 78, 90-106.
- Horacio, J., Ollero, A., & Pérez-Alberti, A. (2017). Geomorphic classification of rivers: a new methodology applied in an Atlantic Region (Galicia, NW Iberian Peninsula). *Environmental Earth Sciences*, 76, 746.
- Ibisate, A., Ollero, A., & Díaz, E. (2011). Influence of catchment processes on fluvial morphology and river habitats. *Limnetica*, 30, 169-182.
- Kasprak, A., Hough-Snee, N., Beechie, T., Bouwes, N., Brierley, G., Camp, R., Fryirs, K., Imaki, H., Jensen, M., O'Brien, G., Rosgen, D., & Wheaton, J. (2016). The blurred line between form and process: a comparison of stream channel classification frameworks. *PLoS ONE* 11: e0150293.

- Knighton, D. (1998). *Fluvial forms and processes: a new perspective*. Nueva York: Oxford University Press. 383 p.
- Kondolf, G. M., Piégay, H., Schmitt, L., & Montgomery, D. R. (2016). Geomorphic classification of rivers and streams. En Kondolf, G. M. & Piégay, H. (eds.). *Tools in Fluvial Geomorphology* (2.<sup>a</sup> ed., pp. 133-158). Wiley Blackwell.
- Molnar, P., Anderson, R. S., & Anderson, S. P. (2007). Tectonics, fracturing of rock, and erosion. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112, 1-12.
- Montgomery, D. R. (1996). Influence of geological processes on ecological systems. En Schoonmaker, P. K., Hagen, B. V., & Wolf, E. C. (eds.). *The rain forests of home: portrait of a North American Bioregion* (pp. 43-68). Washington: Island Press.
- Montgomery, D. R. (1999). Process domains and the river continuum. *Journal of American Water Resources Association*, 35, 397-410.
- Montgomery, D. R. & Buffington, J. M. (1997). Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin*, 109, 596-611
- Muñiz de las Cuevas, R. (2001). *Guía das fervezas da Coruña*. Galicia: Guías Cumio. 146 p.
- Muñiz de las Cuevas, R. & Fontenla Coteló, M. (2009). *Guía das fervezas de Lugo e Ourense*. Galicia: Guías Cumio. 150 p.
- Muñiz de las Cuevas, R. (2006). *Guía das fervezas de Pontevedra*. Galicia: Guías Cumio. 135 p.
- Nanson, G. C. & Croke, J. C. (1992). A genetic classification of floodplains. *Geomorphology*, 4, 459-486.
- Notebaert, B. & Piégay, H. (2013). Multi-scale factors controlling the pattern of floodplain width at a network scale: The case of the Rhône basin, France. *Geomorphology*, 155-171.
- Ollero, A. (2007). *Territorio fluvial. Diagnóstico y propuesta para la gestión ambiental y de riesgos en el Ebro y los cursos bajos de sus afluentes*. Bilbao: Bakeaz. 255 p.
- Ollero, A. (2017). *Hidrogeomorfología y geodiversidad: el patrimonio fluvial*. Zaragoza: Centro de Documentación del Agua y el Medio Ambiente (CDAMAZ). 111 p.
- Ollero, A., Echeverría, M. T., Sánchez Fabre, M., Auría, V., Ballarín, D., & Mora, D. (2003). Metodología para la tipificación hidromorfológicas de los cursos fluviales de Aragón en aplicación de la Directiva Marco de Aguas (2000/60/CE). *Geographicalia*, 44, 7-25.
- Ortega, J. A. (2007). El estudio de la morfología de los ríos en roca. Implicaciones hidrológicas y evolutivas en dos barrancos españoles. *Boletín Geológico y Minero*, 118(4), 803-812.
- Ortega, J. A. (2010). Morfologías en los ríos en roca. Variaciones y tipologías. En Ortega, J. A. & Durán, J. J. (eds.). *Patrimonio geológico: los ríos en roca de la Península Ibérica* (pp. 55-78). Madrid: Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie Geológica y Geofísica, 4.
- Ortega, J. A. & Durán, J. J. (2010). *Patrimonio geológico: los ríos en roca de la Península Ibérica*. Madrid: Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie Geológica y Geofísica, 4.
- Ortega, J. A., Jorge-Coronado, A., Garzón, G., & Wohl, E. E. (2017). Sobrarbe Geopark: an Example of Highly Diverse Bedrock Rivers. *Geoheritage*, 9, 533-548.

- Ortega, J. A., Polo, I., & Belmonte, A. (2019). Waterfalls as Geological Value for Geotourism: the Case of Ordesa and Monte Perdido National Park. *Geoheritage*, 11, 1199-1219.
- Pérez-Alberti, A. (1982). Hidrografía. En Pérez-Alberti, A. (ed). *Xeografía de Galicia*. Tomo I: O Medio (pp. 97-110). Ed. Sálvora.
- Pérez-Alberti, A. (1985). *Un exemplo de estudo integral do medio: a cunca do río Miño*. Sociedade Galega de Xeografía. I Caderno de Xeografía. Edic. do Castro.
- Pérez-Alberti, A. (1993). *Xeografía de Galicia: xeomorfoloxía*. *Gran Enciclopedia Galega*. Tomo 3, 260 p.
- Pérez-Alberti, A., Gomes, A., Trenhaile, A., Oliveira, M., & Horacio, J. (2013). Correlating river terrace remnants using an Equotip hardness tester: An example from the Miño River, northwestern Iberian Peninsula. *Geomorphology*, 191, 59-70.
- Redondas, R. & Ares, C. (2021). *Guía de barrancos de Galicia y norte de Portugal*. *Barrancos del lejano oeste. Regos e carrozos do Far West* (autoedición).
- Rodríguez Martínez-Conde, R. (2001). Los ríos. En Precado Ledo, A. & Sancho Comíns, J. (dir.). *Atlas de Galicia*. Tomo I: *El Medio Natural* (pp. 157-171). Xunta de Galicia.
- Schmitt, L., Maire, G., Nobelis, P., & Humbert, J. (2007). Quantitative morphodynamic typology of rivers: a methodological study based on the french upper Rhine basin. *Earth Surface Processes Landforms*, 32, 1726-1746.
- Scott, D. N. & Wohl, E. E. (2019). Bedrock fracture influences on geomorphic process and form across process domains and scales. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44, 17-45. DOI: 10.1002/esp.4473
- Selby, M. J. (1993). *Hillslope Materials and Processes*. Oxford: Oxford University Press.
- Simon, A., Castro, J., & Rinaldi, M. (2016). Channel form and adjustment: characterization, measurement, interpretation and analysis. En Kondolf, G. M. & Piégay, H. (eds.). *Tools in Fluvial Geomorphology* (2.<sup>a</sup> ed., pp. 237-259). Wiley Blackwell.
- Tadaki, M., Brierley, G., & Cullum, C. (2014). River classification: theory, practice, politics. *WIREs Water*, 1, 349-367.
- Tinkler, K. J. & Wohl, E. E. (1998). *River over rock: fluvial processes in bedrock channels*. American Geophysical Union, Geophysical Monograph Series, 107, 323 p.
- Whipple, K. X., Di Biase, R. A., & Crosby, B. T. (2013). Bedrock rivers. En Shroder, J. (ed.). *Treatise on geomorphology* (2: 550-573). San Diego: Academic Press.
- Wohl, E. E. (1998). Bedrock channel morphology in relation to erosional process. En Tinkler, K. J. & Wohl, E. E. (eds). *River over rock: fluvial processes in bedrock channels* (pp. 133-151). American Geophysical Monograph, 107.
- Wohl, E. E. (2015). Particle dynamics: The continuum of bedrock to alluvial river segments. *Geomorphology*, 241, 192-208.

ANEXOS

Anexo A. Identificación y características de los tramos en roca localizados en el área de estudio.

ID	Litología	Pendiente*	Fracturas**	x	y
1	Pizarras y cuarcitas	17,4	0,694	647957	4717565
2	Pizarras y cuarcitas	27,0	0,629	674529	4754565
3	Pizarras y cuarcitas	21,3	0,649	645634	4715075
4	Pizarras y cuarcitas	4,6	0,533	646223	4710038
5	Pizarras y cuarcitas	5,5	0,731	649337	4719632
6	Pizarras y cuarcitas	1,3	0,717	652057	4722163
7	Pizarras y cuarcitas	5,5	0,419	636704	4709136
8	Pizarras y cuarcitas	24,2	0,731	659034	4773237
9	Pizarras y cuarcitas	24,4	0,561	652422	4710833
10	Pizarras y cuarcitas	13,0	0,632	644243	4786312
11	Pizarras y cuarcitas	18,1	0,538	618488	4830368
12	Pizarras y cuarcitas	28,7	0,520	625821	4825328
13	Pizarras y cuarcitas	6,2	0,545	662162	4695842
14	Pizarras y cuarcitas	21,8	0,356	642517	4820174
15	Pizarras y cuarcitas	19,0	0,561	657929	4714952
16	Pizarras y cuarcitas	16,5	0,635	607952	4819884
17	Granitoides calcoalcalinos	8,9	0,522	566161	4642617
18	Granitoides calcoalcalinos	14,1	0,462	530317	4711555
19	Granitoides calcoalcalinos	8,2	0,432	499477	4747999
20	Granitoides calcoalcalinos	15,7	0,513	614815	4704150
21	Granitoides calcoalcalinos	12,0	0,582	574029	4632913
22	Granitoides calcoalcalinos	3,4	0,480	532361	4712117
23	Granitoides calcoalcalinos	19,2	0,640	598924	4686785
24	Granitoides calcoalcalinos	12,4	0,576	621437	4814954
25	Granitoides calcoalcalinos	9,1	0,662	580206	4640940
26	Granitoides calcoalcalinos	16,0	0,519	632576	4811906
27	Granitoides calcoalcalinos	12,8	0,522	530955	4717274
28	Granitoides calcoalcalinos	8,0	0,614	575740	4635925
29	Granitoides calcoalcalinos	11,5	0,339	490876	4751383
30	Granitoides alcalinos	15,5	0,674	535323	4698262
31	Granitoides alcalinos	16,3	0,662	570820	4694983
32	Granitoides alcalinos	12,7	0,522	605021	4674462
33	Granitoides alcalinos	5,6	0,621	573502	4675319

ID	Litología	Pendiente*	Fracturas**	x	y
34	Granitoides alcalinos	9,6	0,495	592319	4672466
35	Granitoides alcalinos	4,0	0,633	583615	4694728
36	Granitoides alcalinos	13,7	0,819	552706	4688054
37	Granitoides alcalinos	12,1	0,369	487008	4763459
38	Granitoides alcalinos	5,3	0,756	576040	4816099
39	Granitoides alcalinos	18,4	0,542	648871	4670135
40	Granitoides alcalinos	12,6	0,763	564812	4679742
41	Granitoides alcalinos	19,5	0,664	579580	4806808
42	Granitoides alcalinos	12,4	0,582	531184	4700109
43	Granitoides alcalinos	25,5	0,443	623659	4691943
44	Granitoides alcalinos	26,8	0,481	511625	4655790
45	Granitoides alcalinos	16,4	0,845	549409	4692285
46	Granitoides alcalinos	3,5	0,828	538430	4687741
47	Granitoides alcalinos	12,4	0,476	585615	4745739
48	Granitoides alcalinos	19,5	0,301	494114	4742573
49	Granitoides alcalinos	13,8	0,412	504162	4721549
50	Granitoides alcalinos	23,1	0,487	511699	4656701
51	Granitoides alcalinos	12,3	0,607	512847	4776181
52	Granitoides alcalinos	15,1	0,392	503422	4720633
53	Granitoides alcalinos	18,7	0,607	514779	4739919
54	Granitoides alcalinos	7,2	0,576	603478	4832815
55	Granitoides alcalinos	5,4	0,481	515984	4650941
56	Granitoides alcalinos	10,6	0,454	515582	4649675
57	Granitoides alcalinos	5,3	0,831	557119	4684841
58	Granitoides alcalinos	25,9	0,676	559543	4734100
59	Granitoides alcalinos	12,4	0,496	584593	4743844
60	Granitoides alcalinos	6,8	0,511	530614	4725649
61	Granitoides alcalinos	16,3	0,815	539572	4691898
62	Granitoides alcalinos	22,3	0,353	493072	4750425
63	Granitoides alcalinos	7,8	0,412	577351	4790742
64	Gneises	9,9	0,580	516825	4785891
65	Gneises	15,6	0,444	626589	4693550
66	Gneises	20,8	0,711	571062	4814713
67	Gneises	3,4	0,522	666351	4666534
68	Gneises	5,0	0,407	582183	4787428
69	Gneises	11,0	0,461	585782	4760873



ID	Litología	Pendiente*	Fracturas**	x	y
70	Gneises	19,2	0,622	526081	4682930
71	Gneises	15,7	0,480	587064	4837623
72	Gneises	14,8	0,485	508139	4728330
73	Gneises	3,9	0,585	513068	4743103
74	Gabros	10,9	0,472	527544	4778388
75	Gabros	9,8	0,439	526383	4774576
76	Esquistos y metavulcanitas	18,0	0,582	605757	4707998
77	Esquistos y metavulcanitas	3,4	0,489	609994	4698426
78	Esquistos y metavulcanitas	3,2	0,778	563740	4680343
79	Esquistos y metavulcanitas	12,7	0,575	564002	4744294
80	Esquistos y metavulcanitas	19,3	0,606	557667	4742380
81	Esquistos y metavulcanitas	8,5	0,614	604821	4709217
82	Esquistos y metavulcanitas	16,9	0,479	508119	4727062
83	Esquistos y metavulcanitas	14,1	0,715	532835	4681163
84	Esquistos y metavulcanitas	19,4	0,241	648250	4637954
85	Esquistos y metavulcanitas	11,6	0,403	501348	4724084
86	Esquistos y metavulcanitas	13,2	0,704	597438	4817105

\* Pendiente en grados (°)

\*\* Densidad de fracturación en km·km<sup>2</sup>

Cómo citar este artículo:

Horacio García, J. & Pérez-Alberti, A. (2021). Aproximación a la identificación y caracterización de ríos en roca a escala regional mediante variables topo-geomorfológicas (Galicia, Noroeste de la Península Ibérica). *Cuadernos de Geografía*, 107, 217-41.

<https://doi.org/10.7203/CGUV.107.21426>



Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional.

