

CUARTA ÉPOCA

GEOGRAPHICALIA

1977 - 1988 - 2000 - 2023

**EDITORIAL:**

Monográfico geomorfología
Desde la Geografía a
la Geomorfología global
en Aragón
Dr. José María García Ruiz

ARTÍCULOS:

Monográfico geomorfología
Cartografía biogeomor-
fológica | Erosión por piping
| Zonificación de aludes
Sección general
Patrones asentamiento
culturas Calima | Dinámica
territorial Grados Geografía

MAPAS:

Monográfico geomorfología
Mapa geomorfológico de la
Bárdena Blanca (Navarra,
España) | Mapa geoarque-
ológico de El Pichao
(Tucumán, Argentina)

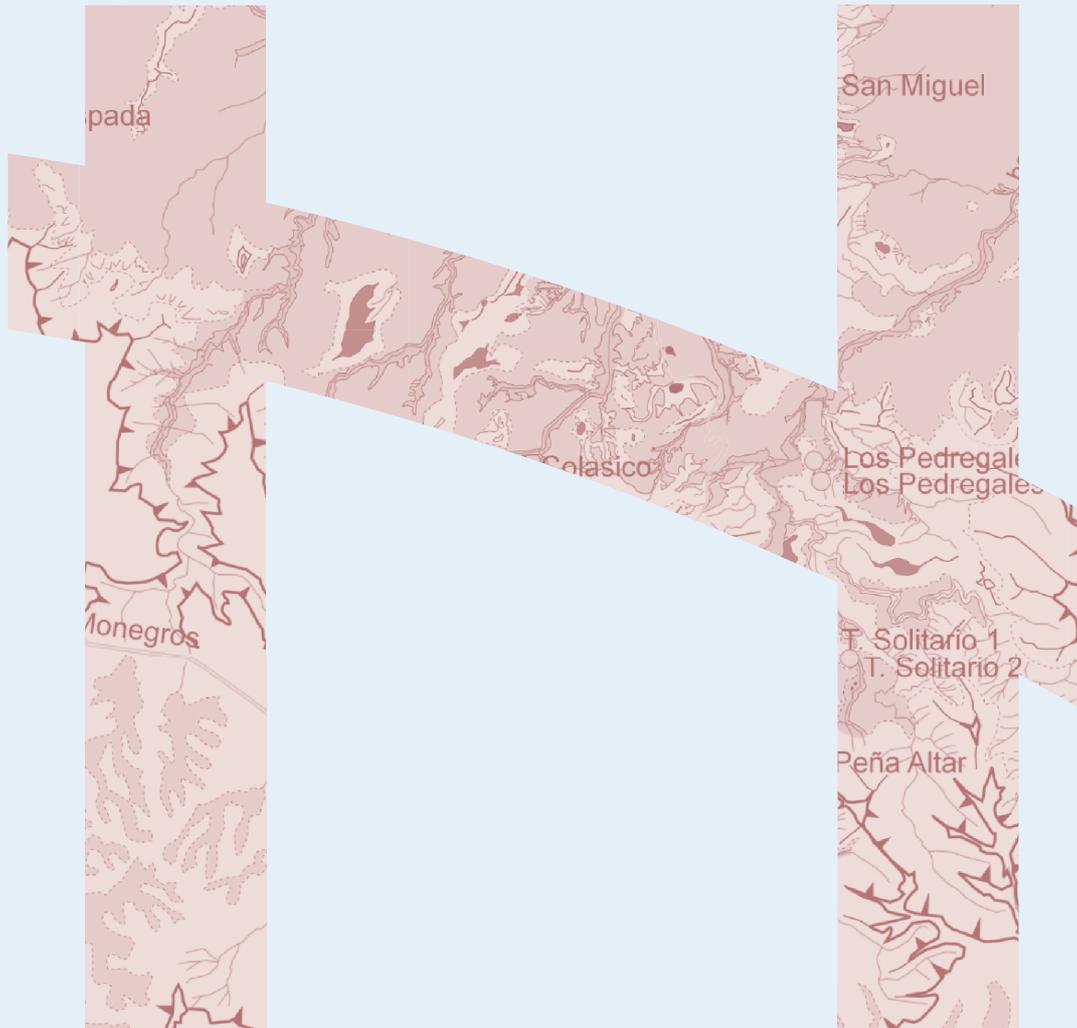
**NOTAS DE INVESTIGACION
Y RESEÑAS:**

Monográfico geomorfología
Análisis hidromorfológico
de ríos efímeros | VOLTUR-
MAC: volcans-turismo
Sección general
Estrategias de recuperación
de cubierta vegetal



1542

Departamento de
Geografía y
Ordenación del Territorio
Universidad Zaragoza



**Análisis hidromorfológico de ríos efímeros utilizando
teledetección y Machine Learning**

María Pilar Rabanaque y Gerardo Benito

Análisis hidromorfológico de ríos efímeros utilizando teledetección y Machine Learning

María Pilar Rabanaque¹ y Gerardo Benito²

¹ Instituto Pirenaico de Ecología Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IPE-CSIC), Avda. Montañana, 1005, 50059, Zaragoza
mapi.rabanaque@ipe.csic.es

² Museo Nacional de Ciencias Naturales (MNCN-CSIC),
c/ José Gutiérrez Abascal, 2, 28006, Madrid
benito@mncn.csic.es

Resumen: Los ríos efímeros de la región mediterránea suponen el 70% de la red fluvial y se espera que esta proporción aumente debido al cambio climático. Las deficiencias inicialmente existentes en la Directiva Marco del Agua, creada en el año 2000 para caracterizar el estado ambiental de la red fluvial, se han mejorado con la incorporación de análisis hidrogeomorfológicos específicos para ríos intermitentes. En este trabajo se proponen nuevas metodologías para abordar la caracterización hidrogeomorfológica de los ríos efímeros mediante la clasificación supervisada, la segmentación automática y el análisis de datos. Estos métodos se han aplicado en las cuencas de las ramblas de la Viuda y de Cervera, que han estado afectadas por extracciones de áridos desde los años setenta hasta el año 2000. Los resultados obtenidos demuestran el potencial de la combinación de estas metodologías para monitorizar y ayudar en la gestión fluvial.

Palabras clave:

Ríos efímeros, teledetección, clasificación supervisada, segmentación automática.

Hydromorphological analysis of ephemeral rivers using remote sensing and Machine Learning

Abstract: Ephemeral rivers in the Mediterranean region account for 70% of the river network and this proportion is expected to increase due to climate change. The shortcomings initially existing in the Water Framework Directive, created in 2000 to characterise the environmental status of the river network, have been improved with the incorporation of specific hydrogeomorphological analyses for intermittent rivers. This paper proposes new methodologies to address the hydrogeomorphological characterisation of ephemeral rivers by means of supervised classification, automatic segmentation and data analysis. These methods have been applied in the basins of the Rambla de la Viuda and Rambla de Cervera, which have been affected by aggregate extraction from the 1970s until 2000. The results obtained demonstrate the potential of combining these methodologies to monitor and assist in river management.

Keywords:

Ephemeral streams, remote sensing, supervised classification, automatic segmentation.

Recibido: 22-12-2024. Aceptado: 23-12-2024.

DOI: 10.26754/ojs_geoph/geoph.20247611401

1. Introducción

LOS RÍOS EFÍMEROS suponen más del 50% de la red fluvial mundial (Messenger et al., 2021). Este tipo de ríos se caracteriza por la falta de flujo de agua durante ciertos meses al año (Camarasa y Segura, 2001), siendo típicos de las regiones más secas del planeta como, por ejemplo, la zona mediterránea. A pesar de su elevada extensión por todo el planeta, su estudio ha sido muy escaso hasta hace pocas décadas (Stubbington et al., 2018). Los estudios realizados han permitido comprender la complejidad y diversidad de estos ambientes secos (Jaeger, Sutfin, Tooth, Michaelides y Singer, 2017), además de descubrir algunas especies endémicas (Hershkovitz y Gasith, 2013). En Europa estos estudios comenzaron a realizarse de forma generalizada a partir de la implementación de la Directiva Marco del Agua (European Commission, 2000), que pretende evaluar el estado geomorfológico, hidrológico y de calidad del agua con los mismos criterios en todos los países miembros. Para ríos perennes se han desarrollado algunos índices hidromorfológicos como el IDRAIM (Rinaldi, Surian, Comiti y Bussetini, 2015) o el sistema jerárquico multiescala (Gurnell et al., 2016). En el caso concreto de los ríos efímeros se han propuesto índices hidromorfológicos específicos, tales como el índice IHG-E (Ballarín y Mora, 2018; Ollero et al., 2021a) y la herramienta TREHS (Gallart et al., 2017) que incide en el componente biológico de los ríos intermitentes.

Los sistemas fluviales están sujetos a impactos de origen natural o antrópico. Los principales impactos naturales son los procesos de erosión o depósito (Merritt y Wohl, 2003), mientras que los principales impactos antrópicos son la canalización del cauce, la construcción de barreras y presas, y la extracción de áridos

(Ollero, Conesa-García y Vidal-Abarca, 2022), que provocan la incisión del cauce y un déficit de sedimento (Kondolf, 1994). La incisión es un proceso difícil de revertir y sólo es posible recuperar el cauce a una situación más natural mediante procesos de restauración (Ollero, Conesa-García y Vidal-Abarca, 2021b), siendo prácticamente imposible revertir su estado a las condiciones anteriores al impacto (Fryirs y Brierley, 2000; Downs, Dusterhoff y Sears, 2013). Diversos autores han estudiado y monitorizado estos impactos humanos en los ríos efímeros mediterráneos (Segura-Beltrán y Sanchis-Ibor, 2013; Calle, Alho y Benito, 2017). Antes del desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), estos estudios se realizaban manualmente, lo que suponía un gran coste de tiempo. Este problema se ha reducido con el desarrollo de las nuevas tecnologías, que han aportado nuevos métodos para automatizar la cartografía de unidades fluviales mediante técnicas como la teledetección (Bizzi et al., 2021; Alfredsen, Dalsgård, Shamsaliei, Halleraker y Gundersen, 2022; Bozzolan, Brenna, Surian, Carbonneau y Bizzi, 2023; Hedger y Gosselin, 2023), y el seguimiento topográfico con modelos digitales del terreno basado en fotogrametría o LiDAR (Borg Galea, Sadler, Hannah, Datry y Dugdale, 2019; Calle, Calle, Alho y Benito 2020; Benito et al., 2024).

Este trabajo constituye un resumen breve de la tesis doctoral de Rabanaque (2024), que tiene como objetivo principal el desarrollo de una metodología que se pueda aplicar a distintas escalas utilizando criterios objetivos que permitan establecer una tipología de cauces en ríos efímeros mediterráneos, junto con herramientas para el análisis multitemporal de las trayectorias de recuperación del cauce a corto plazo.

2. Área de estudio

LOS RÍOS EFÍMEROS en España se localizan principalmente en la costa mediterránea. Por este motivo, las zonas elegidas para realizar los estudios son la cuenca de la Rambla de Cervera (~340 km²) y la cuenca de la Rambla de la Viuda (~1500 km²), ambas localizadas en el norte de la provincia de Castellón (Figura 1). Se caracterizan por tener temperaturas suaves a lo largo de todo el año, con una media de ~10°C en invierno y ~20°C en verano. Respecto a las precipitaciones, se produce un gradiente desde las zonas de cabecera (~700mm) hasta las zonas más bajas (~400mm) (Mateu, 1974). Cuando estas precipitaciones son intensas (>60mm) se producen episodios de crecida que ocurren con una media de entre dos y cuatro veces al año (Sanchis-Ibor y Segura-Beltrán, 2014).

Ambas cuencas han experimentado cambios en los usos del suelo debido al abandono agrícola y la migración de la población a las ciudades (Segura-Beltrán y Sanchis-Ibor, 2013). Además de los cambios en los usos del suelo, la extracción de áridos ha sido una actividad muy importante que ha afectado directamente a los ríos. Estas extracciones se produjeron desde los años 70 hasta el 2000, alcanzándose su máximo en los años 80 con una extracción media de 36.600 m³/año (Segura-Beltrán y Sanchis-Ibor, 2013), lo que ha supuesto un gran problema en la actividad morfodinámica en todas las cuencas afectadas.

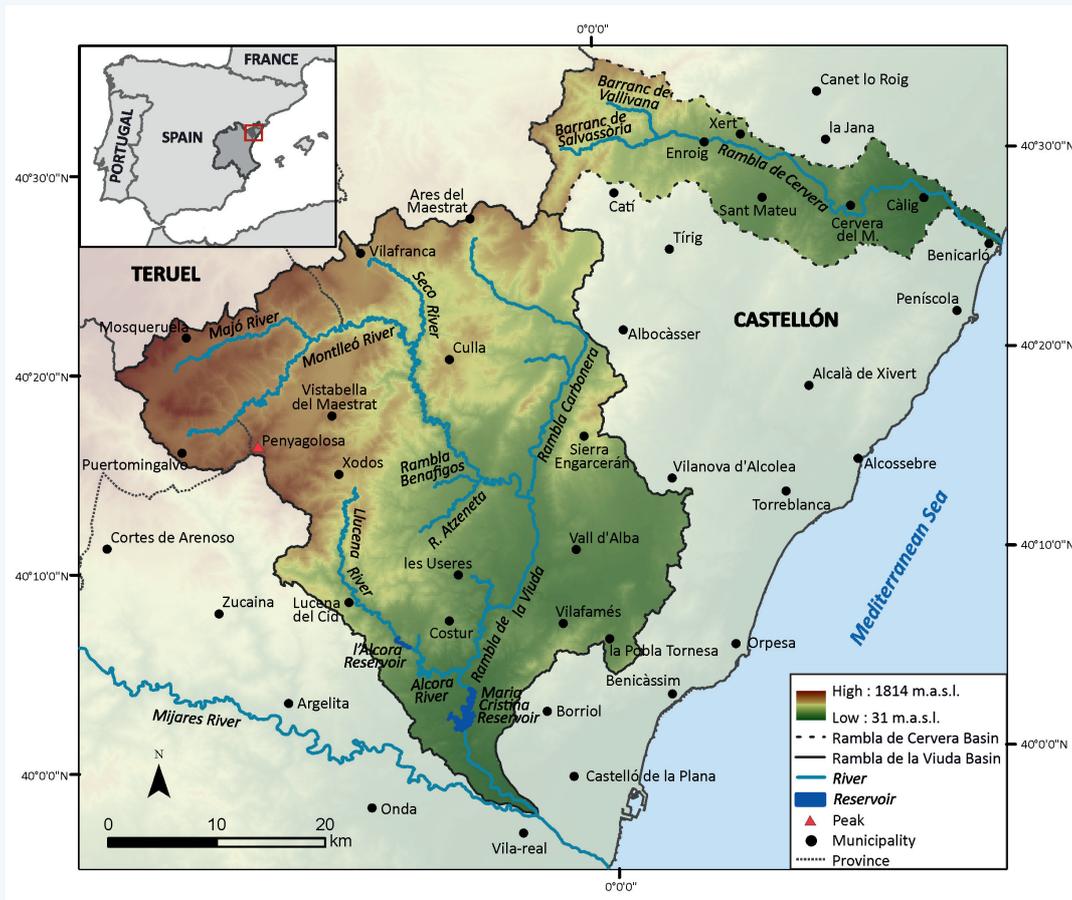


Figura 1. Localización zonas de estudio (Rabanaque, 2024).

Fuente: IGN, CHJ (2024).

3. Metodología

LA METODOLOGÍA consta de tres fases: 1) identificación de formas fluviales y cartografía de las mismas; 2) segmentación automática para establecer tramos homogéneos entre sí, y 3) análisis espacio-temporal de datos obtenidos a partir de las fases anteriores.

3.1. Clasificación supervisada

LA ELABORACIÓN de una leyenda con las distintas formas fluviales es el paso previo a la clasificación supervisada. En nuestro caso, la leyenda se basa en la propuesta por Sanchis-Ibor, Segura-Beltrán y Almonacid-Caballer (2017), que incluye las siguientes formas: lecho en roca, cauce activo y barras sin vegetación, barras poco vegetadas, barras medio vegetadas, barras completamente vegetadas y zonas agrícolas. Una vez identificadas estas formas, es fundamental la creación de puntos de entrenamiento que identifiquen cada una de ellas. En esta tesis se utilizaron varias ortofotografías del Institut Cartogràfic Valencià (2018-2021) que tienen las bandas RGB y la banda infrarroja, permitiendo una mejora en la diferenciación espec-

tral de los píxeles asociados a las formas. Por este motivo, hay que extraer los valores RGBI de cada punto de entrenamiento e, incluso, calcular algunos índices espectrales (NDVI o NDWI). Si la imagen que se va a clasificar es de satélite se pueden calcular métricas de textura para poder diferenciar mejor las formas ya que la resolución espacial es menor. Finalmente, se recomienda seleccionar las bandas espectrales, los índices o las métricas de textura que mejor diferencian las formas para evitar la repetición de información espectral y agilizar el proceso de clasificación. Los puntos de entrenamiento se dividen en puntos de entrenamiento (80%) y puntos de control (20%). Estos últimos se utilizarán para comprobar la precisión del modelo.

Una vez obtenidos los puntos de entrenamiento y los índices y bandas que se utilizarán para la cartografía de las formas fluviales, se ha realizado la clasificación supervisada mediante el algoritmo *Support Vector Machine*. Este algoritmo consiste en separar las distintas categorías en un hiperplano (Cortes y Vapnik, 1995). Finalmente, para comprobar la precisión del modelo se ha realizado una matriz de confusión. Se pueden encontrar más detalles sobre la metodología utilizada en Rabanaque (2024).

3.2. Segmentación automática

PARA ESTABLECER distintas tipologías en una cuenca hidrográfica o estudiar la evolución temporal de la respuesta fluvial en función de las características geomorfológicas de los tramos fluviales, se ha utilizado un procedimiento multivariante automatizado para establecer segmentos fluviales internamente homogéneos entre sí. Este método objetivo permite discretizar los sistemas fluviales en base a criterios estadísticos (Alber y Piégay, 2011; Martínez-Fernández, Solana-Gutiérrez, González del Tánago y García de Jalón, 2016). Las variables que se utilizaron comprenden: anchura cauce activo, anchura fondo valle, gradiente de pendiente y potencia específica de la corriente (para más detalles consultar Rabanaque, Martínez-Fernández, Calle y Benito, 2022; Rabanaque, Martínez-Fernández, Calle, Castillo y Benito, 2024). Posteriormente, se han empleado procedimientos de permutación multirrespuesta (MRPP, Mielke, 1991) para realizar la segmentación de los ríos utilizando R (R Core Team, 2022). Para ello, primero se estandarizaron las cuatro variables y se consideró que un riesgo alfa de 0,05 era estadísticamente significativo. Se pueden encontrar más detalles sobre el procedimiento en Martínez-Fernández et al. (2016).

3.3. Análisis de datos

EL SEGUIMIENTO temporal de los cambios morfológicos en ríos afectados por actividades antrópicas es fundamental para evaluar su recuperación. Los cambios espacio-temporales se han realizado anualmente desde 2018 hasta 2021 sobre las formas cartografiadas (lecho en roca, cauce activo y barras sin vegetación, barras poco vegetadas, barras medio vegetadas y barras completamente vegetadas). Además, se ha calculado el porcentaje de transición de una categoría a otra anualmente, así como un periodo resumen entre el primer y el último año de estudio. Respecto a los cambios se ha considerado que el cauce estaba en proceso de recuperación cuando aumentaba la extensión de la forma de cauce activo y barras sin vegetación respecto al año anterior, mientras que consecuentemente disminuían las formas con vegetación. Por el contrario, se ha considerado que el sistema se estabiliza cuando aumentan las formas con vegetación y disminuyen las formas de lecho en roca o cauce activo y barras sin vegetación.

4. Resultados

4.1. Tipologías

EN LA CUENCA de la Rambla de la Viuda se han identificado 62 segmentos distintos (Figura 2a). La media en la longitud de los segmentos es de 4km, aunque existe mucha diferencia entre el más pequeño (V10 con 600m) y el más grande (MON10 con 19,2km). Esta segmentación, unida a la clasificación realizada, ha permitido establecer cuatro tipologías en función de sus características estructurales y geomorfológicas. En ríos como el Montlleó, Seco o Rambla Carbonera se encuentran tres tipologías distintas. La Rambla de la Viuda es el único curso en el que se identifican los cuatro tipos. Los afluentes compuestos de un único segmento, como el barranc Solana o barranc de les Olles, se identifican dentro del tipo 1 (T1). El T1 se caracteriza por un cauce estrecho (~14m) dentro de un fondo de valle muy encajado (~100m). Este tipo se localiza principalmente en las zonas de cabecera donde predominan las formas con vegetación estable (Figura 2b). El tipo 2 (T2), al igual que el T1, se encuentra en zonas de cabecera. Por ello, la anchura del valle es igualmente estrecha, aunque presenta típicamente un cauce mayor (~30m) que el T1. Como se

puede observar en la Figura 2c, en este tipo T2 existe mayor diversidad de formas, siendo predominante el cauce activo y barras de gravas sin vegetación. El T3 y T4 son muy distintos a los anteriores, tanto estructuralmente como geomorfológicamente. Ambos se localizan en zonas más bajas que los anteriores donde los valles son más anchos (~100m en T3), especialmente en T4 (~350m). Esto permite que los cauces activos también tengan mayor anchura (~80m en T3 y ~200 m en T4). Respecto a las formas que encontramos en ellos, se observa como en el tipo T3 (Figura 2d) se caracteriza por presentar en las márgenes barras con vegetación mixta e incluir dentro del cauce activo algunas con poca vegetación. Igualmente, T3 muestra continuidad en la anchura en el cauce activo y barras sin vegetación a lo largo del tramo, cuya anchura de valle está reducida por un control estructural. En el caso de T4, el cauce activo y barras sin vegetación ocupa la mitad de la anchura del cauce y, como en el T3, se desarrollan en los laterales barras con distintos grados de vegetación (Figura 2e). En este tipo T4 hay que destacar que se identifican barras o islas con vegetación madura dentro del cauce.

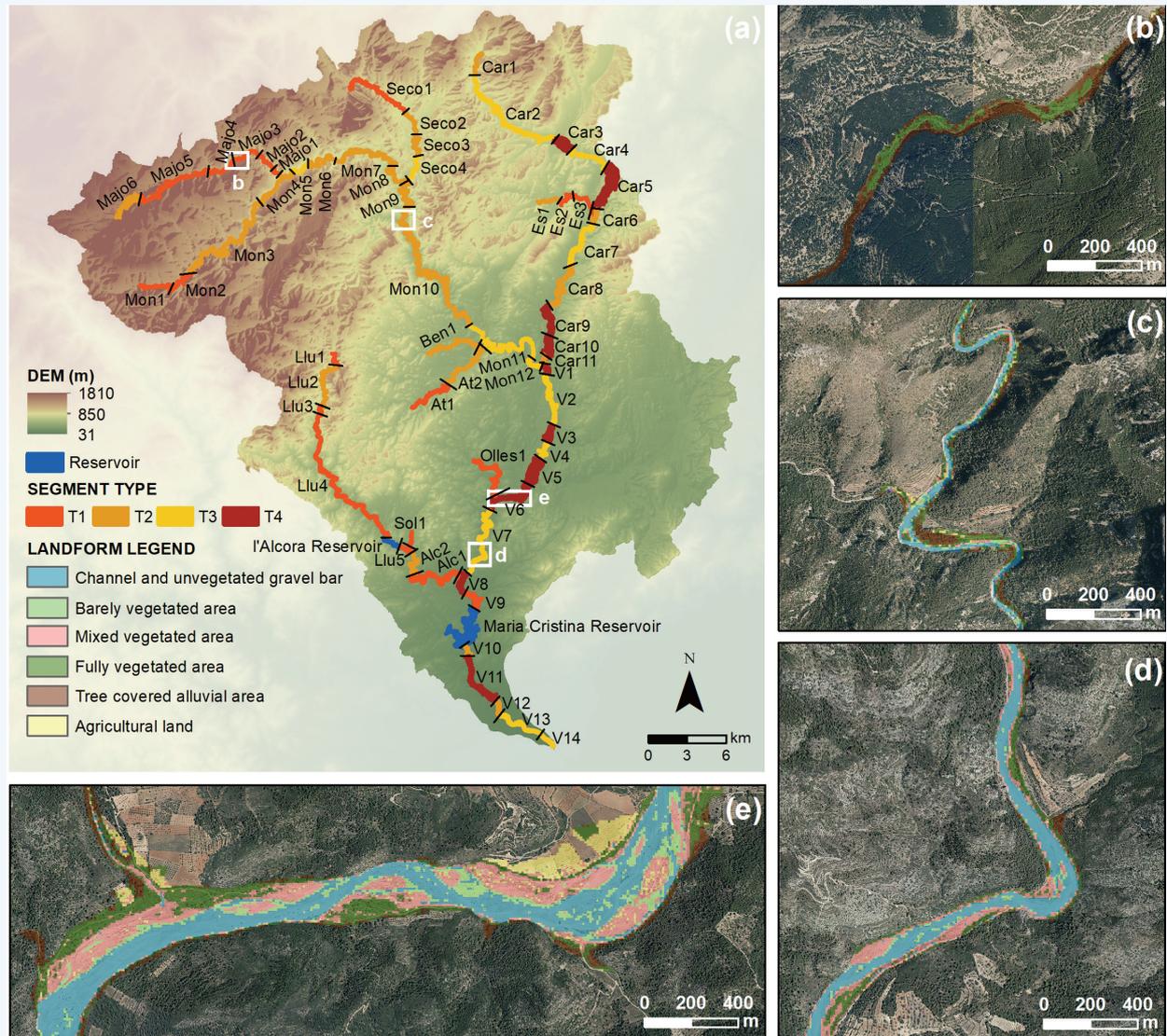


Figura 2. (a) La cuenca de la Rambla de la Viuda y delimitación de los segmentos fluviales por tipos de cauce. (b) Ejemplo del resultado de la clasificación supervisada para el segmento tipo 1. (c) Ejemplo del resultado de la clasificación supervisada para el segmento tipo 2. (d) Ejemplo del resultado de la clasificación supervisada para el segmento tipo 3. (e) Ejemplo del resultado de la clasificación supervisada para el segmento tipo 4. Leyenda: Olles: Barranc de les Olles; Sol: Barranc de la Solana; At: Rambla de Atzeneta; Ben: Rambla de Benafigs; Car: Rambla Carbonera; Es: Rambla dels Estrets; V: Rambla de la Viuda; Majo: Majó; Mon: Montlleó o Río; Seco: Río Seco; Alc: Río Alcora; Llu: Río Lluçena (Rabanaque et al., 2022).

Fuente: IGN (2021), Institut Cartogràfic Valencià (2019), ESA (2020).

4.2. Cambios diacrónicos en el cauce activo

LA RAMBLA DE CERVERA fue la zona elegida para estudiar los cambios diacrónicos en el cauce activo. Las transiciones temporales entre las distintas formas permiten conocer los cambios en la recuperación y estabilización de la vegetación. El resultado de la segmentación de esta rambla han sido 13 segmentos agrupados en tres grupos (Figura 3b). El primer grupo está formado por los segmentos S1-S6. Como se observa en la Figura 3a, en las transiciones entre el primer año de estudio y el último año de estudio existen pocos cambios. En los segmentos de estos grupos predomina el cauce activo y barras sin vegetación y se

aprecia un ligero aumento del lecho en roca, lo que supone que haya una disminución de la vegetación, principalmente en S2, mientras que en S5 se produce un ligero aumento. El grupo 2 está formado por los segmentos S7-S9. Las transiciones que se producen en este grupo son similares a las que se producen en el grupo 1. En la Figura 3a, el S9 muestra estas transiciones. Finalmente, el grupo 3 está formado por los segmentos S10-S13. En la Figura 3a se observa que en los tres últimos segmentos presentan transiciones muy distintas. En todas ellas se produce una recuperación del cauce activo. En 2018, el segmento S11 estaba ocupado casi completamente por vegetación, mientras que en 2021 el porcentaje de vegetación es inferior al 50%. Esto supone que los porcentajes de cauce activo y barras sin vegetación y el lecho en roca han aumentado notablemente. Sin

embargo, estos cambios no son tan acusados en el segmento S12. En este segmento se produce un ligero descenso de los porcentajes de formas vegetadas y lecho en roca, mientras que el cauce activo y barras sin vegetación aumenta un 7%. Finalmente, en el S13 ocurre algo similar a lo que sucede en S11.

En este último segmento, el porcentaje de vegetación no es tan alto como en S11, pero entre las dos formas de vegetación suponen un 24% en 2021. El descenso de las formas de vegetación y lecho en roca hace que el cauce activo y barras sin vegetación pase de un 11% en 2018 a un 48 % en 2021.

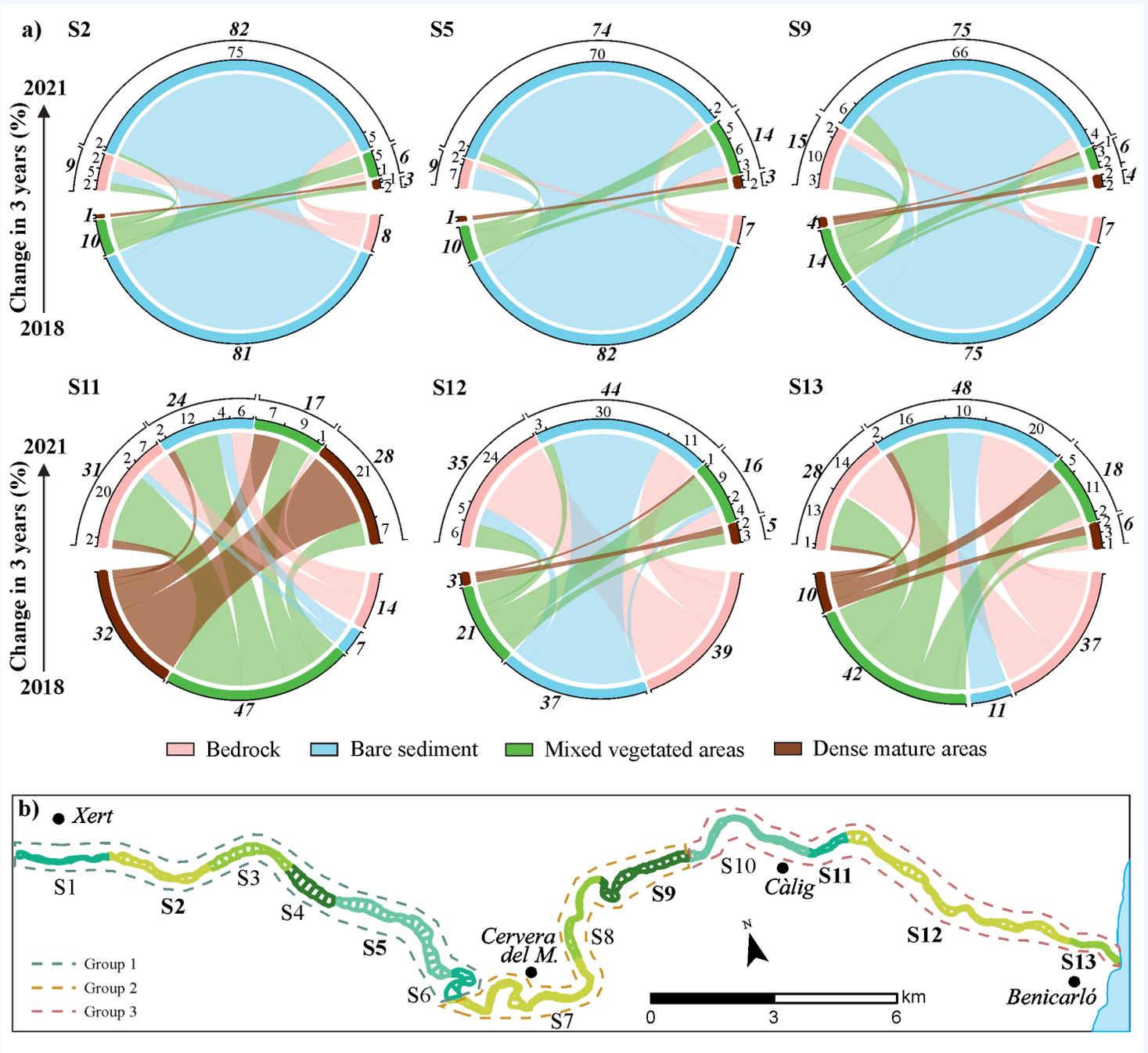


Figura 3. a) Análisis de transiciones en diferentes segmentos a lo largo del río. Los números en negrita y cursiva indican el porcentaje de cada categoría. b) Localización de los 13 segmentos y límites de los grupos de segmentos (G1, G2 y G3) a lo largo de la Rambla de Cervera (modificado de Rabanaque et al., 2024).

Fuente: Institut Cartogràfic Valencià (2023).

5. Discusión

5.1. Controles estructurales y dinámicos en la evolución de los cauces efímeros

LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL de los tipos de cauces está determinada por diferencias geométricas (i.e. anchura del cauce activo, anchura del fondo de valle y gradiente de la pendiente) e hidráulicas (potencia específica de la corriente). La extensión de las distintas formas aluviales depende de las áreas de erosión y depósito, así como del tiempo transcurrido desde la última inundación importante. En este trabajo se observa una tendencia espacial de los tipos de cauce desde las zonas de cabecera (T1 y T2) hasta las zonas más bajas (T3 y T4). Los segmentos pertenecientes a las zonas de cabecera se caracterizan por ser valles confinados que permiten la entrada de sedimentos de las laderas. Esta entrada de sedimentos es mayor en T2 que en T1 debido al cambio de los usos de suelo y la estabilización de la vegetación que se han producido en T1. La abundancia de formas con vegetación madura y de porte alto en T1 indica una alta resiliencia a los cambios morfológicos. Sin embargo, en T2 predomina la forma de cauce activo y barras sin vegetación, lo que sugiere que en este tipo hay mayor cantidad de sedimento disponible que puede ser transportado por los flujos estacionales (Papangelakis y Hassan, 2016). La distribución espacial de los segmentos T3 está definida por las condiciones geológicas y estructurales, siendo el cauce activo continuo a lo largo de valles encajados. Además, la heterogeneidad de formas sin vegetación o con distintos grados de vegetación indican ajustes morfológicos durante las inundaciones. La poca pendiente de estos segmentos permite que el transporte de sedimento sea continuo, aunque su disponibilidad depende de los segmentos situados aguas arriba. Finalmente, los segmentos T4 se encuentran en zonas de depresiones aluviales con fondos de valle muy anchos. En estos segmentos, la potencia específica de la corriente es muy baja, lo que permite que se encuentren mayor diversidad de formas como barras de grava longitudinales, transversales y laterales, características de zonas de deposición (Montgomery y Buffington, 1997; Schumm, 1977). En algunos casos, estas barras tienen distintos grados de vegetación, dependiendo de las veces que han sido afectadas por avenidas.

En general, se observa una tendencia en la distribución de los tipos de segmentos desde las cabeceras (T1 y T2) hasta las tierras bajas (T4), con cambios progresivos en la morfología, sedimentación y capacidad de transporte de los cauces.

5.2. Recuperación de cauces: indicadores y evolución

EN LA RAMBLA DE CERVERA, a partir de la segmentación automática, se han diferenciado trece segmentos (S1-S13) que se han organizado en tres grupos (G1-G3) en función de las características estructurales, hidráulicas y geomorfológicas propuestas por Rabanaque et al. (2022). En este caso, las características geomorfológicas son fruto de las extracciones de áridos del cauce, que han provocado una importante incisión del cauce y una disminución de la cantidad de sedimento en las partes finales de la rambla. Los análisis anuales nos permiten conocer la evolución de las distintas formas fluviales de la rambla.

El grupo G1, formado por los segmentos S1-S6, se localiza en una zona de graben, donde el valle es muy ancho y el cauce está poco confinado. A pesar de la incisión causada por las extracciones, presenta un cauce amplio y activo con barras de grava y zonas vegetadas. Este grupo se encuentra en buenas condiciones geomorfológicas y es el menos sensible a los condicionantes dinámicos (i.e. eventos de crecida), por lo que muestra cambios mínimos a lo largo del tiempo debido a su equilibrio sedimentario. Los segmentos S7-S9 pertenecen al G2. A diferencia del grupo anterior, G2 se localiza en una zona de horst, cuyo control estructural resulta en cauces confinados y estrechos. En este grupo se encuentran múltiples zonas de erosión y algunos lóbulos, lo que indica falta de sedimento en algunas zonas. Es sensible a eventos pequeños o moderados que favorecen la reconexión de la llanura de inundación, ya que pueden remover y arrasar con la vegetación riparia. El último grupo es el G3, formado por segmentos S10-S13. Al igual que el G1, se encuentra en un graben, pero en este caso la anchura del cauce activo es muy inferior debido a que se encuentra incidido en gravas cementadas. En estos segmentos hay poca disponibilidad de sedimentos, por lo que son más sensibles a los eventos de inundación.

En conclusión, mientras que el G1 tiene las mejores condiciones geomorfológicas, los G2 y G3 muestran una mayor sensibilidad y degradación debido a los cambios naturales y antrópicos, siendo el G3 el que se enfrenta a un mayor desafío para su recuperación.

5.3. Papel de las inundaciones en la recuperación

Las CARTOGRAFÍAS GEOMORFOLÓGICAS realizadas en el trabajo correspondiente a las transiciones muestran las distintas respuestas a los eventos durante el periodo de estudio (2018-2021). Los mayores cambios se producen en los segmentos degradados (S10-S13), ya que el sedimento que llega a estas zonas es de menor tamaño, por lo que se moviliza con mayor facilidad incluso con caudales bajos (Hooke, 2016). En estos segmentos, la recuperación es de ~30%, lo que significa que han desaparecido las barras con vegetación de distintos portes debido a la capacidad de erosión de los distintos eventos. Sin embargo, si se observan los cambios anuales, se comprueba que los años en los que no se producen eventos la vegetación

es capaz de estabilizarse. Esto provoca que si durante varios años no se producen eventos la vegetación crece hasta alcanzar cierto porte y, por ello, es más difícil que sea removida por un evento frecuente. Los eventos extraordinarios son los únicos capaces de recuperar parte del cauce arrasando con la vegetación, transportando sedimentos gruesos y finos que pueden generar la acumulación de barras de gravas. Esta recuperación mejora las condiciones geomorfológicas después de las perturbaciones (Fryirs y Brierley 2000). Para poder hablar de recuperación, hay que conocer la condición previa del río (Fuller et al., 2021) y el potencial de recuperación con las limitaciones dinámicas actuales (Fryirs y Brierley, 2000; Brierley, Fryirs, Outhet y Massey, 2002). En el caso de la rambla de Cervera, la recuperación es muy difícil debido a la incisión provocada por décadas continuadas de extracciones de áridos.

6. Conclusiones

LA SEGMENTACIÓN AUTOMÁTICA ha permitido crear objetivamente distintos segmentos con características geométricas similares. Esta segmentación junto con la cartografía creada mediante teledetección, ha permitido establecer distintos tipos de cauces y poder reconocerlos en otros ríos efímeros mediterráneos. Además, la combinación de estas dos metodologías también permite detectar segmentos con alteraciones morfosedimentarias, lo que puede ayudar a los gestores y las autoridades competentes a tomar decisiones sobre la restauración fluvial en los ríos efímeros mediterráneos.

Agradecimientos

ESTA INVESTIGACIÓN ha sido desarrollada dentro del proyecto EPHIDREAMS (PID2020-116537RBI00) financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación MCIN/AEI/10.13039/501100011033, cofinanciado con fondos FEDER, y por la subvención de la Dirección General del Agua (DGA) del MITERD (MNCN-CSIC 20223TE002). La tesis realizada por María Pilar Rabanaque fue financiada por un contrato predoctoral para la formación de doctores 2018 (PRE2018-086771). Este trabajo forma parte de la actividad CSIC-PTI TELEDETECT. Este artículo es una contribución del Laboratorio de Hidrología y Cambio Climático (www.floodsresearch.com; X: [floods_research](https://twitter.com/floods_research); Instagram: [@floods_research](https://www.instagram.com/floods_research)).

7. Bibliografía

- Alber, A. & Piégay, H. (2011). Spatial disaggregation and aggregation procedures for characterizing fluvial features at the network-scale: Application to the Rhône basin (France). *Geomorphology*, 125, 343-360. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.09.009
- Alfredsen, K., Dalsgård, A., Shamsaliei, S., Halleraker, J.H. & Gundersen, O.E. (2022). Towards an automatic characterization of riverscape development by deep learning. *River Research and Applications*, 38, 810-816. DOI: 10.1002/rra.3927
- Ballarín, D. & Mora, D. (2018). *Evaluación del estado hidrogeomorfológico en los ríos efímeros de la CHJ*. Valencia: Confederación Hidrográfica del Júcar.
- Benito, G., Rabanaque, M.P., Sanchis-Ibor, C., Castillo, O., Vázquez-Tarrío, D., Calle, M., Martínez-Fernández, V. & Sanchez-Moya, Y. (2024). Monitorización de cambios geomorfológicos y transporte de carga de fondo durante flujos anuales en la rambla de Cervera (Castellón). *Cuadernos de Geografía*, 112, 195-229. DOI: <https://doi.org/10.7203/CGUV.112.29261>
- Bizzi, S., Tangi, M., Schmitt, R.J.P., Pitlick, J., Piégay, H. & Castelletti, A.F. (2021). Sediment transport at the network scale and its link to channel morphology in the braided Vjosa River system. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46, 2946-2962. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.5225>
- Borg Galea A., Sadler J.P., Hannah D.M., Datry T. & Dugdale S.J. (2019). Mediterranean intermittent rivers and ephemeral streams: Challenges in monitoring complexity. *Ecohydrology*, 12, e2149. DOI: <https://doi.org/10.1002/eco.2149>
- Bozzolan, E., Brenna, A., Surian, N., Carbonneau, P. & Bizzi, S. (2023). Quantifying the Impact of Spatiotemporal Resolution on the Interpretation of Fluvial Geomorphic Feature Dynamics From Sentinel 2 Imagery: An Application on a Braided River Reach in Northern Italy. *Water Resources Research*, 59, e2023WR034699. DOI: <https://doi.org/10.1029/2023WR034699>
- 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. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0143-6228\(01\)00016-9](https://doi.org/10.1016/S0143-6228(01)00016-9)
- Calle, M., Alho, P. & Benito, G. (2017). Channel dynamics and geomorphic resilience in an ephemeral Mediterranean river affected by gravel mining. *Geomorphology*, 285, 333-346. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.02.026>
- Calle, M., Calle, J., Alho, P. & Benito G. (2020). Inferring sediment transfers and functional connectivity of rivers from repeat topographic surveys. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45, 681-693. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.4765>
- Camarasa, A.M. & Segura-Beltrán, F. (2001). Flood events in Mediterranean ephemeral streams (ramblas) in Valencia region, Spain. *CATENA*, 45, 229-249. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00146-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00146-1)
- Cortes, C. & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, 20, 273-297. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00994018>
- Downs, P.W., Dusterhoff, S.R. & Sears, W.A. (2013). Reach-scale channel sensitivity to multiple human activities and natural events: Lower Santa Clara River, California, USA. *Geomorphology*, 189, 121-134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.01.023>
- European Commission. (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- Fryirs, K. & Brierley, G. (2000). A Geomorphic Approach to the Identification of River Recovery Potential. *Physical Geography*, 21, 244-277. DOI: <https://doi.org/10.1080/02723646.2000.10642708>
- Fuller, I.C., Death, R.G., Garcia, J.H., Trenc, N., Pratt, R., Pitiot, C., Matoš, B., Ollero, A., Neverman, A. & Death, A. (2021). An index to assess the extent and success of river and floodplain restoration: Recognising dynamic response trajectories and applying a process-based approach to managing river recovery. *River Research and Applications*, 37, 163-175. DOI: <https://doi.org/10.1002/rra.3672>
- Gallart, F., Cid, N., Latron, J., Llorens, P., Bonada, N., Jeuffroy, J., Jiménez-Argudo, S.-M., Vega, R.-M., Solà, C., Soria, M., Bardina, M., Hernández-Casahuga, A.-J., Fidalgo, A., Estrela, T., Munné, A. & Prat, N. (2017). TREHS: An open-access software tool for investigating and evaluating temporary river regimes as a first step for their ecological status assessment. *Science of The Total Environment*, 607-608, 519-540. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.209>

- Gurnell, A.M., Rinaldi, M., Belletti, B. et al. (2016). A multi-scale hierarchical framework for developing understanding of river behaviour to support river management. *Aquat Sci*, 78, 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00027-015-0424-5>
- Hedger, R.D. & Gosselin, M.P. (2023). Automated fluvial hydromorphology mapping from airborne remote sensing. *River Research and Applications*, 39, 1889-1901. DOI: <https://doi.org/10.1002/rra.4186>
- Hershkovitz, Y. & Gasith, A. (2013). Resistance, resilience, and community dynamics in mediterranean-climate streams. *Hydrobiologia*, 719, 59-75. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1387-3>
- Hooke, J.M. (2016). Geomorphological impacts of an extreme flood in SE Spain. *Geomorphology*, 263, 19-38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.03.021>
- Jaeger, K.L., Sutfin, N.A., Tooth, S., Michaelides, K. & Singer, M. (2017). Geomorphology and Sediment Regimes of Intermittent Rivers and Ephemeral Streams. En Datry, T., Bonada, N. y Boulton, A. (eds) *Intermittent Rivers and Ephemeral Streams*, pp. 21-49. Academic Press. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803835-2.00002-4>
- Kondolf, G.M. (1994). Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining. *Landscape and Urban Planning*, 28, 225-243. DOI: [https://doi.org/10.1016/0169-2046\(94\)90010-8](https://doi.org/10.1016/0169-2046(94)90010-8)
- Martínez-Fernández, V., Solana-Gutiérrez, J., González del Tánago, M. & García de Jalón D. (2016). Automatic procedures for river reach delineation: Univariate and multivariate approaches in a fluvial context. *Geomorphology*, 253, 38-47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.09.029>
- Mateu, J.F. (1974). La Rambla de la Viuda. Clima e Hidrología. *Cuadernos de Geografía*, 47-68.
- Merritt, D.M. & Wohl, E.E. (2003). Downstream hydraulic geometry and channel adjustment during a flood along an ephemeral, arid-region drainage. *Geomorphology*, 52, 165-180. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00241-6](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00241-6)
- Messenger, M.L., Lehner, B., Cockburn, C., Lamouroux, N., Pella, H., Snelder, T., Tockner, K., Trautmann, T., Watt, C. & Datry, T. (2021). Global prevalence of non-perennial rivers and streams. *Nature*, 594, 391-397. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03565-5>
- Mielke, P.W. (1991). The application of multivariate permutation methods based on distance functions in the earth sciences. *Earth-Science Reviews*, 31, 55-71. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(91\)90042-E](https://doi.org/10.1016/0012-8252(91)90042-E)
- Montgomery, D.R. & Buffington, J.M. (1997). Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Bulletin of the Geological Society of America*, 109, 596-611. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1997\)109<0596:CRMIMD>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1997)109<0596:CRMIMD>2.3.CO;2)
- Ollero, A., Ballarín, D., García, J.H., Ibisate, A., Mora, D. & Sánchez Fabre, M. (2021a). Diagnóstico fluvial, impactos en cauces y cambio global: aplicaciones del índice hidrogeomorfológico IHG. *Geographicalia*, 295-316. DOI: https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.2021735191
- Ollero, A., Conesa-García, C. & Vidal-Abarca, M.R. (2021b). Buenas prácticas en gestión y restauración de cursos efímeros mediterráneos: resiliencia y adaptación al cambio climático. Murcia: Editum. Ediciones de la Universidad de Murcia.
- Ollero, A., Conesa-García, C. & Vidal-Abarca, M.R. (2022). A guide to good practices for the management and restoration of mediterranean ephemeral streams: resilience and adaptation to climate change. Murcia: Ediciones de la Universidad de Murcia.
- Papangelakis, E. & Hassan, M.A. (2016). The role of channel morphology on the mobility and dispersion of bed sediment in a small gravel-bed stream. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41, 2191-2206. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.3980>
- R Core Team. (2022). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria [online] Available from: <https://www.R-project.org/>
- Rabanaque, M.P. (2024). Hydromorphological analysis of ephemeral streams: integrating remote sensing and machine learning approaches. Universidad de Zaragoza: Zaragoza.
- Rabanaque, M.P., Martínez-Fernández, V., Calle, M., Castillo, O. & Benito, G. (2024) Spatio-temporal analysis of geomorphic recovery along an altered ephemeral stream using automated image processing, *Geomorphology*, 450, 109069. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109069>

- Rabanaque, M.P., Martínez-Fernández, V., Calle, M. & Benito, G. (2022). Basin-wide hydromorphological analysis of ephemeral streams using machine learning algorithms. *Earth Surface Processes and Landforms*, 47, 328-344.
DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.5250>
- Rinaldi, M., Surian, N., Comiti, F. & Bussetini, M. (2015). A methodological framework for hydromorphological assessment, analysis and monitoring (IDRAIM) aimed at promoting integrated river management. *Geomorphology*, 251, 122-136.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.010>
- Sanchis-Ibor, C., Segura-Beltrán, F. & Almonacid-Caballer, J. (2017). Channel forms recovery in an ephemeral river after gravel mining (Palancia River, Eastern Spain). *CATENA*, 158, 357-370. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.07.012>
- Sanchis-Ibor, C. & Segura-Beltrán, F. (2014). Spatial variability of channel changes in a Mediterranean ephemeral stream in the last six decades (1946-2006). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 40, 89-118. DOI: <https://doi.org/10.18172/cig.2530>
- Schumm, S.A. (1977). *The fluvial system*. Wiley-Interscience: New York.
- Segura-Beltrán, F. & Sanchis-Ibor, C. (2013). Assessment of channel changes in a Mediterranean ephemeral stream since the early twentieth century. The Rambla de Cervera, eastern Spain. *Geomorphology*, 201, 199-214.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.06.021>
- Stubbington, R., Chadd, R., Cid, N., Csabai, Z., Milisa, M., Morais, M., Munne, A., Paril, P., Pesic, V., Tziortzis, I., Verdonschot, R.C.M. & Datry, T. (2018). Biomonitoring of intermittent rivers and ephemeral streams in Europe: Current practice and priorities to enhance ecological status assessments. *Science of The Total Environment*, 618, 1096-1113.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.137>

