

GERARDO BENITO^a; MARÍA PILAR RABANAQUE^a; CARLOS SANCHIS-IBOR^b;
OLEGARIO CASTILLO^c; DANIEL VÁZQUEZ-TARRÍO^d; MIKEL CALLE^e;
VANESA MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ^f; YOLANDA SANCHEZ-MOYA^e

MONITORIZACIÓN DE CAMBIOS GEOMORFOLÓGICOS Y TRANSPORTE DE CARGA DE FONDO DURANTE FLUJOS ANUALES EN LA RAMBLA DE CERVERA (CASTELLÓN)

RESUMEN

La mayor parte de los ríos efímeros mediterráneos (ramblas) se encuentran en un estado notable de degradación después de décadas de impactos humanos severos (e. g. extracción de gravas). La temporalidad del caudal en las ramblas ha contribuido a su abandono social y legislativo. Nuestra compañera Francesca Segura ha sido un referente en el estudio de la evolución y los procesos morfodinámicos de las ramblas y en la lucha por su conservación. En este trabajo del proyecto EPHIDREAMS, del que forma parte, se describen los resultados preliminares de la monitorización de dos tramos de la rambla de Cervera (Castellón) durante flujos efímeros (enero y abril de 2020). Se han dispuesto sensores de

a Departamento de Geología, Museo Nacional de Ciencias Naturales – CSIC, calle Serrano, 115 bis, 28006 Madrid. benito@mncn.csic.es. <https://orcid.org/0000-0003-0724-1790>; m.rabanaque@mncn.csic.es. <https://orcid.org/0000-0002-6551-9351>

b Centro Valenciano de Estudios del Riego, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46007 València. csanchis@hma.upv.es. <https://orcid.org/0000-0002-8795-2922>

c Departamento de Ingeniería Industrial e Ingeniería Civil, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Algeciras, Universidad de Cádiz, 11202 Algeciras, Cádiz. olegario.castillo@gm.uca.es. <https://orcid.org/0000-0001-6020-103X>

d Departamento de Riesgos Geológicos y Cambio Climático, Instituto Geológico y Minero de España, IGME, CSIC, Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid. d.vazquezarrio@igme.es. <https://orcid.org/0000-0002-5658-4426>

e Universidad Complutense de Madrid, Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, C. de José Antonio Novais, 12, 28040 Madrid. mikelcal@ucm.es. <https://orcid.org/0000-0003-1590-6772>; yol@ucm.es. <https://orcid.org/0000-0002-1966-3838>

f Departamento de Sistemas y Recursos Naturales, E.T.S. Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural, Universidad Politécnica de Madrid. vanesa.mfernandez@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-0922-4134>

Fecha de recepción: 20-09-2024. Fecha de aceptación: 30-09-2024.

presión para el registro de calado, sensores de impacto para determinar la intensidad del transporte de carga de fondo y fotogrametría para obtener MDT de alta resolución. De estas técnicas se han obtenido mapas geomorfológicos diacrónicos, modelos hidráulicos bidimensionales y cuantificación de tasas de transporte de sedimento. En el tramo superior (Enroig), ambos eventos registraron un pico de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, observándose cómo su cauce entrelazado y la alta disponibilidad de sedimento permiten una mayor eficiencia en la construcción de formas (barras laterales y mediales incipientes) y el transporte de gravas. En el tramo medio (Cervera del Maestre), con un valle semiconfinado de cauce estrecho y único, se registraron picos de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ (enero) y $120 \text{ m}^3/\text{s}$ (abril). En este tramo, las condiciones de mayor energía y régimen próximo a flujo crítico impidieron la acumulación lateral de barras, dominando el depósito de lóbulos durante la etapa final del hidrograma. Aunque el volumen de sedimento transportado sea modesto (660 m^3 en Enroig y 800 m^3 en Cervera), resulta evidente que estos eventos frecuentes son críticos para mantener la actividad morfológica y la conectividad sedimentaria, impidiendo el estrangulamiento del cauce por crecimiento de la vegetación.

PALABRAS CLAVE: ríos efímeros; cambios morfosedimentarios; monitorización de caudal y transporte de sedimento; recuperación de ríos degradados.

MONITORING GEOMORPHOLOGICAL CHANGES AND SEDIMENT TRANSPORT DURING ANNUAL FLOWS IN THE RAMBLA DE CERVERA (CASTELLÓN)

ABSTRACT

Most Mediterranean ephemeral rivers (*ramblas*) show a significant state of degradation after decades of severe human impacts (e. g. gravel extraction). The seasonal flow in these ramblas has contributed to their social and legislative abandonment. Our colleague Francesca Segura has been a reference in the study of the evolution and morphodynamic processes of the ramblas and in the struggle for their conservation. In this work of the EPHIDREAMS project, of which she is part, we describe the preliminary results of the monitoring of two reaches of the Rambla de Cervera (Castellón) during temporary flows (January and April 2020). Pressure sensors have been used to record the depth, impact sensors have served to determine the intensity of bed load transport, and photogrammetry has been applied to obtain high-resolution DTMs. From these techniques diachronic geomorphological maps, two-dimensional hydraulic models and the quantification of sediment transport rates have been obtained. In the upper reach (Enroig), both events recorded a peak flow of $50 \text{ m}^3/\text{s}$, showing how its braided channel and the high availability of sediment allow a greater efficiency in the construction of forms (incipient lateral and medial bars) and the transport of gravels. In the middle reach (Cervera del Maestre), with a semi-confined valley with a narrow single channel, peaks of $100 \text{ m}^3/\text{s}$ (January) and $120 \text{ m}^3/\text{s}$ (April) were recorded. In this reach, the conditions of higher energy and regime close to critical flow prevented the lateral accumulation of bars, dominating the deposition of lobes during the recession stage of the hydrograph. Although the volume of sediment transported is modest (660 m^3 at Enroig and 800 m^3 at

Cervera), it is evident that these frequent events are critical to maintain morphological activity and sediment connectivity, preventing channel narrowing due to vegetation growth.

KEYWORDS: ephemeral rivers; morphosedimentary changes; flow monitoring and sediment transport; recovery of degraded rivers.

Caldrà educar les noves generacions en una visió més pròxima a la natura, i fer-los entendre que les rambls són rius secs que mai respondran a la imatge idíl·lica i estereotipada d'un riu amb aigua, i que la seua missió consisteix a transportar els sediments més gruixuts de la terra al mar.

Segura-Beltrán (2013)

INTRODUCCIÓN

La rambla de Cervera es un curso fluvial que ha atesorado valores naturales y ha sufrido los impactos observados en otros muchos ríos efímeros del Mediterráneo. Hasta bien avanzado el siglo xx, esta rambla fue un río de piedras, un amplio *codolar* de gravas, cantos y bloques que las crecidas iban desplazando lentamente hacia la mar, siguiendo un ritmo espasmódico. Por su lecho descendían los sedimentos que alimentaban las playas del Baix Maestrat. Sin agua en tiempo seco, los aprovechamientos humanos apenas alteraron el curso de la rambla. Los molinos y los huertos estaban levemente separados de sus márgenes, junto a las fuentes y barrancos tributarios. También las poblaciones y los lugares de culto se localizaban prudentemente a cierta distancia. La rambla fue un espacio natural relativamente secundario para la vida rural, poco transitado y solo frecuentado por *les raberes* (rebaños) que mantenían desnudo el lecho.

A lo largo del siglo xx, las montañas y valles del Maestrat fueron despoblándose y la retirada de sus habitantes redujo la presión humana sobre las laderas de la cuenca, facilitando un proceso de reforestación y reduciendo la llegada de sedimento al cauce. Durante la segunda mitad del siglo, diversas empresas dedicadas a la extracción de áridos se instalaron en la rambla de Cervera, sustrayendo ingentes cantidades de sedimentos que se destinaron a la construcción. Solo entre 1980 y 1988 se retiraron, según las cifras comunicadas por las empresas al organismo de cuenca, 329.639 m³ de sedimento (Pardo, 1991). El volumen detraído del cauce (y el negado al mar), durante seis décadas de intensa explotación, nunca ha podido ser estimado, pero casi con toda seguridad es de un orden de magnitud mayor a dicha cifra. Esta explotación minera intensificó el déficit sedimentario, modificando severamente la morfología fluvial. Entre 1946 y 2006, el cauce se estrechó un 68,5 % y el canal de gravas se encajó, con una incisión media de 3,5 m (Segura-Beltrán y Sanchis-Ibor, 2013). La rambla abandonó su habitual patrón trenzado, y adoptó una forma en planta de canal único. A día de hoy, el lecho del cauce sigue estando compuesto principalmente por cantos rodados y gravas, pero en la parte baja del río, donde el lecho está acorazado, estos materiales solo aparecen de forma intermitente, como plumas aisladas.

Nuestra compañera Francesca Segura ha pasado buena parte de su vida observando, con interés y preocupación, los cambios operados en la rambla, bajando al Pont de la Serafina desde su casa de Xert

cada vez que las aguas tomaban el cauce o transitándola durante largas jornadas de trabajo de campo. Quienes la hemos acompañado hemos disfrutado de una guía excepcional, de su rigor científico y de su afán didáctico, y también de su visión crítica sobre las acciones antrópicas que han alterado severamente el equilibrio sedimentario y la morfología de la rambla. Este artículo es tan suyo como nuestro. Forma parte de un proyecto más amplio de investigación sobre el balance sedimentario de los ríos efímeros mediterráneos (EPHIDREAMS) en el que ella ha participado en los últimos años y en el que hemos compartido muchas horas rambleras. Quizás de forma poco decorosa, la hemos apartado de su redacción. Nos han podido las ganas de que, a la hora de rendir tributo a su trayectoria y agradecer su amistad, lo hiciéramos con un trabajo sobre la rambla que la vio nacer y crecer personal y profesionalmente.

Este trabajo se orienta al que ha sido su objeto preferido de investigación. Se añade a otros, suyos y ajenos, que durante las últimas décadas han analizado el comportamiento hidrogeomorfológico de los sistemas fluviales en contextos de déficit sedimentario. En este tiempo, singularmente desde la publicación del trabajo pionero de Kondolf (1994), se han multiplicado los estudios que han abordado los efectos de la detracción o retención de sedimentos fluviales (Liébault y Piégay, 2002; Surian y Ribaldi, 2004; Rovira et al., 2005; Martín-Vide et al., 2010; García-Ruiz y Lana-Renault, 2011; Scorpio et al., 2015). Con cierto retraso, esta cuestión ha comenzado a analizarse también en los ríos efímeros (Conesa y Pérez, 2014; Calle et al., 2017), a donde llega siempre más tarde el interés humano.

En estos espacios quedan bastantes cuestiones por esclarecer: 1) cómo se desarrollan las trayectorias de ajuste fluvial a las nuevas condiciones hidrogeomorfológicas; 2) qué particularidades presenta la interacción del flujo y las formas del cauce con la vegetación; 3) cómo cuantificar los volúmenes de sedimento desaparecidos; y 4) cómo analizar la conectividad ladera-cauce-litoral, entre otras muchas cuestiones. En los últimos años se están desarrollando nuevas técnicas que van a permitir avanzar en este campo. Estas incluyen el uso de sensores de impacto, teledetección desde drones, aprendizaje automático, modelación topográfica de precisión o modelación hidrológico-hidráulica, entre otras (e. g. Vericat et al., 2017; Sanchis-Ibor et al., 2017; Calle et al., 2020; Rabanaque et al., 2022, 2024). De todo ello, además, deben obtenerse conclusiones determinantes para guiar la gestión futura de estos cauces y sus cuencas (Ollero et al., 2021).

Sobre la rambla de Cervera, que nuestra compañera ha analizado en numerosos trabajos (Segura-Beltrán, 1983, 1990; Segura-Beltrán y Sanchis-Ibor, 2013; Sanchis-Ibor y Segura-Beltrán, 2014; Segura-Beltrán et al., 2020), se pueden plantear varias de estas preguntas y aplicar buena parte de las técnicas referidas, algunas de las cuales se han ensayado con éxito en ríos próximos (Calle, 2019; Rabanaque, 2024). En las siguientes líneas, vamos a centrarnos en estas cuestiones, analizando la respuesta de la rambla a dos eventos de crecida, que tuvieron lugar los días 22 de enero y 1 de abril de 2020, a fin de estudiar los cambios en la morfodinámica y en la vegetación observados durante y con posterioridad a estos episodios. El trabajo emplea modelos digitales del terreno y modelos diferenciales basados en vuelos fotogramétricos, analiza información aportada por sensores de impacto y modelos hidráulicos, y los combina con otras técnicas de análisis hidrológico, geomorfológico y de vegetación. Pretende caracterizar los procesos de erosión y acumulación y relacionarlos con los factores hidrológico-hidráulicos, morfológicos y bióticos que los condicionan. Se trata, en definitiva, de un trabajo orientado a mejorar

la comprensión del comportamiento de los ríos efímeros que llevan varias décadas experimentando procesos de ajuste a las condiciones de déficit sedimentario y a calibrar el potencial de las nuevas técnicas aplicadas al estudio de estos fenómenos.

ÁREA DE ESTUDIO, MATERIALES Y MÉTODOS

La rambla de Cervera

La rambla de Cervera se localiza en el norte de la Comunitat Valenciana, drena una cuenca de 340 km² y presenta una longitud de 44 km con una pendiente media del 1,4 % (figura 1). Su curso atraviesa una secuencia alterna de depresiones y bloques tectónicos (*horst* y *grabens*), resultado de una fase compresiva (Mioceno) y dos distensivas (Terciario-Cuaternario) postorogénicas (Alpinas). En los *horst* predominan los materiales calcáreos mesozoicos apenas karstificados. El graben interior está relleno de sedimentos heterogéneos pliocuaternarios y, en la llanura costera, el río ha formado un abanico aluvial cuaternario, que se superpone a sedimentos detríticos terciarios y coalesce con otros cuerpos sedimentarios similares (Segura-Beltrán, 1995).

La cuenca de drenaje presenta precipitaciones medias anuales que oscilan entre 700 mm en la cabecera (1.160 msnm) y 480 mm en la desembocadura. La máxima precipitación mensual se produce predominantemente en otoño, con un pico secundario en primavera y una marcada estación seca en verano. El caudal en la rambla solo se genera después de fuertes lluvias. La combinación de fuertes pendientes con suelos poco profundos y precipitaciones intensas e irregularmente distribuidas suele generar crecidas que activan el caudal del río con una media de dos a cuatro veces al año, siendo el caudal discontinuo a lo largo del cauce, debido a la permeabilidad de las gravas y el sustrato rocoso (Segura-Beltrán, 1990).

Figura 1. Cuenca de la rambla de Cervera y localización de los dos tramos de estudio en Enroig (1) y Cervera del Maestre (2)



El monitoreo de los cambios morfométricos y de vegetación se ha centrado en dos tramos del curso medio de la rambla (figura 1). El primero se sitúa en Enroig (aldea del término municipal de Xert) y tiene una longitud de 1.148 m. Recibe por su derecha las aportaciones del barranco de Catinells y está atravesado por dos vados de hormigón. El primer vado se corresponde con el Camí del Mas de la Creu (en adelante, vado de Enroig) y está localizado aguas arriba. Tiene una serie de drenajes inferiores algunos obstruidos por sedimento. Sin embargo, el emplazado aguas abajo, en el Camí del Mas de l'Om (en adelante, vado del Barrio), consiste en una batea que permite el paso del agua y sedimento por encima de la vía. El segundo tramo está localizado en Cervera del Maestre, donde la rambla recibe por la derecha el barranco de la Torn. Tiene una longitud de 690 m y está atravesado por dos vados de hormigón. En ambos casos se trata de losas de hormigón enrasadas con el lecho de gravas. Tanto estos pasos como los de Enroig quedan inundados varias horas o días durante cada evento de escorrentía, y requieren la remoción del sedimento para permitir la circulación de vehículos.

Materiales y métodos

El monitoreo de los cambios consta de las siguientes fuentes de datos y técnicas: 1) imágenes aéreas RGB y modelos digitales del terreno obtenidos mediante vuelos de dron antes y después de cada evento para el tramo estudiado; 2) imágenes de fotografía aérea del conjunto de la rambla disponibles anualmente (i. e. junio de 2019 y junio de 2020); 3) registro de nivel de agua cincominutal y altura de flotantes asociados al evento de inundación; 4) sensores de impacto para registro en tiempo real de las partículas de grava transportada como carga de fondo. En este trabajo se describen los cambios geomorfológicos y sedimentarios asociados al año hidrológico 2019-2020, y que incluyen dos eventos de escorrentía ocurridos el 22 de enero de 2020 y el 1 de abril de 2020.

Reconstrucción de MDT y detección de cambios

La reconstrucción 3D de los tramos de estudio se ha realizado con fotogrametría digital (*software* Agisoft Metashape) obtenida mediante vuelos de dron DJI Phantom 4 RTK durante junio de 2019, febrero de 2020 y abril de 2020. La altura de vuelo se fijó en 50 metros con un solape del 80 % horizontal y verticalmente. Para corregir la nube de puntos y localizar correctamente los MDT, se pusieron puntos de control (GCP) distribuidos igualmente por las dos áreas de estudio. Estos GCP fueron tomados con el GPS GNSS Trimble R8. Los MDT y ortomosaicos son generados a partir de: 1) la alineación de las imágenes con alta precisión; y 2) el cálculo de los mapas de profundidad para la generación de la malla con alta calidad. Una vez obtenidos los MDT se calculó su precisión dividiéndolos en dos conjuntos de GCP, utilizados como puntos de control y puntos de validación. En este caso se han utilizado dos tercios de los puntos como control y un tercio como validación.

Los cambios geomorfológicos se pueden cuantificar a partir de la diferencia de MDT (Difference of DEM, DoD en inglés). Esta diferencia es el resultado de la diferencia entre el MDT más reciente y el MDT más antiguo.

Morfometría de los tramos fluviales estudiados en el contexto de la rambla

La cartografía geomorfológica de los dos tramos fluviales se ha efectuado a partir de las imágenes obtenidas por los tres vuelos de dron citados y se ha apoyado en las observaciones realizadas durante las visitas de campo que tuvieron lugar en las mismas fechas que los vuelos. Las dos áreas de estudio se encuentran en dos sectores en los que la rambla atraviesa dos pilares tectónicos (*horst*), por lo que el cauce es más estrecho que en otras zonas del tramo medio y presenta unos claros límites laterales, marcados por taludes verticales. Por ello, la delimitación del cauce cartografiado, efectuada mediante ArcGIS Pro, ha sido sencilla. Se han distinguido nueve unidades para los tres períodos. Tres corresponden a diferentes tipos de cauces: el cauce principal sobre lecho de gravas, los tramos de cauce sobre lecho rocoso y los pequeños cauces que se desarrollan sobre las barras. Otras tres distinguen tres tipos de barras mediales, en función de la vegetación: incipiente cuando predominan las herbáceas anuales; consolidadas cuando hay predominio de la vegetación arbustiva; y muy consolidadas cuando se hallan bajo estrato arbóreo. El mismo criterio se ha utilizado para distinguir tres tipos de barras laterales. La medición de las superficies de estas formas ha permitido cuantificar los cambios morfológicos del cauce.

Registro de calado e hidrograma de los eventos

El calado de agua en tiempo real se obtuvo mediante transductores de presión (PT), en concreto con un Levelogger® Edge Modelo 3001 fabricado por Solinst. Las mediciones de calado se establecieron con un intervalo de tiempo de 5 min. La ubicación del dispositivo se sitúa en ambas zonas en un punto de cota baja de la margen derecha del vado. La corrección de la presión atmosférica para obtener el calado real se realizó mediante *barologgers* situados en las proximidades de los PT. Igualmente, después de cada evento se identificaron restos de flotantes frescos cerca de los PT y a lo largo de los tramos de estudio, siendo localizados su altura y posición mediante GPS GNSS.

Modelización hidráulica

En las zonas de estudio se ha implementado un modelo hidráulico bidimensional mediante el *software* Iber versión 3.2.2 (Bladé et al., 2014), que permite transformar los calados registrados en los *leveloggers* a caudal, así como estimar los caudales asociados a los flotantes. Este modelo Iber resuelve las ecuaciones de aguas someras o de Saint-Venant en un dominio bidimensional mediante esquemas numéricos en volúmenes finitos (Bladé et al., 2014).

La topografía del lugar de estudio se ha obtenido a partir de datos LiDAR, recogidos por el proyecto PNOA en 2017. Se ha empleado esta topografía LiDAR, dado que permite la modelización hidráulica fuera de los tramos de estudio, y por tanto obtener una perspectiva global de las condiciones de la rambla durante los eventos. Las fotografías aéreas muestran que los principales elementos y formas geomorfológicas (barras, bancos e islas) no se han modificado significativamente entre el momento de captura de los datos LiDAR y el periodo analizado en este trabajo (2020).

Registro de la carga de fondo y transporte de sedimento

El transporte de partículas por carga de fondo se ha monitorizado utilizando sensores de placa de impacto “tipo Benson” descritos en Downs et al. (2016) y Soar y Downs (2017), fijados sobre los vados de hormigón que cruzan la rambla (figura 1). Estos dispositivos consisten en una placa de acero inoxidable ($150 \times 130 \times 6$ mm) y un sensor (acelerómetro) acoplado en su parte posterior, el cual es capaz de transformar la vibración causada por el impacto de partículas contra la placa de acero en un impulso eléctrico. El dispositivo instrumental incluye también un registrador de datos Tinytag (*datalogger*) conectado al sensor y que almacena el número de impactos totales durante intervalos de tiempo personalizables. La “placa de impacto” consta, por tanto, de todos los componentes anteriores apilados y alimentados por una batería autónoma.

Esta placa registra impactos asociados con amplitudes de señal superiores a 20 mV e inferiores a 100 V, aproximadamente, y el conteo total se almacena cada 60 s. De acuerdo con la estructura de almacenamiento de datos, el número máximo teórico de impactos registrables es de 255 por intervalo de tiempo, una cantidad adecuada teniendo en cuenta la gran actividad de transporte que se espera durante las inundaciones. Para evitar recuentos duplicados producidos por el propio canto de grava al rodar, se han suprimido los impactos registrados con menos de 0,2 s de diferencia (Calle et al., 2018).

El emplazamiento sobre pasos de camino de hormigón que cruzan a nivel del lecho del río se seleccionó teniendo en cuenta las condiciones críticas de flujo que se generan justo en el borde aguas abajo. Las velocidades y fuerza de corte del flujo en condiciones de régimen crítico evitan que el sensor quede enterrado, al producirse un efecto de lavado sobre la carretera. Los datos se sumaron en periodos de 5 min para ajustarlos a los datos del nivel del agua registrados a intervalos de 5 min. Las placas de impacto aportan una información muy valiosa sobre el comportamiento de los procesos de transporte de sedimentos durante el transcurso de los dos hidrogramas analizados. Igualmente, nos permiten realizar una estimación orientativa del volumen mínimo de carga sólida movilizada. De acuerdo con la información de calibración aportada por el fabricante de los dispositivos, los sensores de tipo D registran impactos de partículas de grava entre 5,5 y 67 mm de diámetro medio. En estudios de laboratorio (Benson com. pers.), se ha podido calibrar de tal forma que 25 impactos equivaldrían a un transporte de 3 kg de sedimento (Calle et al., 2018). Considerando el número de impactos registrados y asumiendo un transporte medio similar en la sección activa del cauce durante diferentes estadios del flujo, se puede estimar el volumen para gravas de caliza de 1600 kg/m^3 de densidad media. Las estimaciones obtenidas con estos sensores corresponden a volúmenes mínimos de transporte, dado que los sensores durante momentos de elevado número de impactos se saturan y no registran adecuadamente. Igualmente, la supresión de los impactos cuando se producen con menos de 0,2 s puede afectar al registro de cantos en momentos de altas intensidades de transporte de fondo.

En paralelo a la medida en campo del transporte de fondo con las “placas de impacto”, también se ha realizado una estimación de las tasas de transporte durante los dos eventos estudiados, mediante el uso de ecuaciones de transporte de sedimento. Entre las múltiples formulaciones propuestas en la literatura para el cálculo de los “arrastres” en ríos de lecho grueso, aquí hemos optado por utilizar la ecuación de

Recking (Recking, 2013; Recking et al., 2016). Se ha decidido aplicar esta ecuación porque ha sido ajustada utilizando una base de datos muy amplia de medidas en campo y laboratorio, las cuales cubren un rango de valores de pendiente (0,0002-0,30 m/m) y de tamaños de partícula (0,1-204 mm) que abarcan los correspondientes a la Rambla de Cervera. Asimismo, un estudio comparativo de fórmulas de carga de fondo realizado por Hinton et al. (2018) indicó que la ecuación de Recking aporta estimaciones adecuadas y mejores que otras ecuaciones propuestas para ríos de lecho grueso.

La ecuación de Recking estima las tasas de transporte de sedimento (q_s ; en m^3/s , utilizando unidades del sistema internacional) a partir de la siguiente expresión:

$$q_s = 14\sqrt{1.65gD_{84}^3} \frac{\tau^{2.5}}{1 + \left(\frac{\tau_m^*}{\tau}\right)^4} B$$

donde g es el valor de la aceleración de la gravedad ($9,81 m/s^2$), D_{84} es el percentil 84 de la distribución granulométrica, B es la anchura del cauce activo y τ^* es el llamado parámetro de Shields:

$$\tau^* = \frac{\tau}{1650gD_{84}}$$

donde τ es el esfuerzo cortante de fondo. Por último, τ_m^* es un valor de referencia del parámetro de Shields que marca un cambio en las condiciones de movilidad del lecho: esto es, la transición desde condiciones de “movilidad parcial” a condiciones de “total movilidad” del lecho. Este valor de referencia se estima a partir de la siguiente expresión:

$$\tau_m^* = (5S + 0.06) \left(\frac{D_{84}}{D_{50}}\right)^{4.4\sqrt{S}-1.5}$$

donde S es la pendiente del lecho y D_{50} es la mediana de la distribución granulométrica.

La aplicación de esta serie de ecuaciones nos permite dar una estimación del volumen de carga sólida asociado a cada valor de caudal. Es decir, esta serie de ecuaciones nos permite establecer una relación única entre caudal líquido y volúmenes de carga sólida. Sin embargo, diversos trabajos han mostrado que las tasas de transporte de sedimento fluctúan enormemente para un mismo valor de caudal, en relación con numerosos procesos tales como oscilaciones en el grado de acorazamiento del lecho (Gomez, 1983; Powell, 1998; Vázquez-Tarrío et al., 2020), cambios en las condiciones de turbulencia del flujo (Nelson et al., 1995), fluctuaciones en el comportamiento de la capa activa (Parker, 2008; Recking et al. 2023), migración de macroformas (Dinehart, 1992; Whiting et al., 1988; Recking et al., 2009; Dhont and Ancey, 2018), colapso de orillas (Molnar et al., 2010) o cambios en los aportes de sedimento (Rickenmann, 2020).

Por tanto, la asunción de una relación unívoca entre caudal líquido y carga sólida, implícita en cualquier ecuación de transporte de sedimento, no es del todo realista. En este sentido, algunos autores

han sugerido que las ecuaciones de transporte de sedimento podrían ser combinadas con distribuciones de probabilidad de los distintos parámetros de entrada y, utilizando métodos de remuestreo estadístico, reproducir las oscilaciones o variabilidad natural en los valores de las tasas de transporte de sedimento (Monsalve et al., 2020; Recking et al., 2024). Usando una aproximación similar a esta, Recking et al. (2024) han logrado reproducir de manera satisfactoria la variabilidad natural en las tasas de transporte de sedimento en el río Severaisse, un río trezado situado en el macizo de los Ecrins (Alpes franceses). Por ello, hemos asumido que también podría representar una “estrategia” adecuada para una primera aproximación a los volúmenes de sedimento transportados en la rambla de Cervera.

Así, basándonos en los resultados del modelo hidráulico bidimensional, hemos asumido una distribución normal para las cortantes. El valor medio de esta distribución ha sido determinado a partir de una curva de correlación entre cortante promedio en el tramo y caudal (establecida a partir de los resultados del modelo hidráulico); como coeficiente de variación hemos utilizado un valor de 0,7, también basándonos en los resultados del modelo hidráulico. Para el valor del D_{84} , hemos utilizado como distribución de frecuencias la curva granulométrica medida en campo. Por último, para la pendiente y la anchura de cauce activo, hemos asumido sendas distribuciones normales, cuyas medias y desviaciones estándar han sido determinadas a partir de varias medidas realizadas directamente sobre los modelos digitales de elevaciones disponibles.

Una vez definidas las distribuciones de frecuencias anteriores, las hemos remuestreado de manera aleatoria y generado una población artificial de 10.000 combinaciones posibles, de los distintos parámetros, para cada valor del caudal (de la serie de caudales quinceminutales disponibles para cada evento de crecidas). De este modo, hemos resuelto la serie de ecuaciones de Recking (10.000 veces para cada caudal) y hemos estimado el valor promedio de carga sólida asociado a cada paso quinceminutal del hidrograma, así como el rango de oscilación natural esperable a un nivel de confianza del 95 %.

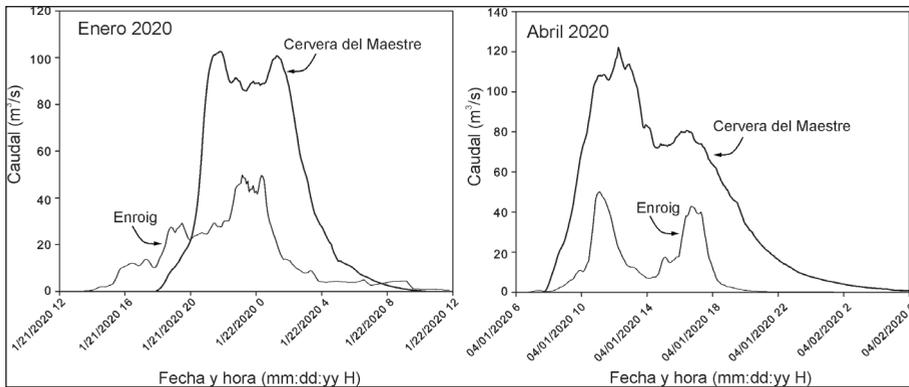
RESULTADOS

En este apartado se describe la magnitud y duración de los caudales producidos durante el invierno-primavera de 2020, cambios geomorfológicos y sedimentarios incluyendo el papel de la vegetación, la relación entre geomorfología e hidráulica y la estimación del volumen y tasa de transporte de sedimento durante los eventos.

Caracterización hidrológica

En los vados de Enroig y Cervera del Maestre se obtuvo un registro de los niveles de inundación en intervalos de 5 min, que se convirtieron a caudal utilizando un modelo hidráulico 2D (Iber). Durante el periodo de estudio se produjeron dos eventos de caudal en la rambla, en concreto el 22 de enero y el 1 de abril de 2020.

Figura 2. Hidrogramas de los eventos de inundación registrados en enero y abril de 2020 en Enroig y Cervera del Maestre. Los caudales se han obtenido de la relación entre calado y caudal a partir de la modelización hidráulica 2D. La cuenca vertiente en Enroig es de 150 km², mientras que en Cervera del Maestre es de 250 km²



En Enroig el hidrograma de enero de 2020 tuvo una duración de 16 h con un pico principal de 50 m³/s (figura 2). En el vado de Enroig el calado alcanzó 0,36 m, mientras que la observación de flotantes aguas arriba muestra una profundidad media de ~1 m sobre el lecho. En el vado de Cervera del Maestre, este evento igualmente registró una duración de 17 h, con un calado máximo de 0,56 m y que corresponde a un caudal de 102 m³/s (figura 2). Aguas arriba del vado, los flotantes asociados a este evento encajan con la superficie de nivel de agua calculada con el modelo hidráulico para este caudal y alcanzan un calado de 1,45 m sobre el lecho.

En Enroig, el hidrograma de abril de 2020 tuvo una duración total de ~12 h y consistió en dos picos de 7 h 30 min y de 4 h 30 min en los que se alcanzaron 50 y 43 m³/s, respectivamente. En el vado de Cervera del Maestre, este evento tuvo una duración de ~26 horas con dos picos de 0,6 m y 0,46 m cuyo caudal se estima en 120 m³/s y 80 m³/s (figura 2). Los flotantes aguas arriba del vado alcanzaron una altura de 1,56 m sobre el lecho de la rambla. En Cervera del Maestre, este evento de abril de 2020 ha sido, por tanto, ligeramente superior tanto en caudal pico como en duración, respecto al evento de enero de 2020.

Cambios geomorfológicos y sedimentarios

Tramo de Enroig

La estructura morfológica del tramo de Enroig se caracteriza por un patrón trenzado de barras múltiples. En este sector la rambla atraviesa un sector con valle relativamente ancho, elevada pendiente (0,02 %), condiciones de alta potencia de corriente, bancos erosionables y material de lecho móvil. Los márgenes del cauce y del propio valle están formados por material aluvial cuaternario, lo que constituye una fuente de sedimentos. La morfología actual muestra múltiples barras mediales y laterales con una dimensión media de 35 m de anchura y 95 m de longitud (figura 3a). En general, se observa una

asimetría de las barras en torno a un cauce dominante que puede modificar su localización en relación a la magnitud del flujo. En el tramo aguas arriba del vado de Enroig, se desarrollan 4 filas de barras en una sección transversal dentro del cauce fluvial (figura 3a). La elevada erosión que presentan estas barras en su cola y el desarrollo de frecuentes nodos de incisión denotan la elevada discontinuidad en el transporte de sedimentos (figura 3b).

Figura 3. a) Mapa geomorfológico de formas fluviales en Enroig para los distintos periodos de estudio. b) Porcentaje de cada una de las formas fluviales en cada uno de los periodos

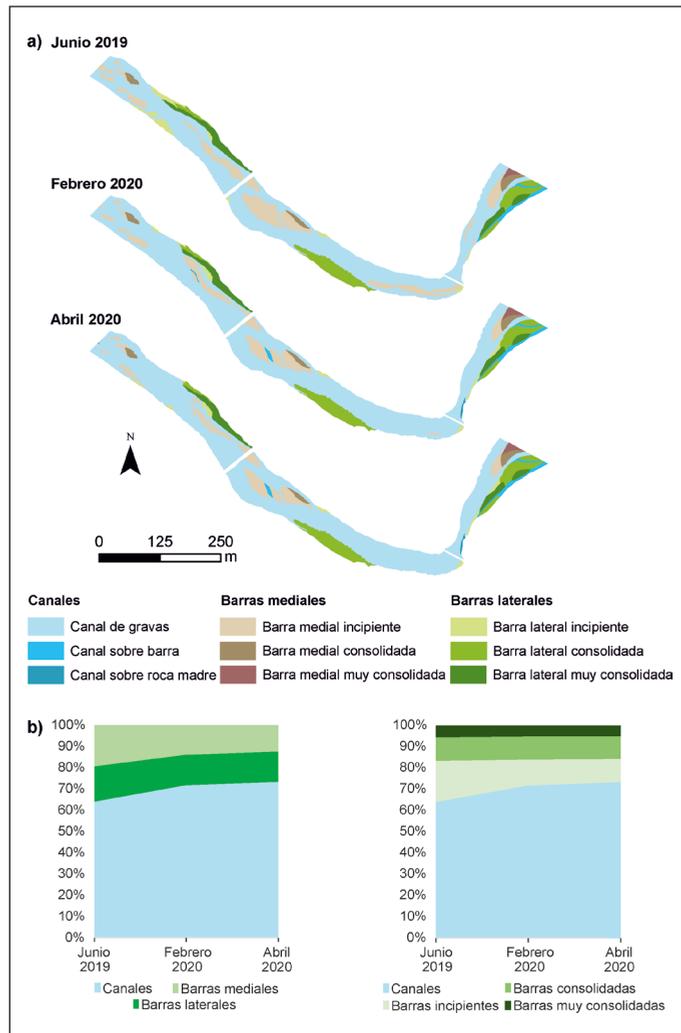
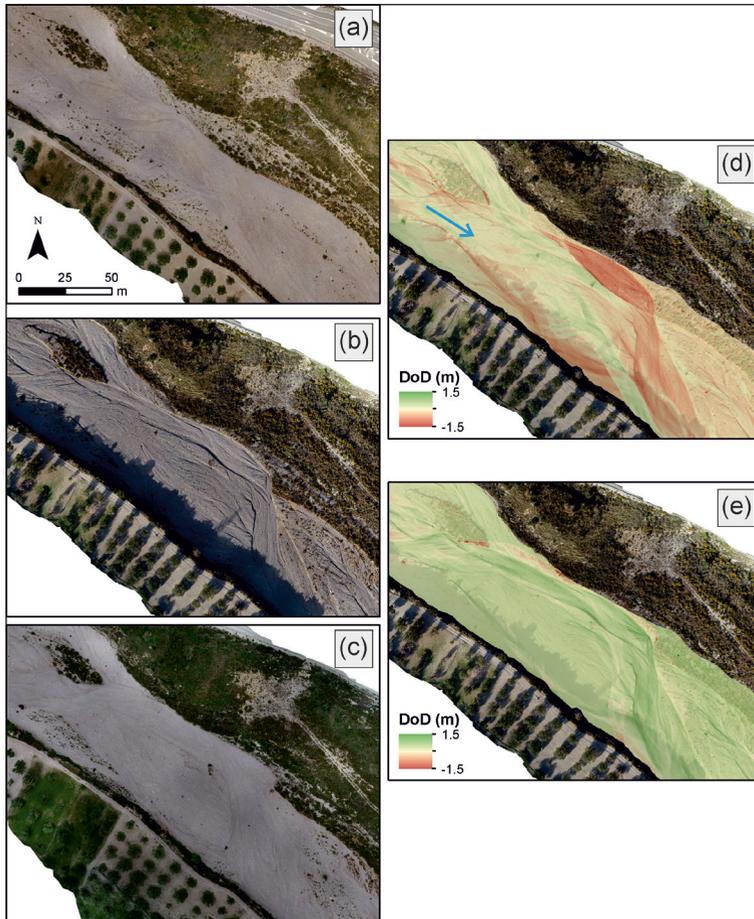


Figura 4. Fotografía aérea realizada con dron a 50 m en el sector aguas arriba del vado de Enroig. a) Junio de 2019: Cauce trenzado con barras mediales, algunas con vegetación incipiente, y derrame lateral en margen izquierdo; b) febrero de 2020: evolución del cauce a un complejo de barras y lóbulos con bordes bien marcados y erosión del banco en margen izquierdo; c) mayo de 2020: evolución del complejo de barras mostrando una primera fase de desarrollo longitudinal y una segunda que corta a las anteriores de desarrollo lateral; d) modelo de diferencia (DoD) entre el MDT de febrero de 2020 menos el MDT de junio de 2019; e) modelo de diferencia (DoD) entre el MDT de mayo de 2020 menos el MDT de febrero de 2020. Leyenda: DoD en metros. Tonos rojos denotan erosión y tonos verdes, agradación. Tonos amarillos indican la ausencia de cambio en la topografía entre MDT. La flecha azul en (d) indica la dirección del flujo



Desde el punto de vista geomorfológico, las dos crecidas ocurridas en enero y abril de 2020 produjeron cambios menores en las dimensiones del cauce en el tramo de Enroig. Sin embargo, los procesos dominantes (depósito y erosión) muestran contrastes entre ambos eventos a pesar de que los caudales pico fueron similares. En efecto, el DoD del evento de enero muestra un predominio de la erosión conducente a la expansión de cauce a expensas de la reducción de algunas barras mediales incipientes observadas en la

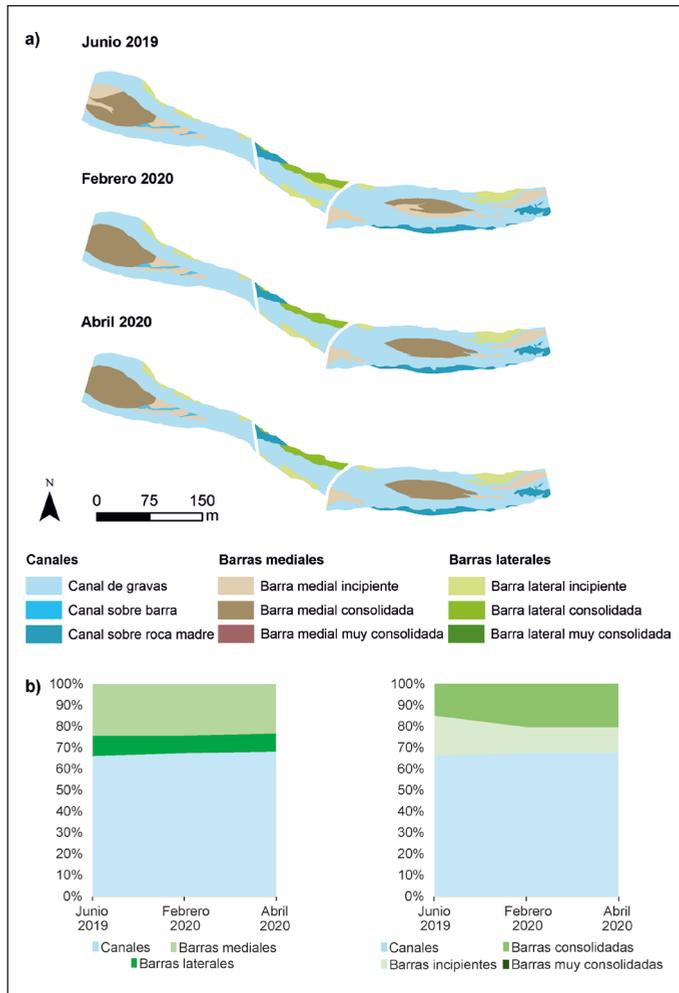
fotografía de 2019 (figuras 3 y 4a y b; tabla 1). En concreto, un complejo de barras mediales desarrolladas aguas arriba del segundo vado desapareció, al igual que se fraccionó otra barra medial aguas abajo del primer vado (figura 3). No obstante, tanto las barras laterales como las barras consolidadas o muy consolidadas por la vegetación apenas sufrieron cambios (figura 3). El cambio más significativo se produjo sobre algunas barras laterales consolidadas por vegetación debido a la erosión lateral del banco aluvial. En la figura 4b, el DoD muestra cómo el banco izquierdo ha retrocedido 15 m hacia el interior a lo largo de 65 m (área: 630 m²; espesor medio: 0,65 m; porosidad: ~30 %), lo que supone una aportación puntual de ~286 m³ de grava (figura 4a, b y d). En el caso del evento de abril, las zonas inundadas fueron similares, pero en general el DoD muestra el predominio de la agradación en el fondo del cauce principal y, en menor medida, en los cauces secundarios que circundan las barras mediales (figura 4e). Los procesos de erosión son menores y se concentran puntualmente en el banco izquierdo y en la cola de algunas barras laterales.

Tabla 1. Área (m²) de las formas fluviales agrupadas por clase para los distintos periodos de estudio en Enroig

	Junio 2019	Febrero 2020	Abril 2020
Cauce	43.659	48.926	49.978
Barras incipientes	13.203	8.319	7.476
Barras consolidadas	7.535	7.443	7.298
Barras muy consolidadas	3.687	3.397	3.333
TOTAL	68.085	68.085	68.085

	Junio 2019	Febrero 2020	Abril 2020
Cauce	43.659	48.925	49.977
Barras laterales	11.360	9.796	9.778
Barras mediales	13.064	9.362	8.327
TOTAL	68.085	68.085	68.085

Figura 5. a) Mapa geomorfológico de formas fluviales en Cervera del Maestre para los distintos periodos de estudio. b) Porcentaje de cada una de las formas fluviales en cada uno de los periodos



Tramo de Cervera del Maestre

La morfología en el tramo de Cervera del Maestre está controlada por el encajamiento del valle en calizas cretácicas. La rambla presenta un lecho aluvial de entre 70 y 100 m de anchura, con frecuentes afloramientos del sustrato rocoso tanto en los laterales como en el fondo del cauce. En general, presenta un cauce único con desarrollo de barras mediales y laterales (figura 5a). En el sector estudiado, la dimensión media de las barras mediales es de 30 m de anchura y 130 m de longitud, mientras que las barras laterales tienen 25 m de anchura y 150 m de longitud. Algunas barras mediales se encuentran

fuertemente consolidadas por la vegetación, y su estabilidad se encuentra favorecida por el afloramiento del sustrato. Los efectos de la extracción de gravas del lecho en este tramo son visibles no solo por la incisión del lecho, sino también por la acumulación de grandes bloques en los márgenes del valle.

Los cambios geomorfológicos ocasionados por las crecidas de enero y abril de 2020 fueron menores y apenas han modificado la extensión de las barras laterales o mediales (figura 5). La extensión de la superficie de agua para los caudales registrados de 100 m³/s y 120 m³/s inundó el cauce fluvial y zonas laterales ocupadas por afloramientos rocosos o cubiertas por vegetación. En las formas de fondo de lecho se observa que el evento de enero de 2020 acumuló lóbulos y mantos de gravas cubriendo algunos afloramientos rocosos del lecho presentes en junio de 2019 (figura 5, 6a y b; tabla 2). La erosión, aunque escasa, se centró en algunos cauces secundarios y en zonas con rugosidad debida a la vegetación y sectores de rápidos donde afloran grandes bloques (figura 6d).

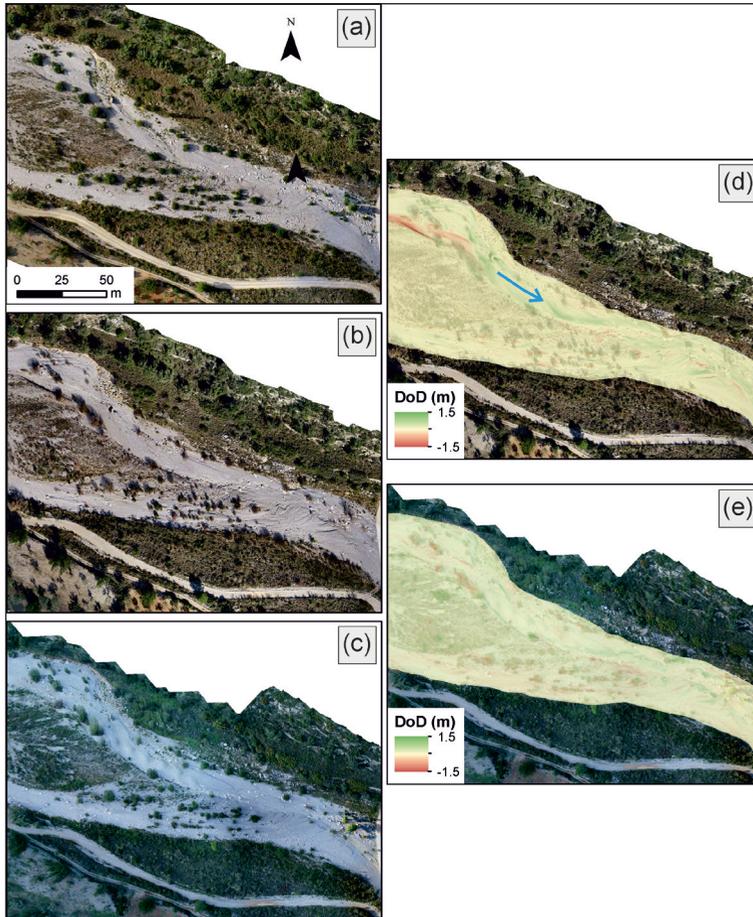
En el evento de abril se repite la distribución de acumulación de lóbulos en el lecho del cauce principal (margen izquierda) (figura 6c), mientras que en el cauce secundario de la margen derecha tiende a predominar la erosión. Las formas de lecho desarrolladas durante el evento de abril de 2020 (figura 6) reflejan condiciones de energía transitorias, posiblemente asociadas a los picos del hidrograma de inundación de 120 m³/s y 80 m³/s. Por ejemplo, aguas arriba del vado, se observa la formación de múltiples lóbulos con frentes de agradación (figura 6c, e). Igualmente, aguas abajo del vado se muestra la formación de frentes de avalancha de lóbulos sobre un lecho parcialmente erosionado, de lo que se infiere una primera fase de erosión del fondo y una posterior acreción frontal de los lóbulos de grava.

Tabla 2. Área (m²) de las formas fluviales agrupadas por clase para los distintos periodos de estudio en Cervera del Maestre

	Junio 2019	Febrero 2020	Abril 2020
Cauce	24.131	24.581	24.581
Barras incipientes	6.843	4.432	4.432
Barras consolidadas	5.412	7.372	7.372
Barras muy consolidadas	-	-	-
TOTAL	36.386	36.386	36.386

	Junio 2019	Febrero 2020	Abril 2020
Cauce	24.131	24.581	24.581
Barras laterales	3.479	3.029	3.029
Barras mediales	8.776	8.776	8.328
TOTAL	36.386	36.386	36.386

Figura 6. Fotografía aérea realizada con dron a 50 m en el sector aguas arriba del vado de Cervera del Maestre. a) Junio de 2019: formas de lecho que evolucionan desde lóbulos de gravas alternantes entorno a un cauce incidido; b) febrero de 2020: lecho con manto plano de gravas con acumulación elongada en la sombra de obstáculos (vegetación y bloques); c) mayo de 2020: lóbulos de grava asociadas a pulsos con importante aporte de sedimento; d) modelo de diferencia (DoD) entre el MDT de febrero de 2020 menos el MDT de junio de 2019; e) modelo de diferencia (DoD) entre el MDT de mayo de 2020 menos el MDT de febrero de 2020. Leyenda: DoD en metros. Tonos rojos denotan erosión y tonos verdes, agradación. Tonos amarillos indican la ausencia de cambio en la topografía entre MDT. La flecha azul en (d) indica la dirección del flujo



Relaciones entre hidráulica y geomorfología

Los valores de calado registrados en el sensor de presión se han transformado en caudal usando la curva de gasto obtenida con el modelo hidráulico 2D (Iber). Las condiciones hidráulicas próximas a calado crítico en el punto del sensor han producido problemas de estabilidad en los registros cincominutales, cuyos valores tuvieron que promediarse cada 15 min. La toma de datos de altura de flotantes asociados

a cada evento registrado permitió comprobar y ajustar las relaciones entre calado y caudal en el punto del sensor de presión. Los parámetros hidráulicos del hidrograma del evento calculados con el modelo hidráulico permiten una cuantificación de las condiciones energéticas asociadas a la erosión, depósito y estabilización de las formas fluviales. En este apartado se describen las principales relaciones de las condiciones de energía del flujo con las formas fluviales cartografiadas.

Enroig

En tramos anchos con fondo aluvial y bancos erosionables, los cauces tienden a establecer una anchura, profundidad y gradiente que minimiza la tasa de disipación de energía. Las formas aluviales se pueden cuantificar en términos del esfuerzo cortante y potencia del flujo que se asocia al trabajo geomórfico del flujo. En el tramo de Enroig, la mayor tasa de disipación de energía se produce en el entorno de los vados, donde el flujo alcanza un régimen supercrítico (figura 7a). Por ejemplo, en el vado del barrio de Enroig se alcanzan valores de cortante de flujo de hasta 535 Pa y potencia de 3600 W/m² (W/m²), capaces de arrastrar bloques de 600 mm de diámetro, mientras que en el vado de Catinells se alcanzan cortantes de 225 Pa y 940 W/m² de potencia, con arrastre de gravas de 230 mm de diámetro. Estas condiciones energéticas explican la incisión de >2 m aguas abajo del vado del Barrio, y de >1m en el vado de Catinells.

En relación con las formas fluviales diferenciadas en la cartografía geomorfológica, los cauces sobre roca presentan la media más elevada de valores de esfuerzo cortante (135 Pa; figura 7a) y potencia (480 W/m²), que explican la ausencia de sedimento de grava con diámetro medio <100 mm. En el caso del cauce de gravas, el valor medio de la cortante es de 50 Pa (150 W/m²), que presenta una escasa variación entre los eventos analizados. Los valores máximos de cortante 100-150 Pa se localizan en el fondo de los cauces trenzados, particularmente en los puntos de confluencia, y en la base de los bancos aluviales. Las barras mediales se asocian a condiciones de energía ligeramente superiores a las barras laterales, con valores medios de 40 Pa y 33 Pa (70 y 50 W/m²), respectivamente (figura 7a). En general, se observa que las barras incipientes se exponen a condiciones energéticas ligeramente superiores que aquellas consolidadas por la vegetación, lo que muestra una paulatina resistencia a la erosión. Por ejemplo, las barras laterales en condiciones incipientes se asocian a esfuerzo cortante medio de 30 Pa, mientras que en su estadio consolidado la cortante media no supera 18 Pa.

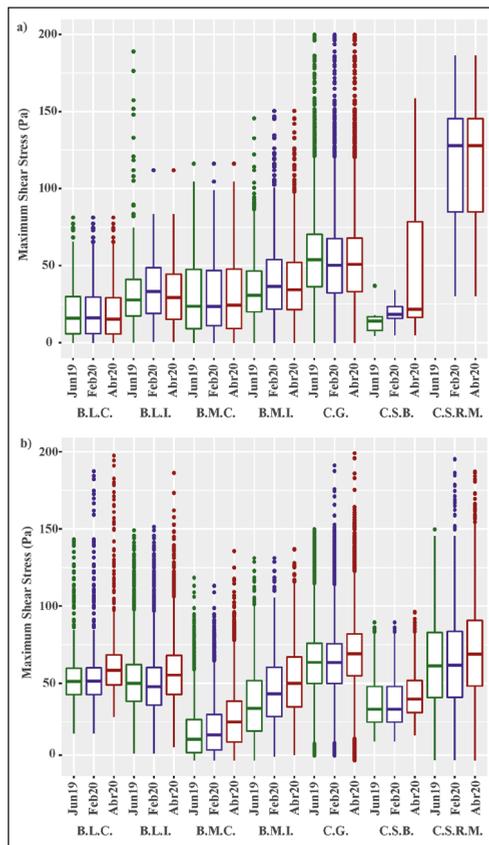
Las velocidades del flujo siguen un patrón similar, con valores medios de 3,5 m/s en los cauces en roca, 2,4 m/s en cauces de gravas, 1,4 m/s en barras incipientes (mediales y laterales), 1,1 m/s en barra medial consolidada y muy consolidada, y 0,7 m/s en barras laterales consolidada y muy consolidada.

Cervera del Maestre

En tramos confinados por sustrato rocoso, las formas fluviales y la vegetación ejercen un papel relevante en la disipación de la energía del flujo. En el tramo de Cervera del Maestre, la elevada pendiente y el confinamiento lateral en roca del cauce conllevan un continuo balance entre las fuerzas inerciales y gravitacionales mostrado en el régimen del flujo. En concreto, el número de Froude en el cauce de gravas nos muestra valores medios de 0,95, mientras que en las barras laterales y mediales incipientes alcanza

valores medios de 1 (régimen crítico) que sugieren condiciones de superficie de agua muy inestables. En su conjunto, las diferencias en las condiciones de energía asociadas al cauce y a las barras laterales no son muy diferentes. En efecto, los valores medios del esfuerzo cortante en el cauce de gravas para caudales de 100 m³/s (figura 7b) y 120 m³/s son de 63 Pa y 69 Pa (potencia del flujo de 180 y 210 W/m², respectivamente), mientras que en las barras laterales incipientes son de 51 Pa y 58 Pa (potencia de flujo de 120 y 150 W/m²). En las barras mediales incipientes las condiciones de energía de flujo son similares, con valores de cortantes de 56 Pa y 64 Pa (potencia de 115 y 142 W/m²) para caudales de 100 m³/s y 120 m³/s. La escasa diferencia de los valores de energía del flujo ejercido sobre diferentes formas indica que, a caudal pico, el conjunto forma parte de la zona de flujo preferente. Así, cada una de las formas actúa en la disipación de la energía (fricción, turbulencia y redistribución de flujo) y en el balance de las fuerzas inerciales y gravitacionales.

Figura 7. a) Energía del flujo en Enroig para un caudal de 50 m³/s asociada a diferentes formas fluviales; b) ídem en Cervera del Maestre para caudal de 100 m³/s (Jun19 y Feb20) y de 120 m³/s (Abr20). Leyenda: B.L.C.: barra lateral consolidada; B.L.I.: barra lateral incipiente; B.M.C.: barra medial consolidada; B.M.I. barra medial incipiente; C.G.: canal de grava; C.S.B. canal sobre barra; C.S.R.M.: canal sobre roca madre



La velocidad media del flujo en el cauce de gravas varía entre 2,6 y 2,8 m/s para caudales de 100 y 120 m³/s, siendo similares a las calculadas en la unidad de barra lateral incipiente de 2,16 y 2,38 m/s, y en la barra lateral consolidada con 2,35 y 2,57 m/s. En el caso de las barras mediales, la velocidad de flujo varía entre los 1,9-2 m/s en su estadio incipiente y los 1-1,2 m/s en su estado consolidado. En las condiciones medias de cortante del flujo, el diámetro medio de las gravas que arrastra el cauce de gravas se encuentra en el rango de los 80 y 100 mm, aunque puntualmente el diámetro crítico puede alcanzar los 150-200 mm.

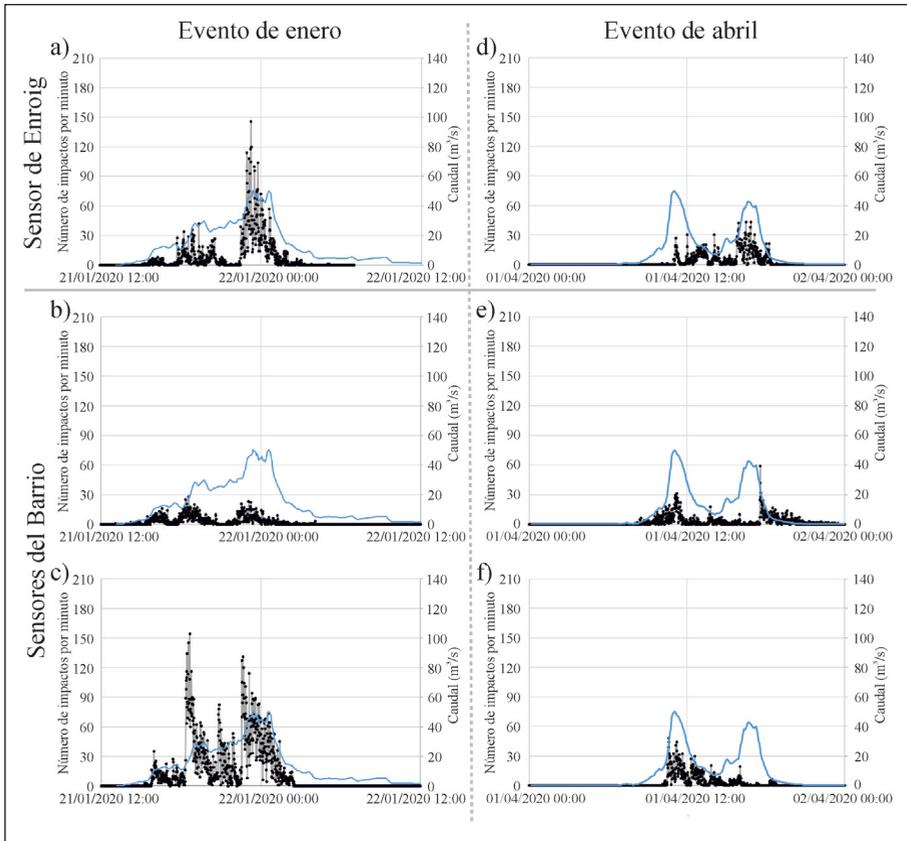
Estimación del volumen y tasa de transporte de sedimento

Después de mostrar la hidráulica y los cambios geomorfológicos registrados tras los eventos de crecida, en este apartado se describen los resultados del transporte de sedimento obtenidos de los sensores de impacto y la aplicación de ecuaciones de transporte de carga de fondo.

En Enroig (vado de Catinells) se ha estimado, mediante la ecuación de Recking, un volumen de sedimento transportado durante el evento de enero de 339 m³ (200-533 m³, con un rango de incertidumbre del 95 %). En el sensor instalado en el vado de Catinells se registraron 8.320 impactos durante el mismo evento. Asumiendo una anchura media de 70 m y según las especificaciones del fabricante, que estima un transporte de 3 kg de sedimento por cada 25 impactos en sensores de mayor sensibilidad, se puede hacer una aproximación conservadora del volumen de sedimento que ha atravesado la sección. Así, teniendo en cuenta una densidad de la grava de 1.600 kg/m³, estos impactos suponen un transporte total durante el evento de 291 m³. En el vado del Barrio, con dos sensores instalados en las partes interna y externa de la curvatura del cauce, se registraron 3.071 impactos y 18.304 impactos, respectivamente. Suponiendo un transporte homogéneo en la sección de 45 m de anchura, proporciona una horquilla de volumen mínimo de sedimento transportado de entre 69 y 412 m³. Por tanto, los valores estimados con la ecuación y los esperados a partir del número de impactos registrados se encuentran en el mismo orden de magnitud y son coherentes entre sí.

La distribución del transporte (impactos) en relación con el hidrograma (figura 8a, b y c) muestra que la respuesta sedimentaria es mayor en los momentos de ascenso de caudal, cuya punta de transporte la alcanza antes que el máximo de flujo (Enroig y Barrio). Igualmente, se observa cómo el sensor de Enroig (figura 8a) presenta una respuesta de mayor magnitud correspondiente al tramo de más caudal. Sin embargo, los sensores del Barrio (figura 8b, c) muestran dos picos de transporte similares en respuesta a caudales diferentes, de 30 y 50 m³/s. Además, se puede observar la histéresis del transporte en ambos casos, aunque es más clara en el Barrio, donde el sensor del margen derecho registra una intensidad de impactos o transporte que disminuye rápidamente sin una disminución del caudal (figura 8c). Esta diferencia de comportamientos entre vados se puede argumentar desde varios puntos de vista: 1) la sección más ancha del vado de Enroig puede conducir a la migración del cauce principal o de las barras y afectar al transporte, mientras que la sección estrecha en el Barrio permite obtener valores más representativos del comportamiento general como respuesta al hidrograma, o 2) la inyección de agua y sedimento que vierte aguas abajo del vado de Catinells podría aportar sedimento extra durante el primer pico del hidrograma en el Barrio.

Figura 8. a) y d). Número de impactos por minuto registrados en el vado de Enroig durante el evento de enero y abril. b) y c), e) y f) Número de impactos por minuto registrados en el vado del Barrio durante el evento de enero y abril en los dos sensores instalados



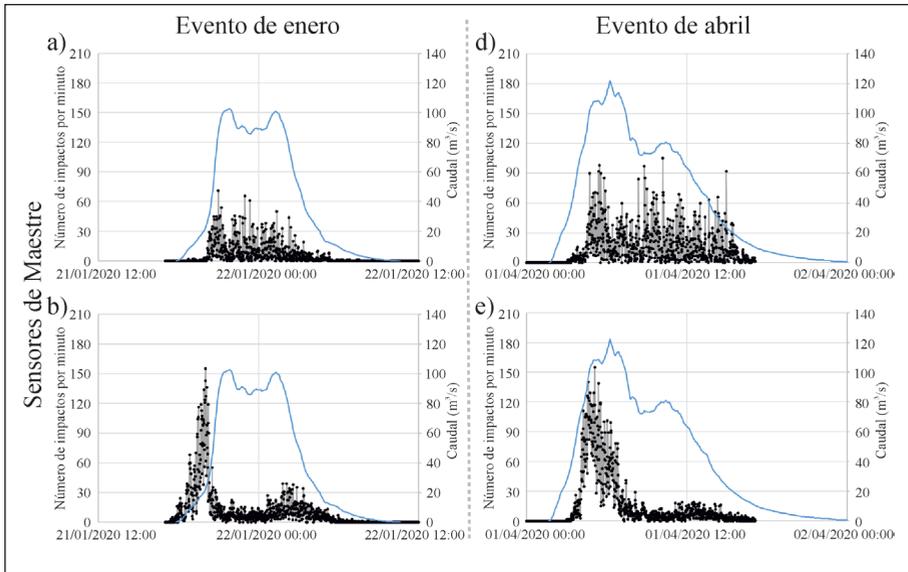
En el evento de abril de 2020, se ha estimado un transporte de sedimento en el tramo de Enroig de 220 m^3 mediante la ecuación de Recking, con un rango de incertidumbre de $113\text{-}386 \text{ m}^3$ al 95 % de confianza. En este evento, el sensor del vado de Enroig (Catinells) registró 3.811 impactos (figura 9d), que suponen un transporte total de 133 m^3 . En el vado del Barrio, los sensores registraron 3.197 y 3.007 impactos (figura 9e, f), que resultan en un volumen mínimo de transporte de 72 y 68 m^3 , respectivamente. Nuevamente, los valores registrados con las placas de impacto y los estimados con la ecuación de transporte de sedimento se encuentran en un mismo orden de magnitud. Además, también llama la atención la notable diferencia en la magnitud de la respuesta respecto al evento de enero. A su vez, si observamos las respuestas de forma individual en cada vado frente a un hidrograma de dos curvas de ascenso muy marcadas, vemos que la distribución temporal de los impactos difiere en Enroig y el Barrio. En la sección ancha de Enroig (figura 8e), observamos una respuesta casi nula al primer

aumento de caudal y después un progresivo aumento de la intensidad del transporte que sí que coincide con el máximo caudal del segundo ascenso del hidrograma. Sin embargo, en el caso de la sección más confinada del Barrio, observamos una mayor respuesta al primer ascenso, esta vez sin una histéresis clara. En el segundo ascenso de caudal, tenemos una respuesta casi nula hasta prácticamente el final del hidrograma, donde se observa un pico bastante marcado en el sensor del margen izquierdo (figura 8e).

En la sección de Cervera del Maestre, el transporte total de sedimento estimado con la ecuación de Recking para el evento de enero de 2020 es de 313 m^3 (con un rango de incertidumbre al 95 % de entre 190 y 491 m^3). Los sensores instalados en el vado registraron un total de 5.821 y 11.877 impactos (figura 9a, b), que suponen un transporte homogéneo en la sección de 52 m de anchura, y si realizamos la misma transformación que en el caso anterior, podemos obtener una horquilla de volumen mínimo de sedimento transportado de entre 151 y 309 m^3 . En el evento de abril, la estimación de transporte de sedimento con la ecuación de Recking ha sido de 483 m^3 (en un rango al 95 % de entre 288 y 652 m^3). A su vez, los sensores de impacto contabilizaron un total de 15.158 y 16.079 impactos (figura 9c, d). De nuevo, suponiendo de nuevo un transporte homogéneo en la sección, la horquilla de volumen mínimo de sedimento transportado se estima entre 394 y 418 m^3 de grava. Por tanto, en la sección de Cervera de Maestre los valores registrados con las “placas de impacto” parecen coherentes con las estimaciones realizadas con la ecuación de transporte de sedimento de Recking.

Si atendemos a la distribución temporal de los impactos y su respuesta al hidrograma, podemos observar una respuesta similar en ambos eventos, a pesar de presentar diferentes curvas de ascenso y descenso del caudal (figura 9). En este caso de cauce confinado, vemos que existe una respuesta mayor al comienzo del hidrograma y antes de alcanzar el pico de caudal, sobre todo visible en el sensor de la parte derecha (figura 9b, d). En ambos eventos vemos cómo la intensidad de los impactos desciende rápidamente hacia la mitad del hidrograma, y se mantiene más o menos constante durante el resto del evento. Sin embargo, se observa un cierto aumento en la parte final descendente del hidrograma (figura 9b, d). En el caso del sensor del margen izquierdo, vemos que presenta un comportamiento progresivamente descendente tras el pico inicial en ambos eventos (figura 9a, b). En este caso parece claro que la señal sedimentaria aparece distorsionada probablemente por la saturación del sensor frente a una alta tasa de transporte. Este hecho que queda representado sobre todo en el gráfico de la figura 9, donde se observa una fuerte variación de impactos por minuto en momentos cercanos en el tiempo (1-2 min).

Figura 9. a) y b) Tasa de impactos por minuto en el vado de Cervera del Maestre durante el evento de enero en los dos sensores instalados. c) y d) Tasa de impactos por minuto en el vado de Cervera del Maestre durante el evento de abril



DISCUSIÓN

El diseño experimental y metodológico implementado en este estudio proporciona datos precisos y fiables sobre la dinámica de cambio morfológico y de transporte de sedimentos durante eventos frecuentes, contribuyendo así al estudio de procesos hidrológicos y geomorfológicos operativos en la actualidad. Este análisis de la dinámica actual nos permite avanzar en el entendimiento de las condiciones “naturales” de referencia, así como cuantificar las tasas de los procesos e identificación de los desequilibrios en diferentes sectores de las ramblas.

En esta sección discutimos sobre el diseño experimental de campo, la respuesta geomorfológica a eventos frecuentes de baja magnitud, las tasas de recuperación y fuentes de sedimento, y las posibles estrategias de gestión del sedimento para la recuperación de la integridad morfosedimentaria de los ríos efímeros mediterráneos.

Evaluación del diseño experimental de campo y la modelización morfodinámica

La caracterización de los procesos fluviales y la evolución de formas requieren de técnicas que registren no solo los cambios entre el estadio inicial y final asociado a cada evento, sino también del flujo de agua y sedimento durante los eventos. La fotogrametría con vuelos de dron permite determinar los cambios geomorfológicos en planta, mientras que los cambios volumétricos se obtienen con la diferencia

de MDT previos y posteriores al evento (DoD). Por otro lado, la instalación de sensores de nivel de agua y de placas de impacto que registran el conteo de las partículas de grava proporcionan información sobre el hidrograma del evento y la respuesta en tiempo y frecuencia de las tasas de transporte de carga de fondo. Esta información se ha combinado con cartografía geomorfológica diacrónica, modelos hidráulicos bidimensionales para estimar las condiciones de energía y trabajo geomórfico durante el evento, y cálculos de transporte de sedimento total a partir de ecuaciones de carga de fondo. Este diseño experimental de campo no está exento de problemas cuya solución, en la mayoría de los casos, requiere un proceso de prueba y error, dado que cada tramo o sector del río requiere de variantes en el diseño experimental general.

En este diseño experimental son diversos los desafíos encontrados: 1) búsqueda de un emplazamiento con sección transversal estable y sin acumulación de gravas durante el evento; 2) posible presencia de condiciones hidrológicas cambiantes que pueden afectar a la consistencia de las mediciones de los sensores; 3) calibración de la instrumentación y posibles desajustes debido a las condiciones extremas de campo; y 4) descarga de datos, incluida la reparación de equipos en caso de daños, y manejo de gran cantidad de datos, que puede verse comprometida por errores humanos o tecnológicos.

En la búsqueda de un emplazamiento sobre lecho estable, se sugiere la instalación de los sensores sobre carreteras transversales y, particularmente, en vados de hormigón enrasados en el lecho del cauce. Se recomienda evitar vados o estructuras que presenten colectores o drenajes inferiores, ya que alteran la dinámica hidrosedimentaria. Idealmente, los sensores de presión para el registro de calado se deben localizar en el lateral y en posición horizontal, aunque, en la práctica, resulta imposible encontrar bancos verticales estables. En los tramos de estudio, se posicionaron en el lateral e insertados en una perforación realizada en el vado de hormigón. En el caso del nivel de presión, se recomienda su instalación en el sector de hormigón aguas arriba del vado, dado que en el inferior se genera una sobreaceleración del flujo que aumenta la inestabilidad de las medidas del sensor. Por otra parte, se recomienda la instalación de los sensores de impacto aguas abajo del vado, pues la aceleración del flujo impide que termine enterrado en gravas. Las tapas que cubren los sensores tienen que enrasar con la superficie del hormigón, ya que de otro modo son fácilmente arrancadas por la corriente de agua y el arrastre de gravas. Los resultados de las placas de impacto en términos de volumen de sedimento transportado requerirían de un proceso de calibración individual para cada placa. En este sentido, el volumen de sedimento transportado basado en el número de impactos en las placas se debe de tomar con cautela y como valor mínimo y aproximado.

Respuesta geomorfológica a eventos de flujo en la rambla

La cartografía geomorfológica de los tramos estudiados muestra que durante los eventos anuales se producen cambios menores. Estos eventos contribuyen a mantener las secciones activas sin vegetación anual y evitar la consolidación de la vegetación arbustiva. Sin embargo, desde el punto de vista de trabajo geomórfico y transporte de sedimento sus efectos son discretos. La respuesta geomorfológica a estos eventos menores es desigual entre los tramos estudiados, y depende de factores estructurales (anchura de cauce y patrón fluvial) y factores dinámicos (magnitud y duración de los eventos).

El tramo de Enroig se localiza en la parte media-alta de la cuenca, caracterizado por un cauce trezado dentro de un valle aluvial ancho. En este tramo, la capacidad de transporte está limitado por el caudal (Q 50 m³/s) y el escaso calado (d : 0,45 m en cauce) que se genera en inundaciones anuales. El modelo hidráulico bidimensional muestra un patrón en el esfuerzo cortante variable y complejo, con valores de la cortante esfuerzo más elevados en los canales que componen el cauce trezado y particularmente en aquellos más estrechos y profundos y en las zonas de convergencia entre ellos (figura 10a). En los cauces trezados, los valores medios del número de Froude (>1) muestran un régimen rápido con velocidades medias de 2,4 m/s y un esfuerzo cortante medio de 52 Pa. Este valor de esfuerzo cortante implica que a caudal máximo el flujo transporta tamaños de grava de hasta 64 mm, siendo coherente con las fracciones granulométricas (1-44 mm) muestreadas en campo (tabla 3). En las partes altas de las barras laterales

Tabla 3. Resultado de las granulometrías de muestras de sedimento transportado en enero de 2020 (arriba) y abril de 2020 (abajo). Leyenda: Sup.: muestra tomada aguas arriba del vado. Inf.: muestra tomada aguas abajo del vado. El sector se refiere al nombre del vado

Sector	Enroig sup.	Enroig inf.	Cervera sup.	Cervera inf.
% finos (<2 mm)	1,1	0,4	1,4	8,3
D5 (mm)	4	5	4	1
D16 (mm)	8	7	9	9
D25 (mm)	10	9	12	13
D50 (mm)	16	15	18	21
D75 (mm)	24	25	24	31
D84 (mm)	30	30	28	38
D95 (mm)	44	57	72	61

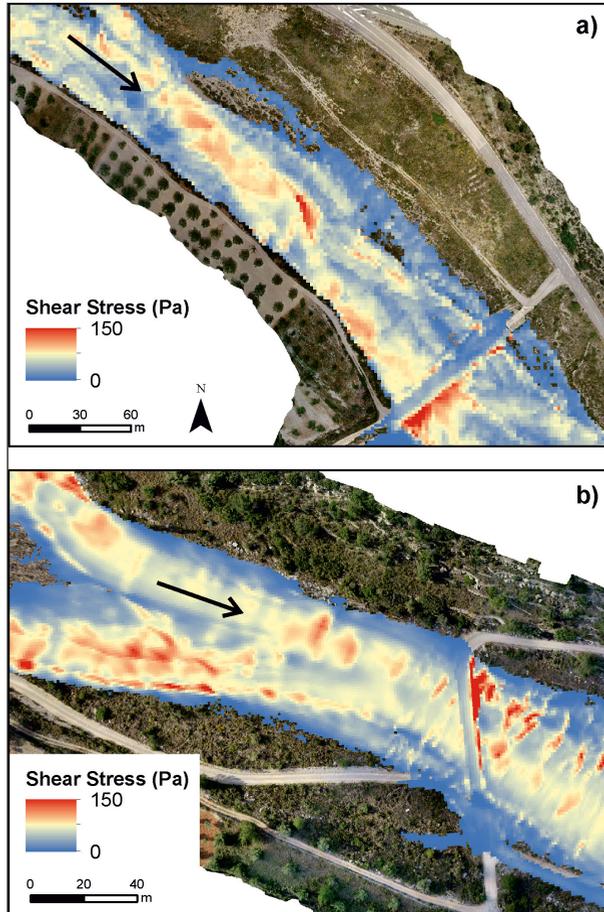
Sector	Enroig sup.	Enroig inf.	Cervera sup.	Cervera inf.
% finos (<2 mm)	1,7	3,4	3,1	2,7
D5 (mm)	4	3	3	3
D16 (mm)	7	8	9	9
D25 (mm)	9	10	12	12
D50 (mm)	15	17	18	21
D75 (mm)	25	25	32	31
D84 (mm)	33	29	50	46
D95 (mm)	44	40	79	70

y mediales, el esfuerzo cortante medio varía entre 30-38 Pa, con arrastre de partículas de 38-48 mm. Por tanto, el patrón de distribución espacial de la cortante y la potencia del flujo sugieren que la mayor parte del trabajo geomórfico y la disipación de la energía se concentran en los cauces trenzados y alrededor de los obstáculos o márgenes de barras e islas, mientras que, en las barras laterales y mediales, con menor transporte, presentan tendencia a la agradación. Las zonas de acumulación coinciden con la expansión local del flujo (figura 10a), zonas aguas abajo de obstáculos (grandes bloques, vegetación e islas) y zona interna de las curvaturas del cauce. De forma puntual, se observa la formación de *crevasse splay* o inyección de gravas por encima del banco del cauce o sobre barras aluviales, que conlleva el arrastre parcial de la vegetación.

El tramo de Cervera del Maestre se localiza en la parte media de la cuenca y, estructuralmente, corresponde a un pilar tectónico (*horst*) que genera un encajamiento del valle fluvial con estrechamiento del cauce. Los caudales asociados con crecidas anuales o estacionales aumentan respecto al tramo de Enroig, registrándose caudales de 100 y 120 m³/s para los eventos de enero y abril de 2020. El cauce en Cervera del Maestre aumenta su pendiente y se alternan tramos rectos de cauce único con barras mediales e islas (en aluvial o sustrato rocoso) que fuerzan la división del cauce. El valor medio del número de Froude en las diferentes unidades fluviales se sitúa próximo a 1 (flujo crítico o mínima energía específica), representando una condición de equilibrio inestable (Grant, 1997). En detalle, se muestra un mapa con bandas transversales a la dirección del flujo donde alteran valores próximos a régimen crítico (Froude:1). En estas condiciones las perturbaciones del lecho generan ondas estacionarias debido al balance entre fuerzas inerciales y gravitacionales. Estas ondas se pueden observar igualmente en otros parámetros de energía del flujo, como el esfuerzo cortante y la potencia del flujo (figura 10b). En el caso de Cervera del Maestre, la zona de flujo preferente se extiende no solo al cauce de gravas, sino que alcanza el margen del valle, donde la rugosidad aumenta con la densidad de la vegetación. Por tanto, las diferencias del esfuerzo cortante medio entre las diferentes formas fluviales son pequeñas, indicando una activación generalizada de la geomorfología y los procesos en las zonas con lámina de agua de inundación.

En la distribución espacial de la erosión y depósito, se muestran sectores donde se excede la capacidad del transporte de sedimento y que se reflejan en la erosión con formación de pozas y rápidos donde afloran bloques y sustrato rocoso desnudo (figura 6). Estas zonas se localizan en la base de bancos laterales y aguas abajo de los vados que atraviesan la rambla (figura 10). Las zonas de acumulación de gravas en el cauce se localizan aguas abajo de las zonas de erosión y en zonas protegidas aguas abajo de obstáculos, como la vegetación, y en salientes rocosos en el lateral del valle. Los lóbulos de gravas observados en las fotografías aéreas, avanzando sobre fondos planos y carentes de gravas, sugieren una fase inicial de alta capacidad de transporte que activa el sistema morfológico en su conjunto, y una segunda fase durante la rama descendente del hidrograma donde domina la sedimentación asociada al avance de los lóbulos de grava. Posiblemente, el decaimiento rápido del caudal favorece la preservación de los lóbulos de gravas y sus frentes de avalancha.

Figura 10. Distribución del esfuerzo cortante durante el caudal máximo del evento de enero de 2020 obtenido con el modelo hidráulico bidimensional. a) Tramo de Enroig aguas arriba del vado con un caudal de $50 \text{ m}^3/\text{s}$. b) Tramo de Cervera del Maestre aguas arriba del vado para un caudal de $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Las flechas negras indican la dirección del flujo



Tasa de transporte y fuentes de sedimento

En diversos estudios (Bagnold, 1977; Nanson y Croke, 1992; Parker et al., 2011; Gómez y Soar, 2023) se ha empleado el concepto de potencia total de flujo (*total stream power*) como indicador de la energía total disponible para realizar trabajo geomórfico. Este trabajo se traduce en la modificación de las dimensiones del cauce (e. g. anchura, movilidad) y en el balance sedimentario (depósito y erosión).

En Enroig, la potencia de flujo acumulada (PFA) durante el evento de enero se estima en $1992 \text{ kJ}/\text{m}^2$, que refleja una mayor capacidad de cambio geomórfico que los $1447 \text{ kJ}/\text{m}^2$ del evento de abril de 2020. La PFA está relacionada con el volumen y la duración del hidrograma, que en el caso de enero registró 1,18

hm³ de caudal líquido y 1590 minutos de duración, mientras que en abril se registraron 0,74 hm³ durante 1365 minutos. Estos valores son coherentes con la estimación de 339 m³ de sedimento transportado en enero, respecto a los 220 m³ obtenidos para el evento de abril. En Cervera del Maestre la energía total disponible para realizar trabajo geomórfico durante el evento de enero se estima en 3.913 kJ/m² para un volumen de flujo de 2,47 hm³, con 1.010 minutos de duración. En el evento de abril la energía dispensada es mayor y se estima en 5.711 kJ/m² para un flujo total de 3,46 hm³ con duración de 1.545 minutos. Estos valores resultan coherentes con la estimación del volumen total de transporte de sedimento de 313 m³ en enero y 483 m³ en abril. De acuerdo con estos resultados, se observa que el tramo aluvial de Enroig requiere la mitad de la energía (6-6,5 kJ/m²) que la gastada en el tramo de Cervera (12-12,5 kJ/m²) para movilizar 1 m³ de sedimento. De esta manera se comprueba la mayor eficiencia de los tramos aluviales trenzados respecto a tramos semiconfinados y confinados, probablemente debido a que, en el segundo, una parte de este trabajo geomórfico se dedica a la erosión.

A escala intraevento, la relación de la potencia de flujo específica (PFS) con la distribución espacial o temporal de formas y procesos permite identificar los umbrales mínimos para activar o desactivar estos procesos. En el vado de Enroig (figura 8), se observa la activación del movimiento de grava con caudales relativamente pequeños (15 m³/s), equivalente a 20 W/m², aunque solo por encima de 30 W/m² este transporte es significativo. Igualmente, la excedencia de este umbral mínimo no determina la activación del transporte, sino que la disponibilidad de sedimento y la conectividad con las fuentes (erosión de barras y cauce, vuelco de bancos) resultan críticas para que pueda producirse el transporte de sedimento. Por tanto, superado el umbral crítico de 30 W/m², los intervalos con mayor tasa de transporte (conteo de partículas del sensor) se interpretan debido al movimiento de barras que se desplazan por acreción aguas abajo, mientras que la falta de impactos se interpreta como una reducción de la disponibilidad de sedimento que puede generar erosión al excederse la capacidad de transporte.

En Cervera del Maestre existe igualmente una activación del transporte de carga de fondo para caudales relativamente bajos (~10 m³/s), con un umbral mínimo de 30 W/m². Los registros de los sensores de impacto (figura 10) nos muestran un aumento elevado en el número de impactos en la rama ascendente del hidrograma (hasta 160-230 impactos), mientras que en el resto sigue un patrón de tasa de impactos menor que refleja la forma del hidrograma. Este pico del transporte inicial se interpreta como debido a: 1) un aumento inicial del caudal que moviliza partículas de sedimento no compactadas que son fácilmente arrastradas a la columna de agua, y 2) la movilización de las gravas de los lóbulos acumuladas en el lecho durante la rama decreciente de la inundación previa. Resulta llamativo que el pico en la intensidad de impactos no se corresponde con el pico del hidrograma, lo que sugiere un agotamiento del sedimento fácilmente movilizable incluso cuando el caudal continúa aumentando.

Las diferencias de comportamiento entre los tramos de Enroig y Cervera del Maestre están en gran medida condicionadas por las fuentes de sedimento. En el caso de Enroig, existe una mayor disponibilidad de sedimento procedente de la erosión de los bancos y de las barras del lecho aluvial. Por tanto, la cantidad de sedimento transportada aguas abajo tiende a aproximarse a la capacidad de acarreo del flujo. Por su parte, en Cervera la capacidad de transporte es mayor que la disponibilidad de sedimento, cuya fuente principal se encuentra en la depresión aluvial del graben. En este caso, la cantidad transportada

corresponde a la disponibilidad de sedimento proveniente de aguas arriba, sumada al sedimento suelto acumulado durante el evento anterior en el lecho.

Hacia una estrategia para la gestión del sedimento y la recuperación de la integridad morfo-sedimentaria

La rambla de Cervera ha estado afectada por una extracción intensiva de gravas del cauce, principalmente entre 1980 y 2007, cuyo volumen mínimo se ha estimado en 358.000 m³, que se corresponde con una tasa de 7.984 m³/km (Pardo, 1991; Segura-Beltrán y Sanchis-Ibor, 2013). Según Segura-Beltrán y Sanchis-Ibor (2013), en el periodo de mayor actividad (1980-1988) se extrajeron una media de 36.600 m³/año, que descendieron entre 2000 a 2007 a 3500 m³/año. Entre los cambios más significativos en el cauce se detecta la reducción de la anchura (65 %) y la incisión media de 3,5 m de la práctica totalidad de su lecho (Segura-Beltrán y Sanchis Ibor (2013). La rambla de Cervera no es un caso aislado, y se puede considerar un ejemplo de la historia y problemática de los ríos efímeros mediterráneos.

En la actualidad, existe un consenso sobre la imposibilidad de revertir estos cauces a las condiciones morfosedimentarias anteriores a estos impactos (Ollero et al., 2021) y, por lo tanto, las condiciones de referencia deben de fijarse de acuerdo con los procesos y equilibrios sedimentarios actuales (Rabanaque et al., 2024). Las crecidas extremas pueden desempeñar un papel importante en la recuperación de estos cauces fluviales degradados al impulsar procesos geomorfológicos naturales, creando nuevas formas y favoreciendo el transporte y depósito de sedimento y su conectividad (Segura-Beltrán y Sanchis-Ibor, 2011). Sin embargo, la baja frecuencia de eventos con magnitud suficiente para generar cambios sustanciales ha determinado un bajo ritmo de los procesos de ajuste fluvial, e incluso la invasión activa de la vegetación del entorno del cauce (Segura-Beltrán y Sanchis-Ibor, 2013; Rabanaque et al., 2024).

Otra cuestión es el papel de los eventos frecuentes en la recuperación de los ríos efímeros degradados hacia unas condiciones “naturales” mínimas que permitan la transferencia de sedimento y la recuperación geomorfológica a largo plazo. En el presente estudio se ha puesto de manifiesto la diversidad en la actividad morfosedimentaria y la eficiencia de los procesos sedimentarios según su contexto morfoestructural. En el tramo superior (Enroig), la conexión con fuentes de sedimento y cauces trenzados permite una mayor eficiencia en la construcción de formas (barras laterales y mediales incipientes) y el transporte de sedimento. En el tramo medio (Cervera del Maestre), de cauce estrecho y único, la hidráulica muestra unas condiciones próximas a régimen crítico que impide la acumulación lateral de barras, mientras que las formas de lecho (depósito de lóbulos) se asocian con la rama decreciente del hidrograma. En términos anuales, en el tramo de Enroig se ha transportado un volumen de sedimento de 660 m³, mientras que en Cervera se transportaron 800 m³, a pesar de que en esta segunda zona el caudal pico y el volumen del hidrograma fueron el doble. Por lo tanto, existe un doble problema de fuentes de sedimento y de alta conectividad del sedimento, que habría que modificar para acelerar la recuperación en los tramos bajos. Al proporcionar perturbaciones regulares, estos eventos anuales son críticos para mantener la actividad morfológica y evitar el taponamiento de los cauces por crecimiento de la vegetación. En definitiva,

los esfuerzos deben de centrarse en favorecer el intercambio de sedimento (lateral y longitudinal) y el mantenimiento de las funciones morfosedimentarias.

CONCLUSIONES

Los ríos efímeros mediterráneos presentan condiciones hidromorfológicas muy alteradas debido a décadas de extracción intensiva de gravas, paso de vehículos, conducciones de agua y vertidos de residuos. Sin duda, los eventos extremos presentan un papel relevante en la reactivación de los procesos y la conectividad sedimentaria (Segura-Beltrán y Sanchis-Ibor, 2011). Sin embargo, su baja frecuencia limita su capacidad para mantener las condiciones morfosedimentarias del cauce y la recuperación de los procesos de los sistemas fluviales efímeros. Por tanto, los eventos anuales de baja magnitud presentan un papel significativo en la recuperación de la dinámica y la integridad geomorfológica en ríos degradados. En este trabajo se analiza la dinámica morfosedimentaria asociada a caudales anuales utilizando una combinación de técnicas y métodos, como: 1) registros continuos mediante sensores de caudal y de impacto de partículas transportadas como carga de fondo; 2) fotogrametría basada en vuelos de dron; 3) cartografía geomorfológica diacrónica; 4) modelado hidráulico bidimensional, y 5) cálculos de transporte de sedimento mediante ecuaciones de carga de fondo. En concreto, se han estudiado dos tramos de la rambla (Enroig y Cervera del Maestre) durante dos eventos de flujo (enero y abril de 2020) considerados frecuentes (periodo de retorno medio de 2 años). El seguimiento de la respuesta morfosedimentaria a eventos frecuentes permite la cuantificación de la tasa de los procesos y las condiciones físicas y estructurales de cada tramo que determinan su trayectoria de recuperación fluvial.

En el tramo de Enroig, representativo de sectores con valle aluvial y cauce trenzado, los eventos de enero y abril (máximo de $50 \text{ m}^3/\text{s}$) produjeron la expansión del cauce a expensas de la reducción de barras mediales incipientes, y la migración de las barras entrelazadas que componen el lecho. La distribución de energía relacionada con el esfuerzo cortante y la potencial del flujo muestra una gradación entre las diferentes formas fluviales, con los valores más altos de potencia en el fondo de los cauces trenzados ($150 \text{ W}/\text{m}^2$), barras mediales ($70 \text{ W}/\text{m}^2$) y barras laterales ($50 \text{ W}/\text{m}^2$). En general, los máximos del esfuerzo cortante presentan un patrón discontinuo, siendo frecuente su localización en la base de bancos y terrazas aluviales, lo que favorece su derrumbe y la inyección de sedimentos.

En el tramo de Cervera del Maestre, representativo de las zonas de graben, con un valle semiconfinado en roca y cauce único con islas mediales y barras laterales, las crecidas de enero y abril de 2020 ($100 \text{ m}^3/\text{s}$ y $120 \text{ m}^3/\text{s}$) apenas ocasionaron cambios en las barras laterales y mediales, siendo de destacar el depósito de lóbulos en el lecho del cauce asociados al estadio de recesión del hidrograma. Las condiciones hidráulicas muestran un régimen próximo a crítico (Froude $\approx 0,95$), con la potencia de flujo que grada desde el cauce de gravas (180 y $210 \text{ W}/\text{m}^2$), las barras laterales incipientes (120 y $150 \text{ W}/\text{m}^2$) y las barras mediales incipientes (potencia de 115 y $142 \text{ W}/\text{m}^2$), para caudales de 100 y $120 \text{ m}^3/\text{s}$.

La estimación de volumen de sedimento transportado mediante la ecuación de Recking (2013) muestra una buena correlación con la energía total disponible en cada evento, que responde al balance entre volumen del flujo, caudal pico y duración. En Enroig, la estimación para el evento de enero ($1,18 \text{ hm}^3$ y

1.590 minutos) corresponde a un transporte de 339 m³ con una energía total dispensada de 1.992 kJ/m². En el evento de abril (0,74 hm³ y 1.365 minutos), se ha estimado un volumen de sedimento transportado de 220 m³, por una potencia de flujo acumulada de 1.447 kJ/m². En Cervera del Maestre, la crecida de enero (2,47 hm³ y 1.010 minutos) se ha estimado un volumen de sedimento transportado de 313 m³ para una potencia total de flujo de 3.913 kJ/m². En la crecida de abril (3,46 hm³ y 1.545 minutos) se ha estimado un volumen de sedimento transportado de 483 m³ con potencial total de 5.711 kJ/m². Este transporte de sedimento calculado con la ecuación de Recking resulta coherente con las estimaciones de transporte de sedimento obtenidas a partir del número de impacto total registrado en sensores de fondo.

El registro temporal de impactos en sensores muestra una respuesta de transporte muy alta asociada a los estadios iniciales y ascendentes del hidrograma, con un pico en el número de impactos anterior al pico del hidrograma. Este pico de transporte de partículas se interpreta con una alta capacidad de transporte del frente de la crecida que moviliza las partículas de sedimento acumuladas en la fase decreciente del hidrograma anterior. Por su parte, la falta de correspondencia entre los picos de transporte y del hidrograma se explica por el agotamiento del sedimento y la falta de conexión con las fuentes. Igualmente, las intensidades mayores en el número de impactos reflejan el paso de frentes de barras de gravas sobre la localización de los sensores.

En líneas generales, este estudio demuestra la mayor capacidad de transporte y recuperación de las formas aluviales en el tramo con cauce trenzado en la depresión aluvial (Enroig). En el tramo semiconfinado (Cervera del Maestre) predominan los procesos de transporte, mientras que el depósito se asocia principalmente a los estadios finales del hidrograma. En este tramo de Cervera se espera que las grandes inundaciones con calado suficiente como para inundar las zonas aluviales con vegetación consolidada puedan crear las condiciones para acelerar la recuperación natural y la continuidad sedimentaria de la rambla.

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 (Subvenciones MNCN-CSIC 20223TE002 y 20233TE011, e IGME-CSIC 20223TE002-Tarquín 2). 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; Twitter: [floods_research](https://twitter.com/floods_research); Instagram: [@inundaciones_investigacion](https://www.instagram.com/inundaciones_investigacion)). Los autores agradecen al editor y a los revisores de la revista *Cuadernos de Geografía* sus valiosos comentarios y sugerencias.

REFERENCIAS

Bagnold, R. A., (1977). Bed load transport by natural rivers. *Water Resour. Res.*, 13(2), 303-312, DOI: 10.1029/WR013i002p00303

- Bladé, E., Cea L., Corestein G., Escolano E., Puertas J., Vázquez-Cendón E., Dolz J., & Coll A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30, 1-10. DOI: 10.1016/j.rimni.2012.07.004
- Calle, M. (2019). *Morphosedimentary dynamics of ephemeral rivers affected by gravel mining: GIS mapping and geomorphic change detection*. Universidad Complutense de Madrid, 20 June.
- 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: 10.1016/j.geomorph.2017.02.026
- Calle M., Alho P., & Benito G. (2018). Monitoring ephemeral river changes during floods with SfM photogrammetry. *Journal of Iberian Geology*, 44, 355-373. DOI: 10.1007/s41513-018-0078-y
- 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: 10.1002/esp.4765
- Conesa García, C. & Pérez Cutillas, P. (2014). Alteraciones geomorfológicas recientes en los sistemas fluviales mediterráneos de la Península Ibérica: Síntomas y problemas de incisión en los cauces. *Revista de Geografía Norte Grande*, 59, 25-44. DOI: 10.4067/S0718-34022014000300003
- Dhont, B. & Ancey, C. (2018). Are Bedload Transport Pulses in Gravel Bed Rivers Created by Bar Migration or Sediment Waves? *Geophysical Research Letters*, 45, 5501-5508. DOI: 10.1029/2018GL077792
- Dinehart, R. L. (1992). Evolution of coarse gravel bed forms: field measurements at flood stage. *Water Resources Research*, 28, 2667-2689. DOI: 10.1029/92WR01357
- Downs, P. W., Soar, P. J. & Taylor, A. (2016). The anatomy of effective discharge: the dynamics of coarse sediment transport revealed using continuous bedload monitoring in a gravel-bed river during a very wet year. *Earth Surf. Proc. and Landf.*, 41(2), 147-161. DOI: 10.1002/esp.3785
- García-Ruiz, J. M. & Lana-Renault, N. (2011). Hydrological and erosive consequences of farmland abandonment in Europe, with special reference to the Mediterranean region-A review. *Agric., Ecosyst. Environ*, 140(3-4), 317-338. DOI: 10.1016/j.agee.2011.01.003
- Gomez, B. (1983). Temporal variations in bedload transport rates: the effects of progressive bed armouring. *Earth Surface Processes and Landforms*, 8, 41-54. DOI: 10.1002/esp.3290080105
- Gomez B. & Soar P. J. (2023). Bedload transport and the stream power approach. *Proc. R. Soc. A*, 479, 20220783. DOI: 10.1098/rspa.2022.0783
- Grant, G. E. (1997). Critical flow constrains flow hydraulics in mobile-bed streams: a new hypothesis. *Water Resources Research*, 33, 349-358.
- Hinton, D., Hotchkiss, R. H., & Cope, M. (2018). Comparison of calibrated empirical and semi-empirical methods for bedload transport rate prediction in gravel bed streams. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144, 17. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001474
- Kondolf, G. M. (1994). Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining. *Landscape Urban Plann.*, 28, 225-243.

- Liébault, F. & Piégay, H. (2002). Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of southeastern France. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 425-444. DOI: 10.1002/esp.328
- Martín-Vide, J. P., Ferrer-Boix, C., & Ollero, A. (2010). Incision due to gravel mining: modeling a case study from the Gállego River, Spain. *Geomorphology*, 117, 261-271. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.01.019
- Molnar, P., Densmore, A. L., McArdeell, B. W., Turowski, J. M., & Burlando, P. (2010). Analysis of changes in the step-pool morphology and channel profile of a steep mountain stream following a large flood. *Geomorphology*, 124, 85-94. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.08.014
- Monsalve, A., Segura, C., Hucke, N., & Katz, S. (2020). A bed load transport equation based on the spatial distribution of shear stress - Oak Creek revisited. *Earth Surf. Dynam.*, 8, 825-839. DOI: 10.5194/esurf-8-825-2020
- Nanson, G. C. & Croke, J. C. (1992). A genetic classification of floodplains. *Geomorphology*, 4(6), 459-486. DOI: 10.1016/0169-555X(92)90039-Q
- Nelson, J. M., Shreve, R. L., McLean, S. R., & Drake, T. G. (1995). Role of near-bed turbulence structure in bed load transport and bed form mechanics. *Water Resources Research*, 31, 2071-2086.
- Ollero A., Conesa-García C., & Vidal-Abarca M. R. (2021). Buenas prácticas en gestión y restauración de cursos efímeros mediterráneos: resiliencia y adaptación al cambio climático. *Editum*. Ediciones de la Universidad de Murcia
- Pardo, J. E. (1991). *La erosión antrópica en el litoral valenciano*. COPUT, Generalitat Valenciana, 240 pp.
- Parker, G. (2008). Transport of gravel and sediment mixtures. ASCE Manual 54 Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice. ASCE. Reston, VA, *American Society of Civil Engineers*, 1132 pp.
- Parker, G., Clifford, N. J., & Thorne, C. R. (2011). Understanding the influence of slope on the threshold of coarse grain motion: Revisiting critical stream power. *Geomorphology*, 126, 51-65. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.10.027
- Powell, D. M. (1998). Patterns and processes of sediment sorting in gravel-bed rivers. *Prog. Phys. Geogr.*, 22, 1-32. DOI: 10.1177/03091333980220010
- Rabanaque, M. P. (2024). *Hydromorphological analysis of ephemeral streams: integrating remote sensing and machine learning approaches*. Universidad de Zaragoza: Zaragoza, 17 June.
- 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: 10.1002/esp.5250
- 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: 10.1016/j.geomorph.2024.109069
- Recking, A. (2013). A simple method for calculating reach-averaged bedload transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000653

- Recking, A., Frey, P., Paquier, A., & Belleudy, P. (2009). An experimental investigation of mechanisms responsible for bedload sheet production and migration. *J. Geophys. Res.*, 114, F03010.
- Recking, A., Johannot, A., Horita, K., Nasr, M., Zanker, S., Vázquez-Tarrió, D., Fontaine, F., & Melun, G. (2024). An attempt to take into account natural variability in 1D bedload prediction. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. DOI: 10.1029/2023JF007601
- Recking, A., Piton, G., Vazquez-Tarrio, D., & Parker, G. (2016). Quantifying the morphological print of bedload transport. *Earth Surface Processes and Landform*. DOI: 10.1002/esp.3869
- Recking, A., Vázquez Tarrío, D., & Piton, G. (2023). The contribution of grain sorting to the dynamics of the bedload active layer. *Earth Surface Processes and Landforms*, 48(5), 979-996. DOI: 10.1002/esp.5530
- Rickenmann, D. (2020). Effect of Sediment Supply on Cyclic Fluctuations of the Disequilibrium Ratio and Threshold Transport Discharge, Inferred From Bedload Transport Measurements Over 27 Years at the Swiss Erlenbach Stream. *Water Resources Research*, 56. DOI: 10.1029/2020WR027741
- Rovira, A., Batalla, R. J., & Sala, M. (2005). Response of a river sediment budget after historical gravel mining (the lower Tordera, NE Spain). *River Research and Applications*, 21(7), 829-847. DOI: 10.1002/rra.885
- 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. DOI: 10.18172/cig.2530
- 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: 10.1016/j.catena.2017.07.012
- Scorpio, V., Aucelli, P. P., Giano, S. I., Pisano, L., Robustelli, G., Roskopf, C. M., & Schiattarella, M. (2015). River channel adjustments in Southern Italy over the past 150 years and implications for channel recovery. *Geomorphology*, 251, 77-90. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.07.008
- Segura-Beltrán, F. (1983). Las terrazas de la rambla de Cervera. *Cuadernos de Geografía*, 34, 1-30.
- Segura-Beltrán, F. (1990). *Las ramblas valencianas: algunos aspectos de hidrología, geomorfología y sedimentología*. València, Universitat de València.
- Segura-Beltrán, F. (1995). El Cuaternario continental en las tierras septentrionales valencianas. *El cuaternario del País Valenciano*, 83-96 pp.
- Segura-Beltrán, F. (2013). Rambles i barrancs: els rius de pedres. *Mètode Science Studies Journal*, 38. <https://metode.cat/revistes-metode/monografics/rambles-i-barrancs-els-rius-de-pedres.html>
- Segura-Beltrán, F. & Sanchis-Ibor, C. (2011). Efectos de una crecida en un cauce antropizado. La riada del Palància de octubre de 2000. *Cuadernos de Geografía de la Universitat de València*, 147-168. DOI: 10.7203/CGUV.14215
- 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: 10.1016/j.geomorph.2013.06.021

- Segura-Beltrán F, Sanchis-Ibor C., & Vidal-Salvador A. (2020). La incisión como efecto de los cambios ambientales en ríos efímeros. En *Desafíos y oportunidades de un mundo en transición: Una interpretación desde la Geografía* (pp. 145-160). PUV-Tirant lo Blanch.
- Soar, P. J. & Downs, P. W. (2017). Estimating bedload transport rates in a gravel-bed river using seismic impact plates: Model development and application. *Environmental Modelling & Software*, 90, 182-200.
- Surian, N. & Rinaldi, M. (2004). *Channel adjustments in response to human alteration of sediment fluxes: examples from Italian rivers*. IAHS publication, 288, 276-282.
- Vázquez-Tarrío, D., Piégay, H., & Menéndez-Duarte, R. (2020). Textural signatures of sediment supply in gravel-bed rivers: Revisiting the armour ratio. *Earth-Science Reviews*, 207, 103211. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103211
- Vericat, D., Wheaton, J. M., & Brasington, J. (2017). Revisiting the morphological approach: Opportunities and challenges with repeat high-resolution topography. En *Gravel-Bed Rivers: Process and Disasters* (pp. 121-158). Nueva York: Wiley.
- Whiting, P., Dietrich, W. E., Leopold, L. B., Drake, T. G., & Sherve, R. L. (1988). Bedload sheets in heterogenous sediments. *Geology*, 16(2), 105, C109. DOI: 10.1130/0091-7613(1988)016<0105:BSIHS>2.3.CO;2

Cómo citar este artículo:

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.

<https://doi.org/10.7203/CGUV.112.29261>



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

