



# INUNDACIONES Y SEQUÍAS

Análisis Multidisciplinar para Mitigar  
el Impacto de los Fenómenos  
Climáticos Extremos.

Joaquín Melgarejo Moreno  
M<sup>a</sup> Inmaculada López Ortiz  
Patricia Fernández Aracil

**(Editores)**

# **INUNDACIONES Y SEQUÍAS**

Análisis Multidisciplinar para Mitigar  
el Impacto de los Fenómenos  
Climáticos Extremos.

Joaquín Melgarejo Moreno  
M<sup>a</sup> Inmaculada López Ortiz  
Patricia Fernández Aracil

**(Editores)**

© los autores, 2021  
© de esta edición: Universitat d'Alacant

ISBN: 978-84-1302-138-6

Reservados todos los derechos. No se permite reproducir, almacenar en sistemas de recuperación de la información, ni transmitir alguna parte de esta publicación, cualquiera que sea el medio empleado -electrónico, mecánico, fotocopia, grabación, etcétera-, sin el permiso previo de los titulares de la propiedad intelectual

# UTILIZACIÓN DE DRONES AÉREOS Y ACUÁTICOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA RUGOSIDAD DE CAUCES FLUVIALES

## **Daniel Vázquez Tarrío**

Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC), España  
d.vazquez@igme.es  
<https://orcid.org/0000-0002-5658-4426>

## **Mario Hernández Ruíz**

Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC), España  
m.hernandez@igme.es  
<https://orcid.org/0000-0002-4088-2269>

## **Juan Carlos García López-Davalillo**

Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC), España  
jc.garcia@igme.es  
<https://orcid.org/0000-0002-0516-1626>

## **Julio Garrote Revilla**

Universidad Complutense de Madrid, España  
juliog@ucm.es  
<https://orcid.org/0000-0002-7727-8014>

## **Andrés Díez Herrero**

Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC), España  
andres.diez@igme.es  
<https://orcid.org/0000-0003-1106-191X>

## **RESUMEN**

La rugosidad (asociada a la granulometría) de la superficie de ríos de lecho grueso es un parámetro físico fundamental que condiciona el comportamiento hidráulico de los flujos de agua en ríos durante crecidas, así como la distribución de hábitats. Sin embargo, su cuantificación y medida es compleja, sobre todo cuando lo que se persigue es la caracterización de la rugosidad a lo largo de una amplia superficie del cauce. Habitualmente, la caracterización de la rugosidad y la granulometría se basa en medidas puntuales de campo realizadas utilizando métodos que, si bien son adecuados para una estimación a nivel local, no permiten una adecuada caracterización de toda la heterogeneidad espacial. En este trabajo hemos puesto a punto un protocolo o flujo de trabajo basado en la medida de la rugosidad sobre modelos numéricos del terreno (MNT) obtenidos con fotogrametría digital a partir de imágenes dron. Para completar la información sobre aquellas áreas no bien resueltas con la fotogrametría, hemos recurrido a la observación del lecho con drones subacuáticos. La combinación de estas dos técnicas nos ha permitido producir un mapa de ‘facies granulométricas’ de la Garganta de Cuartos (Losar de la Vera, Cáceres), seleccionada como caso de estudio. Este tipo de mapas guardan un gran potencial para mejorar la caracterización del comportamiento hidro-sedimentario de ríos de lecho grueso.

## 1. INTROUCCIÓN

La rugosidad de superficie es un parámetro físico que ejerce un control fundamental sobre el comportamiento hidráulico en ríos y torrentes. Expresado en términos simples, la rugosidad condiciona la resistencia a la fricción del flujo de agua y, con ello, la velocidad de la corriente y el calado alcanzado por la columna de agua para un caudal dado. Por ello, su adecuada cuantificación es fundamental para la modelización numérica del flujo de agua en ríos.

En el caso particular de los ríos de lecho grueso, la rugosidad está fuertemente condicionada por la granulometría de superficie. En efecto, el tamaño de los granos que componen el mosaico sedimentario define la dimensión vertical de la microtopografía del lecho (por delante del efecto de la posible vegetación) y con ello, su rugosidad. Además de los aspectos puramente hidráulicos, el conocimiento de la granulometría del lecho fluvial también es fundamental desde un punto de vista ecológico, al ser un control capital sobre el hábitat de diferentes organismos acuáticos.

Los métodos tradicionales para el muestreo granulométrico en ríos de lecho grueso (contaje de cantos “Wolman”, análisis digital de imágenes) permiten caracterizar adecuadamente la distribución granulométrica a nivel local (Bunte y Abt, 2001), pero son muy costosos y complejos de aplicar cuando lo que se persigue es una caracterización espacialmente distribuida sobre el conjunto del cauce. Así, hoy en día, son escasos los trabajos en los que se haya conseguido una caracterización sinóptica y espacialmente continua de la granulometría y rugosidad de superficie en ríos de lecho grueso.

Ahora bien, el desarrollo reciente de técnicas topográficas de alta resolución (p.ej., fotogrametría digital, LIDAR), y el abaratamiento y difusión de los vectores de adquisición (p.ej., drones) ha abierto un campo de aplicación muy interesante (Brasington et al., 2012). Así, algunos trabajos recientes han mostrado cómo la información derivada de datos obtenidos a partir de datos de láser terrestre (Heritage and Milan, 2009; Brasington et al., 2012) o de fotogrametría digital a partir de imágenes aéreas (Vázquez-Tarrio et al., 2017) permite reconstruir la rugosidad de superficie y granulometría del lecho en ríos de gravas. Otros trabajos han utilizado análisis digital de imágenes sobre imágenes aéreas, encontrando relaciones robustas entre la textura de la imagen y la granulometría (Carbonneau et al., 2005).

En este trabajo perseguimos testear el potencial existente en la combinación de fotogrametría a partir de imágenes dron junto con la utilización de drones subacuáticos con el objetivo de caracterizar la granulometría y la rugosidad del lecho de un río, de una manera espacialmente continua y distribuida. Para ello, hemos utilizado como caso de estudio la Garganta de Cuartos en Losar de la Vera (Cáceres, España).

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

La Garganta de Cuartos es un afluente del río Tiétar, de unos 65 km de longitud, que nace en la Sierra de Gredos. El tramo de estudio seleccionado para este trabajo se encuentra en las inmediaciones de Losar de la Vera (Cáceres) (Fig. 1). Se trata de un tramo encañonado, de aproximadamente 500 m, donde el río exhibe una morfología en resaltos y escalones, definida por clastos de granitoides de tamaño bloque.

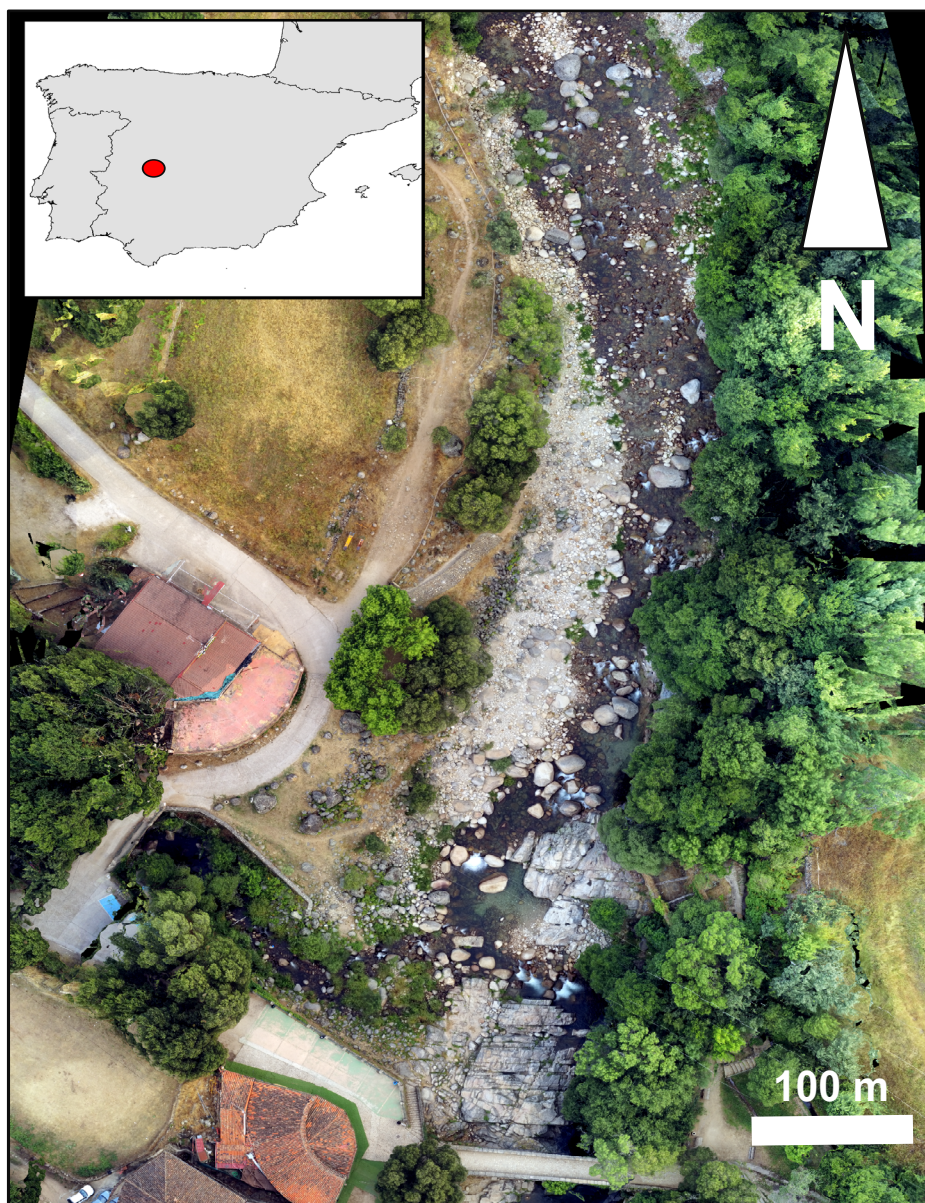


Figura 1. Ubicación del tramo de estudio.

### 3. METODOLOGÍA

Con el objetivo de caracterizar al detalle la microtopografía del tramo de estudio, una campaña fotogramétrica fue realizada utilizando imágenes captadas con un dron. Para las áreas más profundas, allí donde las imágenes aéreas no aportaban detalle suficiente del fondo del lecho, se ha recurrido a la utilización de drones subacuáticos. En la fig. 2 se sintetiza el flujo de trabajo seguido para llegar a esta clasificación. A continuación, en los párrafos que siguen, se procederá a explicar la metodología empleada con más detalle, así como las tareas de post-proceso realizadas sobre los datos.

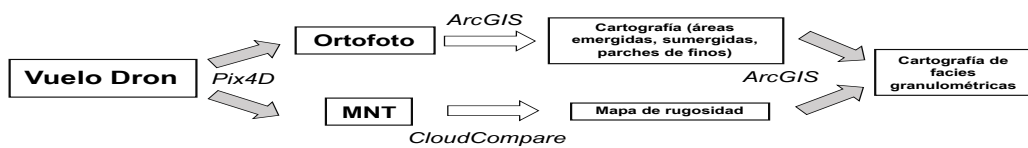


Figura 2. Flujo de trabajo seguido para la cartografía de “facies” granulométricas.

### 3.1. Campaña fotogramétrica y generación del MNT

El vuelo fotogramétrico fue realizado con un RPAS Parrot ANAFI del Servicio de Trabajos Aéreos del IGME-CSIC y programado con el software Pix4Dcapture. Se efectuó a primera hora de la mañana con objeto de evitar sombras, reflejos y que la luz fuera lo más uniforme posible en las 189 imágenes aéreas obtenidas. Además, esto permitió salvar la presencia de bañistas en un lugar tan concurrido como la Garganta de Cuartos. La doble rejilla fue programada para la captura de fotografías a 45 metros de altura, con un solape longitudinal del 80% y transversal del 70%, cubriendo un área de 1,6 ha. La cámara de la aeronave fue fijada con 70 grados de inclinación, obteniéndose un GSD (Ground Sampling Distance) o resolución media de 1,6 cm/píxel en las imágenes.

El procesado fotogramétrico se llevó a cabo mediante el software Pix4Dmapper 4.6.4, obteniéndose una nube de puntos 3D georreferenciada con 17,2 millones de puntos. Para la georreferenciación se utilizaron 5 puntos de control en terreno cuyas coordenadas fueron obtenidas mediante un D-GPS Leica 1200 conectado vía telefónica al Servicio de Posicionamiento en Tiempo Real del IGN-CC.AA. para la corrección de errores. De esta manera se ha conseguido una precisión en la georreferenciación de 2,5 cm de error medio (RMS). Adicionalmente se han obtenido un modelo digital de superficie (MDS) y un ortomosaico con 1,82 cm/píxel de resolución que cubre un área de 3,9 ha (Fig. 3).

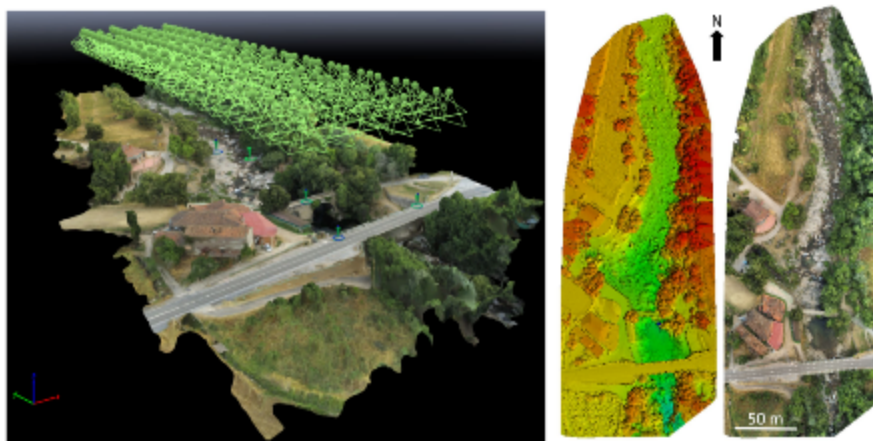


Figura 3. Modelo 3D, MDS y ortofotografía de la Garganta de Cuartos obtenidos de aplicación de técnicas fotogramétricas *Structure from motion* (sfm) en imágenes aéreas captadas con RPAS.

### 3.2. Post-tratamiento de los datos fotogramétricos

A partir de la nube de puntos 3D generada a partir de las imágenes aéreas se ha realizado una primera estimación de la rugosidad de superficie. Para ello, se ha utilizado el algoritmo “*roughness*” que viene implementado por defecto en el software de uso libre “CloudCompare”. Para cada punto de la nube, este algoritmo calcula la diferencia de elevación entre el punto en cuestión y el plano que mejor se ajuste a los puntos vecinos en un radio dado. En nuestro caso, hemos utilizado un radio de 1 m, que corresponde aproximadamente con el tamaño de los bloques mayores observados en campo en el área de estudio. En cierto modo, esta herramienta estima las variaciones locales de elevación con respecto al nivel medio del lecho, lo que se puede considerar una buena aproximación de la rugosidad de superficie (Smart et al. 2004; Brasington et al., 2012).

Una vez hecha esta primera estimación, se ha realizado una selección aleatoria de 100 “parcelas” cuadradas de 1 m<sup>2</sup> de superficie. A cada una de estas parcelas se le ha asignado la clase granulométrica dominante, basándose en la observación de la ortofoto derivada del vuelo dron. Esta asignación se ha realizado en base a cuatro clases: “bloque”, “canto”, “gravas medias y gruesas” y “sedimento fino” (tamaño inferior a la resolución de la ortofoto; ~2 cm). Para cada una de estas parcelas se ha estimado, también, el valor medio de la rugosidad de la nube de puntos, obtenida en el paso anterior. De este modo, se ha intentado identificar los valores de rugosidad que marcan la transición entre las 4 clases de tamaño.

Basándonos en estos resultados, se ha llevado a cabo un proceso de clasificación automática de los valores de rugosidad del área de estudio en las 4 clases anteriores, generándose así una cartografía granulométrica o de “facies” de rugosidad. Como en las áreas más profundas del cauce las imágenes del vuelo dron no permiten observar la granulometría del fondo, en este caso se ha recurrido a la observación del fondo con un dron subacuático.

### 3.3. Drones subacuáticos

En la parte sur de la zona de estudio, en la margen izquierda, existe una zona entre dos afloramientos rocosos, con una profundidad elevada, lo que junto al efecto sombra de la vegetación riparia hace que no se pueda caracterizar vía RPAS el tipo de depósito que existe ni determinar la rugosidad del lecho de manera adecuada, pese a la baja turbidez del agua. Para solventar esta dificultad recurrimos a un dron subacuático POWER RAY de la marca POWER VISION equipado con cámara y sonar (Fig. 4), el cual nos permitiría tomar fotografías y videos de las zonas de interés.





Figura 4. Dron submarino POWER RAY (POWER VISION).

En primer lugar, y aprovechando las referencias obtenidas con un D-GPS Leica 1200 geo-posicionamos una estación total Leica TS 11 con opciones de medición sin prisma, lo cual permite la adquisición de coordenadas en zonas de difícil acceso. La estación la utilizamos para tomar la cota del agua en el mismo sistema de coordenadas que la nube de puntos obtenida por fotogrametría. A su vez, tomamos las coordenadas de la ubicación de los distintos puntos de observación elegidos.

Así, se ha realizado un muestreo de la rugosidad del canal usando los datos facilitados por el sónar del dron subacuático, sumergiendo el mismo y tomando fotografías y vídeos del lecho en aras a determinar el tipo de depósito. Para hacerse una idea del tamaño, al mismo tiempo que se sumergía el dron subacuático, se ha introducido en el agua un cuadro metálico de 50 cm de lado, con el objeto de disponer de una escala de comparación para las imágenes tomadas.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Relación entre rugosidad derivada del vuelo dron y la granulometría

En la fig. 5, se presenta los valores de rugosidad (estimados utilizando “CloudCompare”) de las “parcelas” de 1 m<sup>2</sup> seleccionadas de manera aleatoria (sección 3.2); estos valores de rugosidad se comparan entre las cuatro clases granulométricas en las que fueron clasificadas las “parcelas”. Se puede observar una cierta correspondencia entre las clases granulométricas y los valores de rugosidad. Así, se puede apreciar como la rugosidad es mayor en las parcelas clasificadas como bloques que en aquellas clasificadas como cantos, y en estas últimas que en las parcelas inicialmente clasificadas como gravas. Estos resultados son los esperables teniendo en cuenta el incremento en la dimensión vertical de los clastos desde los tamaños gravas hasta los clastos tamaño bloque.

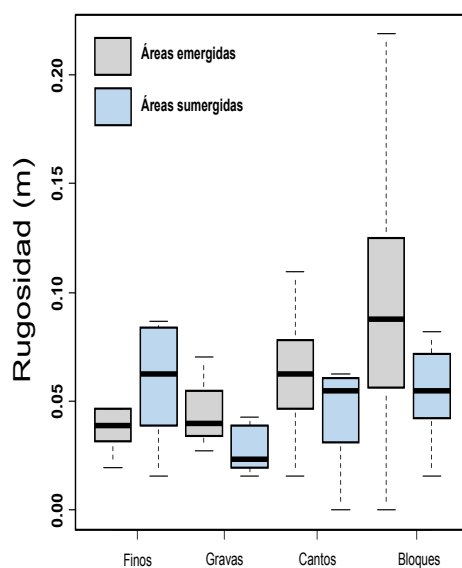


Figura 5. Valores de rugosidad observados en las “parcelas” de muestreo de 1 m<sup>2</sup>.

Paradójicamente, los valores de rugosidad tienden a ser mayores en las ‘parcelas clasificadas como “finos” que en aquellas clasificadas como “gravas”. Esto seguramente es debido al desarrollo de formas de lecho (rizaduras, dunas) en los parches de sedimento más fino, introduciendo una rugosidad de forma con una dimensión vertical comparable a los parches de gravas.

Asimismo, se observan diferencias en los valores de rugosidad entre las zonas emergidas y las zonas sumergidas: en general, los valores de rugosidad son menores en las zonas sumergidas, lo que podría ser debido a una distorsión de refracción en la caracterización de la microtopografía del lecho con la fotogrametría.

#### 4.2. Observaciones con el dron subacuático

Como ya ha sido indicado más arriba, en la parte sur del área de estudio, en la margen izquierda, existe un sector donde la profundidad del agua, junto con la sombra de la cubierta arbórea, dificulta la identificación de la rugosidad del lecho. En esta zona hemos recurrido a la utilización de un dron subacuático para observar la granulometría del fondo (sección 3.2; fig. 6).



Figura 6. Ejemplo de alguna de las fotografías del fondo del lecho tomadas con el dron subacuático.

La experiencia con la utilización de esta herramienta ha sido bastante satisfactoria, permitiéndonos la toma de imágenes perfectamente aprovechables para la caracterización del lecho en este sector. Así, esta herramienta nos ha permitido identificar tres parches con diferentes valores de rugosidad de grano en esta zona del cauce de estudio (Fig. 7).

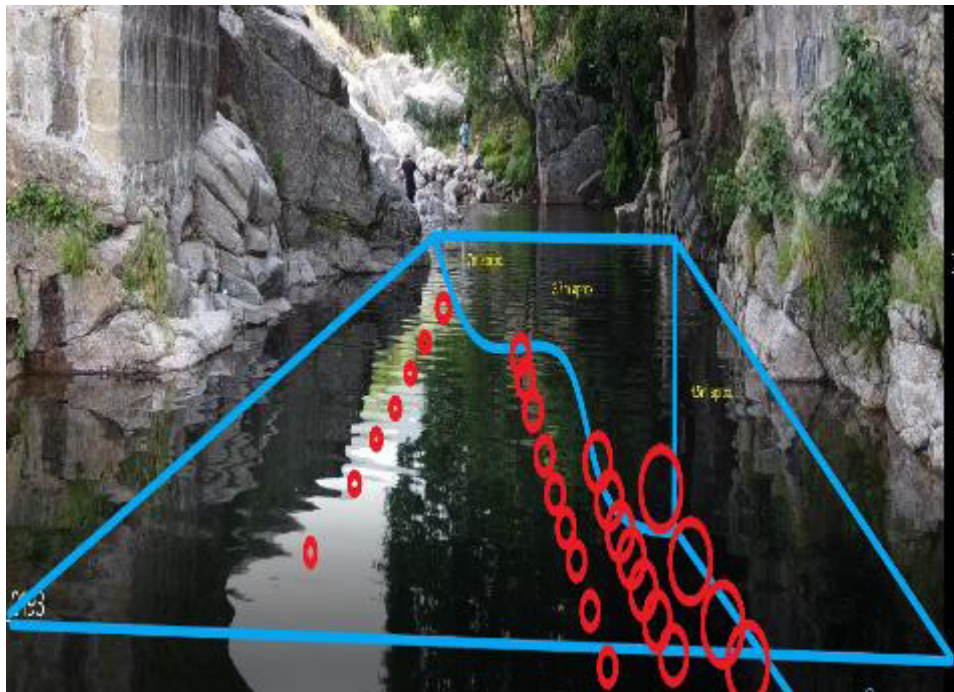


Figura 7. Imagen de campo del sector estudiado con el dron acuático. El tamaño de los círculos rojos es proporcional al tamaño de los clastos observados en el lecho.

### 4.3. Cartografía espacialmente distribuida de la rugosidad del lecho

El análisis de los valores de rugosidad derivados del MNT sugiere que la rugosidad estimada con “CloudCompare” puede ser utilizada para cartografiar las facies granulométricas del lecho en el área de estudio. Asimismo, las observaciones con dron subacuático parecen ser adecuadas para completar la información en aquellas zonas donde la fotogrametría no ha permitido resolver la rugosidad del lecho.

Debido a que los valores de rugosidad muestran diferencias en las áreas emergidas y sumergidas, lo primero que se ha hecho ha sido una cartografía manual del cauce mojado en el momento de la toma de las fotografías aéreas. Asimismo, como los valores de rugosidad obtenidos en los parches de sedimento más fino muestran un solape importante con la rugosidad que se ha estimado en los parches de gravas, también se ha procedido a la identificación y cartografía de los parches de sedimento fino. Lo mismo se ha hecho con aquellas zonas donde afloraba la roca del substrato. La cartografía manual de estos elementos se ha hecho en ArcGis, usando un nivel de zoom más o menos constante (entre 1:200 y 1:700).

Una vez hecha esta cartografía manual, se han descartado las áreas con depósito de sedimento fino y las áreas de roca expuesta. A continuación, se han seleccionado las restantes áreas del tramo estudio y se han estimado los valores de rugosidad (con “CloudCompare”), derivando un modelo de rugosidad con tamaño de celda de 1m. Finalmente, hemos aplicado los valores observados en la fig. 5 para hacer una clasificación automática del área de estudio en 3 clases granulométricas (‘gravas’, ‘cantos’ y ‘bloques’). Esta clasificación se ha completado con las observaciones realizadas con dron subacuático para las áreas donde la profundidad del agua y la cubierta vegetal impedía la observación del lecho con las imágenes aéreas.

Así, hemos producido finalmente una cartografía espacialmente distribuida de las principales facies granulométricas en el área de estudio (Fig. 8). Una vez hecha esta cartografía, la hemos traducido a valores del coeficiente de rugosidad de Manning ( $n$ ), la variable más comúnmente utilizada en modelización hidráulica para definir la rugosidad. Así, basándonos en Arcement y Schneider (1989) hemos asignado los siguientes valores:  $n=0,012$  en áreas de roca aflorante;  $n=0,020$  en zonas con parches de finos;  $n=0,035$  en áreas de gravas;  $n=0,050$  en zonas con cantos; y  $n=0,070$  en zonas cubiertas por bloques.

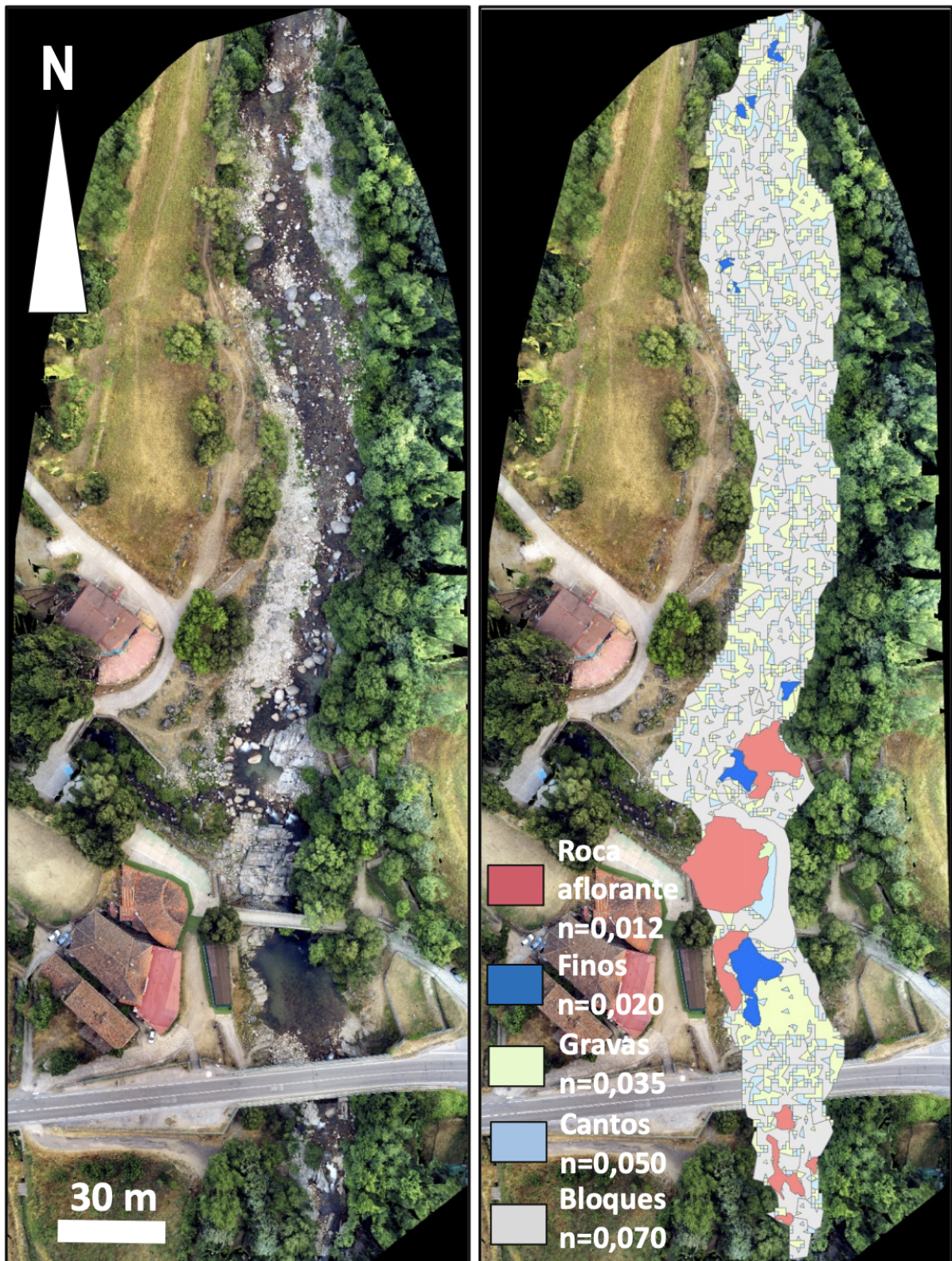


Figura 8. Cartografía de “facies” granulométricas en el área de estudio.

## 5. DISCUSIÓN

El flujo de trabajo aquí aplicado (Fig. 2) ha permitido caracterizar satisfactoriamente y de una manera espacialmente distribuida la heterogeneidad granulométrica en el tramo estudiado de la Garganta de Cuartos (Losar de la Vera). Este flujo de trabajo se ha basado en la utilización de fotogrametría a partir de imágenes dron. Hay, no obstante, una serie de limitaciones a tener en cuenta. En nuestro caso, la fotogrametría SfM nos ha permitido obtener una respuesta del lecho en la práctica totalidad de las áreas sumergidas. Unos calados relativamente bajos, unas óptimas condiciones de iluminación y la baja turbidez del agua han hecho posible que la fotogrametría resolviese satisfactoriamente la microtopografía del lecho en las áreas del cauce cubiertas por agua. Sin embargo, bajo condiciones de fuerte turbidez del agua o profundidades de agua superiores a 50 cm – 1 m, es difícil esperar que la fotogrametría permita caracterizar el lecho. En este sentido, la utilización de dron subacuático para la observación del lecho ha demostrado ser eficaz para superar las limitaciones asociadas a las zonas con mayor profundidad de agua (p.ej. pozas). No obstante, aunque esto puede resultar aplicable a cauces de lecho grueso, en cauces con un importante transporte de finos en suspensión creemos que la turbidez del agua puede impedir la aplicación de la presente metodología.

Otra posible limitación de la fotogrametría son las zonas de sombra y aquellas zonas (principalmente en las márgenes) donde la cubierta arbórea puede impedir tener un retorno del lecho. En nuestro caso, la utilización del dron subacuático nos ha permitido nuevamente esquivar estos problemas. Para este caso, también podría ser una solución eficaz la utilización de imágenes oblicuas tomadas de menor altura, que permitiesen esquivar la vegetación (sobre todo si es arbórea).

Asimismo, los valores de rugosidad observados (fig. 5) sugieren la existencia de una cierta distorsión de refracción. En este sentido, distintos autores han propuesto diferentes métodos para corregir esta distorsión (Woodget et al., 2015; Dietrich, 2017). En este caso, no hemos aplicado ninguna corrección de este tipo y hemos optado por un procedimiento más sencillo: delimitar manualmente las áreas emergidas y sumergidas, y separar el tratamiento de la rugosidad entre las dos zonas, basándonos en los resultados del análisis mostrado en la figura 4.

A pesar de todas estas limitaciones, creemos que el flujo de trabajo aquí aplicado puede ser adaptado y utilizado para caracterizar la granulometría de superficie en ríos de lecho grueso, siempre y cuando se programe adecuadamente la toma de datos en campo para asegurarse que las condiciones de calado, iluminación y de turbidez del agua sean lo más óptimas posibles.

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo hemos puesto a punto un flujo de trabajo adaptado a la caracterización de la heterogeneidad espacial en la granulometría y rugosidad de superficie de un río de lecho grueso, utilizando como caso de estudio la Garganta de Cuartos en Losar de la Vera (Cáceres).

El procedimiento se basa en la estimación de un parámetro de rugosidad a partir de un modelo numérico del terreno, el cual ha sido derivado a partir de imágenes dron utilizando fotogrametría SfM. Para superar algunas limitaciones de la fotogrametría en la caracterización de la microtopografía de las áreas sumergidas (profundidad del agua, zonas de sombra, etc) se ha recurrido a un dron subacuático para observar la granulometría del lecho.

Los resultados obtenidos parecen confirmar la idoneidad del método para caracterizar la variabilidad espacial en la granulometría y la rugosidad del lecho en ríos de gravas y bloques. Al ser la granulometría y la rugosidad un parámetro físico de capital importancia en la modelización del flujo de agua y del transporte de sedimentos en ríos, el método aquí presentado tiene potencial para enriquecer los estudios de peligrosidad de inundación en ríos de lecho grueso.

## AGRADECIMIENTOS

Esta propuesta forma parte del grupo de tareas de análisis de riesgo de inundación (GT1), del proyecto de investigación del Plan Nacional de I+D+i DRAINAGE (CGL2017-83546-C3-R MINEICO/AEI/FEDER, UE).

## REFERENCIAS

- Arcement, G. J., y Schneider, V. R. (1989). *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains*. Water Supply Paper 2339, USGS.
- Brasington, J., Vericat, D., y Rychov, I. (2012). Modeling river bed morphology, roughness, and surface sedimentology using high resolution terrestrial laser scanning. *Water Resources Research*, 48, W11519.
- Bunte, K., y Abt, S. R. (2001). *Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics and streambed monitoring*. General Technical Report n° RMRS GTR74. U.S. Department of Agriculture, Forest service, Rocky Mountain Research Station.
- Carbonneau, P. E., Bergeron, N., y Lane, S. N. (2005). Automated grain size measurements from airborne remote sensing for long profile measurements of fluvial grain sizes. *Water Resources Research*, 41, W11426.
- Heritage, G., y Milan, D. J. (2009). Terrestrial laser scanning of grain roughness in a gravel bed river. *Geomorphology*, 113 (1), 4–11.
- Smart, G., Aberle, J., Duncan, M., y Walsh, J. (2004). Measurement and analysis of alluvial bed roughness. *Journal of Hydraulic Research*, 42 (3), 227–237.
- Vázquez-Tarrío D., Borgniet L., Liébault F., y Recking A. (2017). Using UAS optical imagery and SfM photogrammetry to characterize the surface grain size of gravel bars in a braided river (Vénéon River, French Alps). *Geomorphology*, 285 (94-105).
- Woodget, A. S., Carbonneau, P. E., Visser, F., y Maddock, I. P. (2015). Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(1), 47–64.