

Reconstrucción post-evento del *flash-flood* del 1 de septiembre de 2021 en Les Cases d'Alcanar (Tarragona)

Post-event survey and reconstruction of the September 2021 flash-flood in Les Cases d'Alcanar (Tarragona)

Josep Carles Balasch^{1a*}, Jaume Calvet^b y Jordi Tuset^{1b,c}

^a Universitat de Lleida. ETSEA, Rovira Roure, 191, 25198-Lleida.

^b Universitat de Barcelona. Facultat de Ciències de la Terra, Martí i Franquès, s/n, 08028-Barcelona.

^c Universitat de Lleida. Fluvial Dynamics Research Group, RIUS, Rovira Roure, 191, 25198-Lleida.

E-mail: ^ajosepcarles.balasch@udl.cat, ^bjaucalpor@gmail.com, ^cjotume@gmail.com.

*Autor para correspondencia

Recibido: 07/10/2022

Aceptado: 23/12/2022

Publicado: 31/01/2023

Citar como: Balasch, J.C., Calvet, J., Tuset, J. 2023. Post-event survey and reconstruction of the September 2021 flash-flood in Les Cases d'Alcanar (Tarragona). *Ingeniería del agua*, 27(1), 29-44. <https://doi.org/10.4995/la.2023.18535>

RESUMEN

La crecida que se produjo el 1 de septiembre de 2021 en Les Cases d'Alcanar (Tarragona), es una de las de mayor magnitud del litoral mediterráneo occidental durante la época instrumental. Se ha realizado una reconstrucción post-evento determinando el caudal punta mediante el modelo hidráulico 2D IBER y la respuesta hidrológica de la cuenca a través del software hidrológico global HEC-HMS. Tras una lluvia de 251.9 mm en unas 3 horas, se estima que el pico fue de $159 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a la entrada de la población y el volumen de escorrentía fue de 1.15 hm^3 . El coeficiente de escorrentía alcanzó un valor de 0.76. Gran parte del desbordamiento en el núcleo poblado fue debido a la oclusión de los drenajes transversales al barranco y a la falta de capacidad de drenaje del canal. Los datos reconstruidos se consideran de un gran valor para la planificación de estructuras en cuencas pequeñas que carecen de datos de aforo.

Palabras clave | inundación súbita; reconstrucción hidráulica; modelización hidrológica; Serra de Montsià.

ABSTRACT

The paper studies the flash-flood that took place on September the 1st, 2021 in Les Cases d'Alcanar (Tarragona). Its meteorological and hydrological characteristics make it one of the most remarkable on the Western Mediterranean coast. A post-event reconstruction was carried out, which involved the determination of the peak flow using the 2D IBER hydraulic model and the hydrological response of the basin applying the HEC-HMS lumped model software. After a rain depth of 251.9 mm in 3 hours, the peak flow reached $159 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ in the town and the runoff volume was 1.15 hm^3 . The runoff coefficient was 0.76. A large part of the overflow in the urban area was due to the occlusion of the transversal drainages structures. The reconstructed data will be of great value for the planning of structures in small basins that generally lack data from gage stations.

Key words | *flash-flood; hydraulic reconstruction; hydrological modelling; Montsià Range.*

INTRODUCCIÓN

Descripción del suceso y daños producidos

Durante la mañana del 1 de septiembre de 2021 se produjeron unas lluvias de muy alta intensidad y de corta duración (torrenciales), con valores que localmente alcanzaron los 251.9 mm al pie de la Serra de Montsià, y al sur del delta del Ebro, en la costa de Tarragona. La zona más afectada por la respuesta hídrica de barrancos y vertientes queda situada entre los núcleos de Les Cases d'Alcanar y La Ràpita, pero especialmente sobre el primero (Figura 1). El desbordamiento en el tramo final del torrente que drena el Barranc de Sant Jaume causó la inundación de la mayoría de las calles y vías de la población de Les Cases d'Alcanar, con alturas de agua entre 0.5 m en las calles laterales y 2.5 m en las calles que encauzan el torrente. Con más de 600 viviendas, 500 vehículos, servicios urbanos afectados y el puerto marítimo muy dañado, se ha calculado que los daños podrían ascender a unos 16 millones de €. A pesar de la magnitud del suceso, afortunadamente no hubo que lamentar ninguna víctima.

Contexto de los *flash-floods* en la costa mediterránea española

Las precipitaciones que generan crecidas de tipo súbito o relámpago (*flash-floods*) en la costa mediterránea española son características de finales de verano y otoño causando graves afectaciones en las pequeñas cuencas litorales (Pino *et al.*, 2016; Barriendos *et al.*, 2019). En algunas ocasiones estos fenómenos alcanzan zonas situadas más al interior, generalmente al dorso de relieves montañosos paralelos a la costa, como la Cordillera Prelitoral (Llasat *et al.*, 2003; Ruiz-Bellet *et al.*, 2015; Martín-Vide y Llasat, 2018). Por los altos caudales y el reducido tiempo de respuesta, las crecidas de tipo *flash-flood* son muy peligrosas comportando habitualmente inundaciones con un gran número de pérdidas de vidas humanas, destrucción de infraestructuras y bienes e interrupción de servicios (Barredo, 2009; Gaume *et al.*, 2009; Faccini *et al.*, 2021).

Objetivo del trabajo

En este trabajo se pretende estudiar y reproducir la intensa respuesta hidrológica del Barranc de Sant Jaume y las consecuencias hidráulicas y del transporte de sedimentos sobre la población de Les Cases d'Alcanar a raíz del *flash-flood* del día 1 de septiembre de 2021. Suele ser difícil y muy ocasional, por la brevedad de los eventos, la escasez de aforos en cuencas de orden bajo y la conservación de los restos transportados, poder documentar con detalle la respuesta hidrológica y sedimentaria de este tipo de sucesos. Los resultados de estos estudios son de gran utilidad para conocer la dinámica de los *flash-floods* y aplicar este conocimiento a la reducción de futuros impactos.

DESCRIPCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN

El marco sinóptico de la precipitación correspondió a una depresión situada sobre la Península Ibérica que afectó a niveles medios y altos de la troposfera junto a un anticiclón que ejerció un bloqueo al norte de Europa y obligó a los frentes a descender de latitud y afectar al Mediterráneo. El viento era de componente E y SE. Este evento pertenece al tipo PSP1 de la clasificación propuesta por Gil-Guirado *et al.* (2022) para fenómenos de este tipo en la costa mediterránea española. Tienen una frecuencia baja, de tan solo el 5% sobre el total de episodios de lluvia que generan inundaciones, pero son muy peligrosos cuando afectan a cuencas con un tiempo de respuesta hidrológica muy corto.

Es importante destacar las precipitaciones de la semana previa al evento en esta zona. Siete días antes, en la noche del 24 al 25 de agosto, se registró una precipitación de 87.4 mm; el 29 de agosto hubo una de 1.3 mm, y otra el 30 de agosto con 5.4 mm. Estas precipitaciones permiten pensar que la situación de humedad antecedente de los suelos de la cuenca no presentaba la sequedad esperable para finales de verano.

La precipitación total en 24 h, de la mañana del miércoles día 1 a la del jueves día 2, en la estación meteorológica automática de Les Cases d'Alcanar del Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) fue de 251.9 mm, el máximo registro del episodio en la zona.

La mayor parte de la precipitación (206 mm) cayó en tan solo 2.5 horas, entre las 11 y 13:30 hora local. La intensidad máxima en 1 hora fue de 111.6 mm/h, la lluvia máxima en 30 minutos de 73.8 mm (147.6 mm/h) y la lluvia máxima en un minuto de 4 mm (240 mm/h). En las estaciones cercanas situadas en la franja meridional de la Serra del Montsià se observaron precipitaciones también muy elevadas (La Ràpita: 228.1 mm; Alcanar: 209, 8 mm; Els Alfacs: 142.4 mm). En el resto de las estaciones de la zona las precipitaciones fueron más moderadas (Calig: 83.5 mm; Amposta: 78.3 mm; Illa de Buda: 50.6 mm) indicando la reducida extensión del núcleo de máxima precipitación, como muestra la Figura 1. La información regional de la precipitación en la zona procede de los observatorios del SMC, de la Associació Valenciana de Meteorologia Josep Peinado (AVAMET) y de la red española de estaciones meteorológicas automáticas (METEOCLIMATIC).

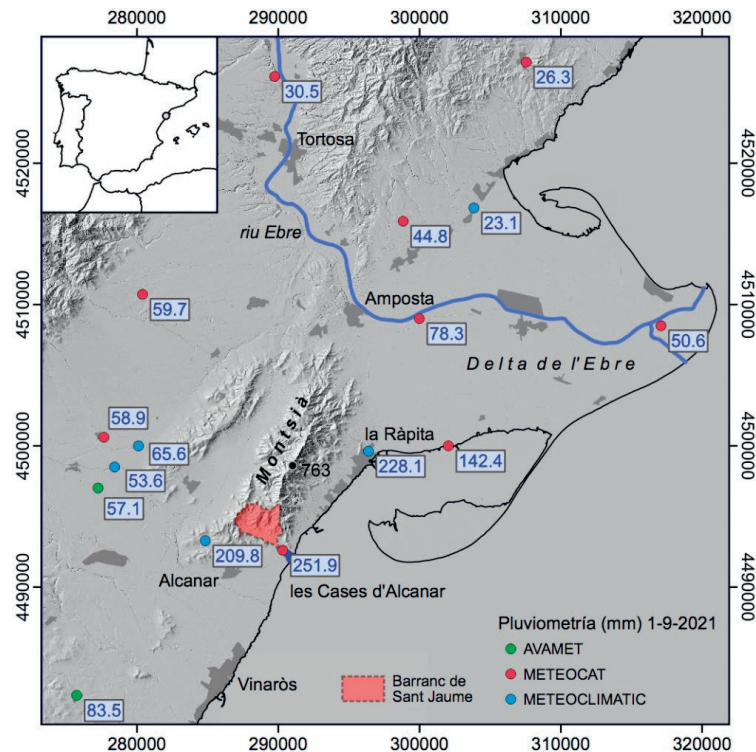


Figura 1 | Mapa de situación del Barranc de Sant Jaume, localizado al sur de la Serra de Montsià, entre los núcleos de población de Les Cases d'Alcanar y Alcanar. En el extremo superior izquierdo figura la situación de la zona de estudio (punto) en el marco de la Península Ibérica. Sobre el mapa del área estudiada, distribución de la precipitación del 1 de septiembre de 2021 a partir de las observaciones pluviométricas disponibles en diversas estaciones meteorológicas. Las estaciones AVAMET son de la Associació Valenciana de Meteorologia, METEOCAT pertenece al Servei Meteorològic de Catalunya y METEOCLIMATIC es una red española de estaciones meteorológicas automáticas. Coordenadas ETRS89 UTM 31N.

ÁREA DE ESTUDIO

El Barranc de Sant Jaume está situado en el sector sur de la Serra de Montsià. Tiene una cuenca orientada hacia el SE de 6.44 km² y un desnivel máximo de 500 m que finaliza en un cono de deyección junto al mar. La longitud del curso principal del barranco es de 6150 m. La pendiente media del cauce antes de la población es del 3% y sobre el cono de deyección es del 2.6%.

El substrato de la cuenca está formado principalmente por calizas ocreas, margas y margocalizas amarillas con alguna intercalación de arcillas rojas del Barremiense (Cretácico inferior) y las vertientes y fondos de valle están recubiertos por materiales aluviales locales recientes (Pleistoceno superior) (Canerot *et al.*, 1974; Berástegui y Puig, 2003). El cono de deyección construido a la salida de la cuenca está formado por sedimentos muy heterométricos (bloques, gravas, arenas y limos) también de edad cuaternaria (Pleistoceno superior).

El núcleo de Les Cases d'Alcanar se encuentra construido sobre los depósitos de un cono de deyección aluvial que procede del Barranc de Sant Jaume (Figura 2). El ápice del cono se encuentra a la altura de la Carretera Nacional 340 y su zona distal alcanza el mar. El lecho del barranco, con un solo canal, discurre a lo largo de unos 700 m por el interior de la población. El barranco de Sant Jaume está encauzado con muros laterales de piedra seca desde algunos centenares de metros antes de llegar a la población y de cemento durante buena parte de su recorrido urbano. Además, una solera de hormigón armado fija el fondo del cauce en los tramos de la población donde no aflora el substrato rocoso.

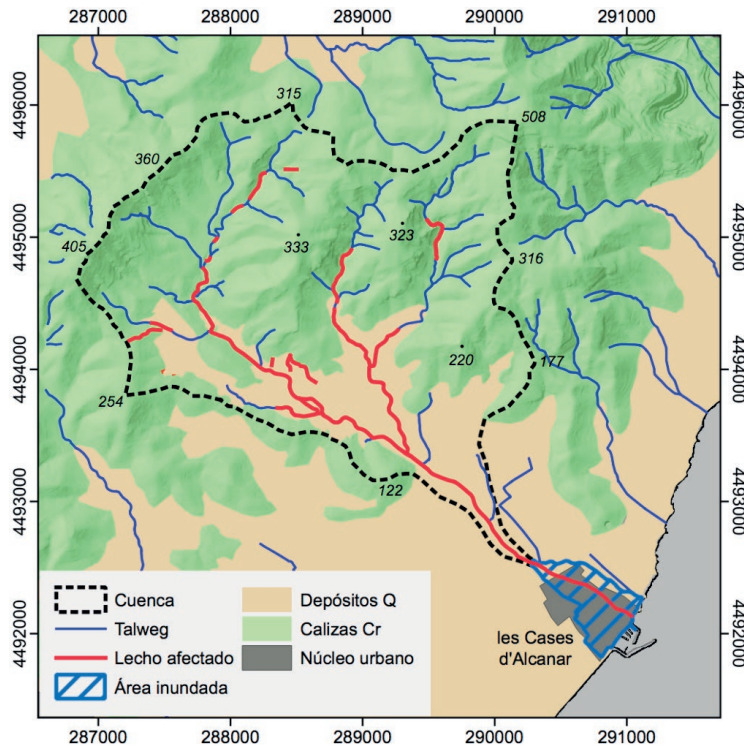


Figura 2 | Cuenca vertiente del Barranc de Sant Jaume y cono de deyección sobre el que se asienta la población de Les Cases d'Alcanar, con indicación del área inundada (en trama azul) que cubrió gran parte del cono. Q indica Cuaternario y Cr hace referencia al Cretácico inferior. Coordenadas ETRS89 UTM 31N.

METODOLOGÍA

La reconstrucción del evento se realizó a partir de un método iterativo estructurado en cuatro fases: (i) Reconstrucción del hidrograma del evento a la salida de la cuenca con un modelo hidrológico. (ii) Reconstrucción hidráulica de la crecida y ajuste iterativo del hidrograma de entrada resultante de la fase (i). Se modificó porcentualmente el hidrograma de entrada del modelo hasta que la cota máxima del nivel del agua de la simulación hidráulica coincidiera con el nivel observado a campo (limnimarca). (iii) Repetición de la modelización hidrológica, ajustando el número de curva hasta que el caudal pico del hidrograma en la salida de la cuenca coincidiera con el resultado del ajuste realizado con el modelo hidráulico. (iv) Repetición de la modelización hidráulica con el hidrograma ajustado en la fase (iii) para verificar que la respuesta hidráulica, en el punto de la limnimarca, continuaba siendo la misma.

(i) El análisis de la dinámica hidrológica de la crecida del Barranc de Sant Jaume se realizó cerrando una cuenca de 6.44 km² que tiene el punto de salida a unos 300 m aguas arriba de donde el barranco cruza la carretera N-340. Justo al lado del punto de salida se encuentra la estación meteorológica automática de Les Cases d'Alcanar (SMC), fuente de información pluviométrica del modelo (Figura 1).

Para conocer la respuesta hidrológica de la cuenca se simuló el hidrograma completo de la crecida con un modelo hidrológico global (software HEC-HMS, v 4.9; USACE, 2017). El modelo hidrológico se compone de una función que calcula las pérdidas sobre la lluvia o transformación hidrológica basada en el Numero de Curva (NC) del Soil Conservation Service (SCS, 1972) y, posteriormente, de una función que estima el tránsito hidrológico en la cuenca, en este caso el Hidrograma Unitario (HU) triangular sintético (SCS, 1972). El NC se obtuvo para cada subcuenca a partir de la información disponible en la web de la Agència Catalana de l'Aigua y se ponderó para toda la cuenca estudiada. El HU se sintetizó a partir del tiempo de concentración de la cuenca calculado con la fórmula de California.

Las condiciones de humedad antecedente de los suelos se establecieron por el procedimiento convencional sumando la lluvia de Les Cases d'Alcanar en los 5 días anteriores, que en este caso totalizaron 6.7 mm. Por tanto, los suelos según este criterio tendrían la condición de humedad NC-I o seca. Sin embargo, debido a que 7 días antes del episodio se produjo una destacada precipitación de 87.4 mm, también se analizó la respuesta hidrológica para los suelos de la cuenca en condición de humedad NC-III o húmeda y se compararon ambos resultados.

Las intensidades de la lluvia introducidas al modelo fueron de intervalos de 30 minutos y proceden de la estación automática de Les Cases d'Alcanar (SMC). Al ser una cuenca muy pequeña (6.44 km²), se consideraron estos datos como representativos de la lluvia en toda la cuenca. No se planteó la distribución de la misma con la ayuda de imágenes de radar por la disparidad entre los datos de los pluviómetros y la información de radar disponible para este episodio.

(ii) La reconstrucción hidráulica del caudal máximo circulante en el punto de salida se realizó con la ayuda del modelo hidráulico bidimensional IBER v3.1 (Bladé *et al.*, 2014; Sanz-Ramos *et al.*, 2022), basado en la solución en 2D de las ecuaciones de Saint-Venant con métodos de volúmenes finitos. El modelo se aplicó a un tramo del Barranc de Sant Jaume de 590 metros de longitud. El cauce está formado por una sección tipo de forma rectangular muy estable sobre un lecho mayormente de roca que tuvo un desbordamiento inferior a 0.5 m. Las alturas máximas de las aguas fueron de unos 3 m sobre el fondo del barranco. Dichas alturas fueron observadas directamente en horas posteriores a la tormentada a partir de marcas de fango y elementos flotantes enganchados a la vegetación en las márgenes.

Puesto que se desconocía inicialmente si el caudal punta de la avenida circuló antes o después de taponarse el puente de la N-340, se aplicó el modelo IBER v3.1 con dos modelos digitales del terreno (MDT) diferentes: uno previo al suceso que procede del Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), con un paso de malla de 2 m, el MET-2 (con fecha de vuelo 2011) y el otro sobre la morfología cambiada por la crecida obtenido con un levantamiento topográfico propio en campo mediante un GPS con sistema RTK (Leica Viva GS15) para la corrección de la información topográfica a tiempo real (con precisiones centimétricas; 3D, posicionamiento y elevación). El grado de ajuste entre alturas simuladas y reales (limnimarcas) definió la topografía a tener en cuenta. Se asignaron coeficientes de rugosidad a los diferentes usos del suelo (p. ej., lecho=0.035; lecho rocoso=0.025; árboles frutales=0.06) a partir de tablas de referencia (Sánchez y Lastra, 2011). Los usos del suelo se cartografiaron mediante información recogida en fotografías aéreas de alta resolución (pixel de 5 cm) del ICGC y visitas a campo. Finalmente, con el fin de ajustar el hidrograma obtenido en la simulación hidrológica, se realizaron diversas pruebas variando porcentualmente la magnitud del hidrograma de entrada hasta que la cota máxima del nivel del agua de la simulación hidráulica coincidió con el nivel observado en campo (limnimarca). Para acotar la incertidumbre se consideró un error en la estimación del coeficiente de Manning del $\pm 15\%$ tal como recomiendan algunos autores para reconstrucciones similares (Burnham y Davis, 1990; Amposah *et al.*, 2016), y de la altura del agua de unos ± 10 cm, de acuerdo con las desviaciones de las marcas en las observaciones de campo.

(iii) Finalmente, la condición inicial de humedad de los suelos del modelo hidrológico se fijó ajustando el NC hasta obtener un caudal punta del hidrograma igual al de la simulación hidráulica ajustada. El hidrograma resultante del ajuste con el modelo hidrológico puede no coincidir en forma y volumen con el hidrograma de entrada ajustado en la modelización hidráulica (fase iii), pudiendo generar una respuesta hidráulica diferente.

(iv) Repetición de la modelización hidráulica con el hidrograma resultante de la fase (iii) para verificar que el resultado de la reconstrucción hidráulica no variase el nivel del agua máximo en el punto donde se encuentra la limnimarca.

Para describir los efectos del aluvión de las aguas, la reconstrucción del caudal punta y sedimentos sobre la población se realizó una visita de campo dos días después del suceso (3 de septiembre de 2021) y otras visitas posteriores. Con las observaciones

de campo y sobre las fotografías aéreas realizadas por el ICGC el mismo día 3 de septiembre (pixel de 5 cm), se levantó una cartografía geomorfológica detallada que contiene: la extensión de la zona afectada por las aguas, las principales trayectorias de los flujos en calles y plazas, los obstáculos creados por algunas infraestructuras, las acumulaciones de materiales gruesos (bloques y gravas) y sedimentos finos (arenas, limos y arcillas). En el tramo aguas arriba de la Carretera N-340 esta cartografía también incluye los efectos de la erosión en los muros del canal, la erosión de las márgenes y del lecho y las acumulaciones sedimentarias de diferente clase granulométrica.

La posibilidad de disponer de imágenes grabadas de la crecida realizadas por los propios ciudadanos permitió tener un testimonio directo de las velocidades y alturas del flujo en diversos puntos de la población y de la turbidez de las aguas por sedimentos de una manera cualitativa y orientativa. Finalmente, con objeto de conocer la evolución en el tiempo del casco urbano de Les Cases de Alcanar se consultaron las fotografías aéreas ortorectificadas disponibles en el visor del ICGC correspondientes a diferentes vuelos desde 1945 hasta la actualidad.

RESULTADOS

Impacto de la crecida sobre la población de Les Cases d'Alcanar

El mapa de la figura 3 muestra la extensión del área inundada el 1 de septiembre de 2021 que afectó prácticamente todo el casco urbano, cubriendo 27.6 ha. La zona con mayores alturas de agua corresponde al propio canal, con máximos de más de 2.5 m, disminuyendo en las calles laterales donde se registraron alturas del agua de hasta 0.4-0.5 m. En el desbordamiento del torrente en Les Cases d'Alcanar cabe destacar 3 zonas críticas con gran obstrucción y desviación de los flujos: 1) el puente de la Carretera Nacional 340 a la entrada de la población, 2) el puente de la calle Trafalgar y 3) el cubrimiento del torrente en el tramo final desde la calle Isaac Peral hasta el mar.

En la primera zona (punto 1, Figura 3) se obturaron los 3 pasos inferiores del puente, de unos 10 m² de sección, por los arrastres sólidos. Una gran cantidad de aluviones saltaron por encima de la carretera N-340 que actuó de barrera y quedó cortada al tránsito. El flujo del torrente fue desviado transversalmente por la N-340 hacia la rotonda (con una anchura de 250 m), derivando gran parte del flujo del canal principal. Son visibles grandes acumulaciones de bloques y gravas sobre las zonas laterales de ribera, en especial, en la zona que precede al puente.

En la segunda zona (punto 2, Figura 3), el puente de la calle Trafalgar, con una sección de unos 24 m², también quedó obstruido y colmatado por los materiales arrastrados. El flujo saltó por encima y fue desviado parcialmente hacia los espacios laterales fuera del canal.

El tercer punto conflictivo (punto 3, Figura 3) se localiza en la intersección de la calle Isaac Peral con el canal. Antes de llegar a este punto el canal sufre un fuerte estrechamiento y a partir de allí circula cubierto y soterrado y la calle superior forma parte de la trama urbana como Calle y Plaza del Barranc. La sección hidráulica del canal en este punto, de unos 15 m², se vio reducida por los aportes de sedimentos y vegetación, y fue totalmente insuficiente. Así, las aguas desbordaron y discurrieron por las calles y plaza superiores destrozando parte de los inmuebles y en el tramo de desembocadura se produjo un gran socavón. Las viviendas y servicios del paseo marítimo quedaron gravemente afectados.

A lo largo del recorrido del canal la solera cementada y los muros laterales fueron destruidos en diversos puntos cercanos a los puentes citados. Muchas de las paredes de las casas vecinas al canal y muros de separación de las fincas y postes de energía fueron destruidos por las aguas e inundados los párquines.

Las figuras 4, 5 y 6 ilustran en detalle las acumulaciones de sedimentos en el canal, estructuras transversales y zonas desbordadas. El transporte de carga sólida fue muy destacado como se observa en el propio canal aguas arriba del cono de deyección. Algunos de los bloques transportados y depositados en las inmediaciones del canal dentro de la población tienen dimensiones de orden métrico. Las acumulaciones de arenas y sedimentos finos depositados en las calles fueron de entre 10 y 20 cm de altura. Se observaron también acumulaciones de residuos vegetales en diferentes obstáculos, pero no alcanzaron la importancia del transporte de sedimentos.

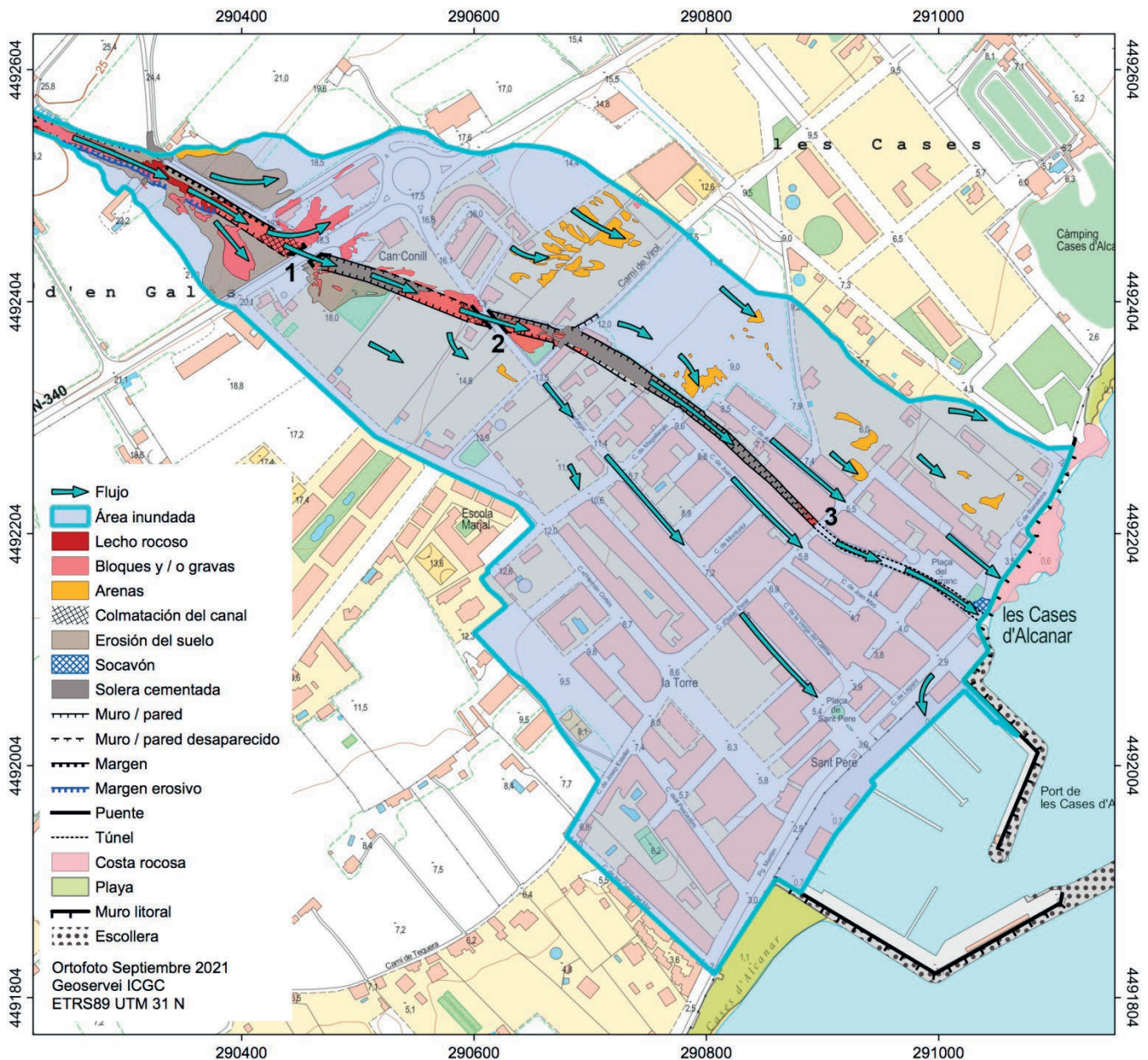


Figura 3 | Cartografía de la zona inundada por el *flash-flood* del 1 de septiembre de 2021 en la población de Les Cases d'Alcanar a partir de fotointerpretación de fotografías aéreas de alta resolución (pixel de 5 cm) hechas por el ICGC post-evento. Los daños en los puntos 1, 2, y 3 están referidos en el texto.

Resultados del modelo hidrológico precipitación-escorrentía. Volumen de escorrentía

Los NC de la cuenca ponderados para las condiciones NC-I (seca) y NC-III (húmeda) son, respectivamente, de 67.4 y de 96.6. La altura media de precipitación sobre la cuenca fue de 233.5 mm. El caudal punta de la avenida aplicando NC-I alcanzó los $66.4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ y para NC-III fue de $176.8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. El caudal de $159 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, igual al resultado del modelo hidráulico se alcanza introduciendo un NC ponderado de 82 que representa un valor ligeramente superior a la condición de NC-II (intermedia). La figura 7 muestra el hietograma de entrada y el hidrograma de respuesta de la cuenca para un NC de 82.

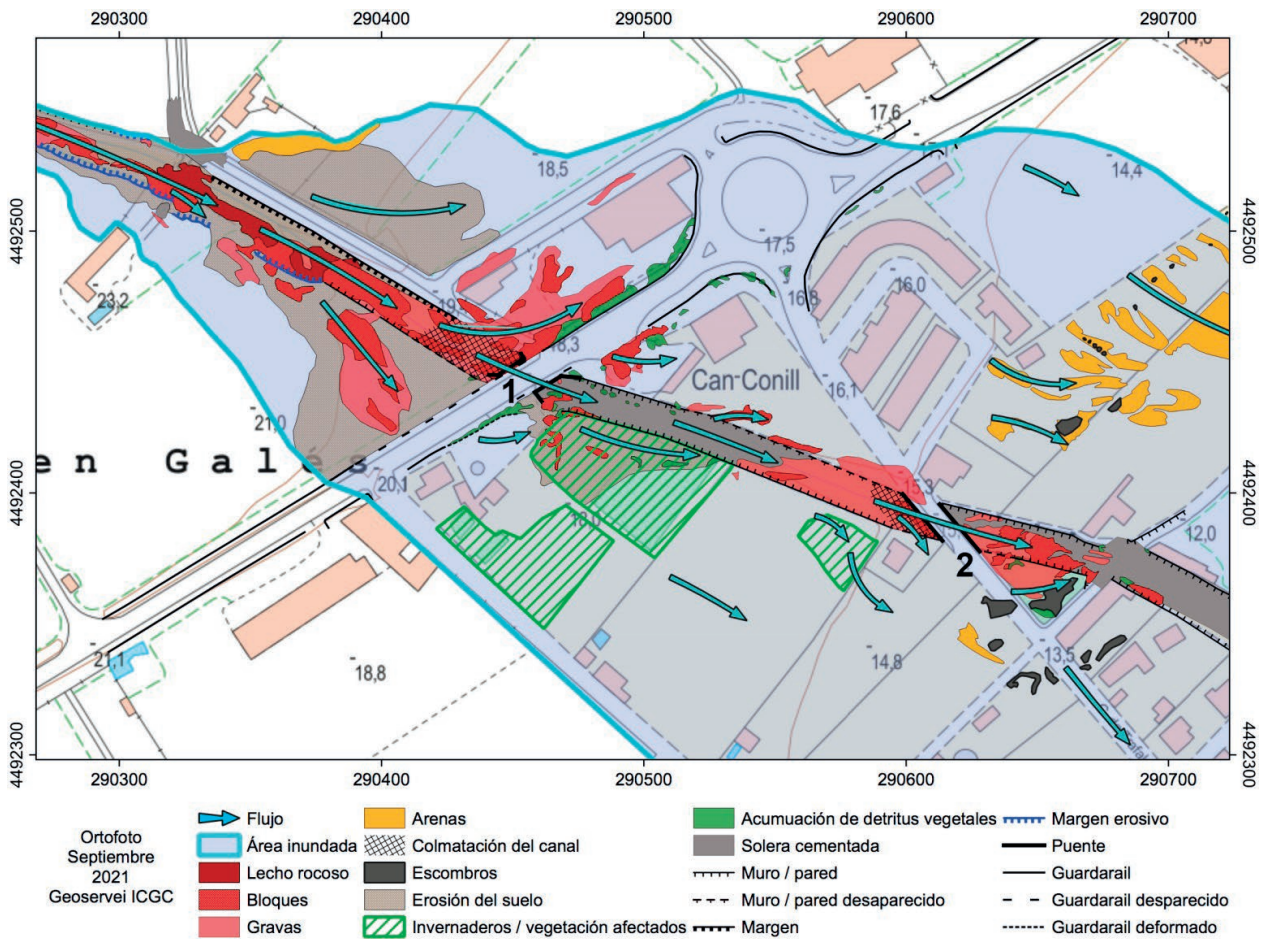


Figura 4 | Cartografía detallada de la zona inundada entre el ápice del cono de deyección y el puente de la calle Trafalgar, mostrando los principales depósitos de bloques, gravas y arenas derramados sobre la zona urbana. El punto 1 corresponde al puente de la N-340 y el punto 2 al puente de la calle Trafalgar. Coordenadas ETRS89 UTM 31N.

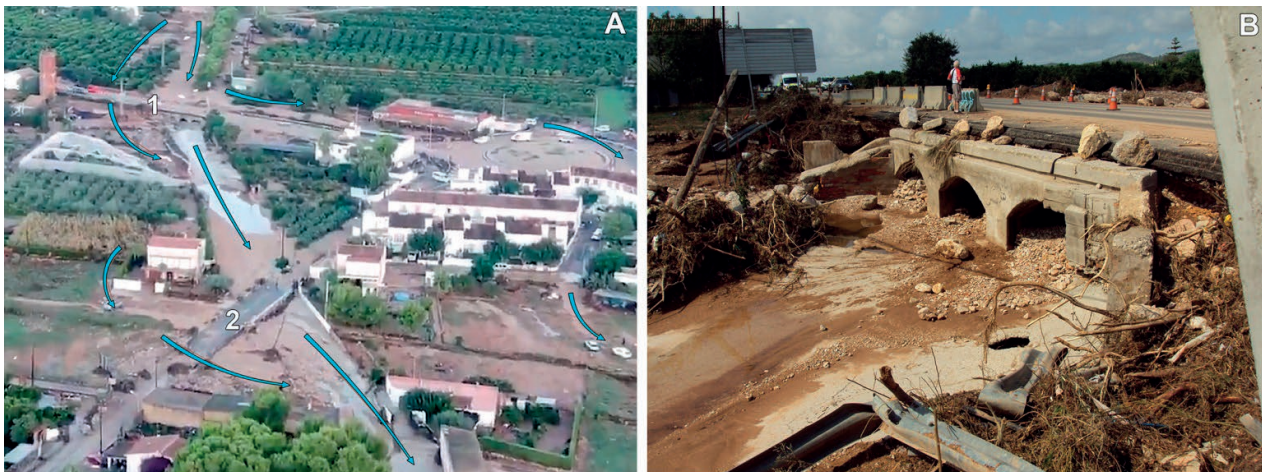


Figura 5 | A) Imagen aérea del barranco en la parte superior de la población entre la carretera N-340 (punto 1) y aguas abajo del puente de la calle Trafalgar (punto 2) en el pasado 1 de septiembre de 2021. Se indican con flechas en azul las direcciones del flujo por el canal y zonas laterales (Foto cortesía de Gerard Vilajoana). B) Imagen del puente de la carretera N-340 (punto 1) colmatado por los arrastres de sedimentos, visto desde aguas abajo hacia aguas arriba.



Figura 6 | A) Puente de la calle Trafalgar (punto 2) totalmente obturado por los materiales transportados. Vista desde aguas abajo hacia aguas arriba. B) Túnel de entrada al cubrimiento del torrente bajo las calles Isaac Peral y del Barranc desde aguas arriba (punto 3). Se observan las dimensiones de los fragmentos de los muros de piedra y paredes arrancados por las aguas y acumulados en el cauce.

El volumen de escorrentía directa que genera el modelo hidrológico ajustado es de 1.15 hm^3 , que equivalen a una altura de escorrentía de 178.5 mm. Por tanto, el coeficiente de escorrentía de esta crecida alcanza a ser de 0.76.

Resultados del modelo hidráulico: caudal punta estimado

Entre los dos escenarios topográficos utilizados, la simulación con el modelo IBER sobre el MDT posterior a la crecida produce mejores resultados de ajuste entre los niveles simulados y las limnimarcas o cotas reales del agua (Figura 8), en especial en las secciones cercanas al puente de la N-340. En el modelo sobre el MDT previo al suceso las alturas de agua calculadas son inferiores a las registradas, porque no reproduce el efecto de obstáculo generado por el puente. Ello indica que la topografía existente en el momento del caudal máximo era la modificada por la crecida con el puente taponado por sedimentos y restos vegetales que incrementaron la cota de las aguas. Las variaciones de altura entre los dos modelos en las mismas secciones pueden superar los 50 cm y estarían causadas por los cambios morfológicos en el canal por erosión y sedimentación o por los colapsos de los muros laterales. El caudal máximo que mejor se ajusta al conjunto de las limnimarcas (Figura 8B) es de $159 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Con este caudal los calados máximos estimados superan los 3 metros en la parte más encajada del canal. Más tarde el canal gana anchura y el calado disminuye (Figura 8A).

Las velocidades del flujo en algunos sectores del canal antes y en el interior de la población varían entre 3.5 y los $5.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ de máxima, y el flujo se mantiene en régimen subcrítico, excepto en un tramo en el que aflora la roca del substrato y coincide con un incremento de la pendiente. En los márgenes del canal el flujo pasa a ser supercrítico para retornar al régimen subcrítico cuando se invade la llanura de inundación y las velocidades decrecen.

Capacidad de transporte del flujo. Carga de fondo y transporte de materiales finos en suspensión del Barranc de Sant Jaume

La crecida produjo un ajuste geomorfológico del Barranc de Sant Jaume, con una activación de la dinámica sedimentaria que conllevó impactos en la morfología del canal, dejando a la vista algunos tramos del lecho constituidos únicamente por substrato rocoso y otros aterrados por importantes volúmenes de sedimentos. La gran energía del flujo quedó demostrada por la capacidad de movilizar grandes bloques de roca de orden métrico y expulsarlos a decenas de metros del canal (Figura 4), amén de las barras formadas por bloques menores, gravas, cantos y arenas. La mayoría del sedimento procede de la misma red fluvial, márgenes y cárcavas localizadas en los fondos de valle cubiertos por materiales aluviales, así como bloques de piedra de los muros de la canalización que se han liberado durante la crecida. Los vídeos de testimonios locales muestran claramente la turbidez de las aguas

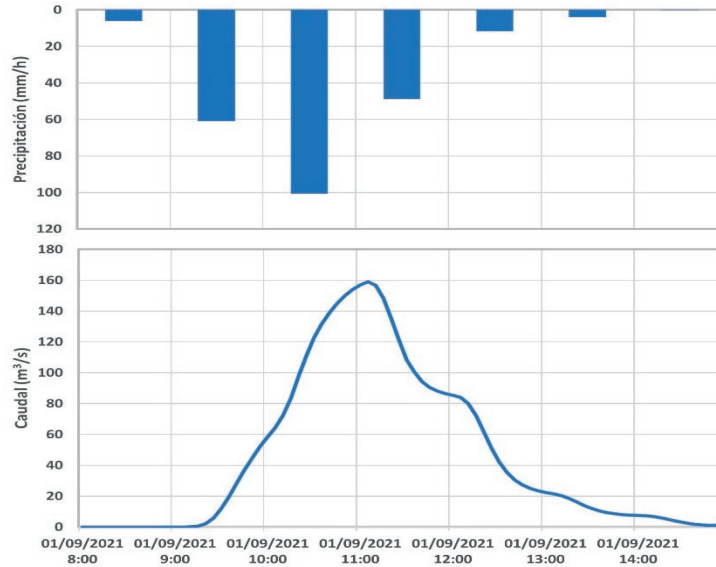


Figura 7 | Hietograma de la lluvia e hidrograma de respuesta simulado para la crecida del 1 de septiembre de 2021 en Les Cases d'Alcanar.

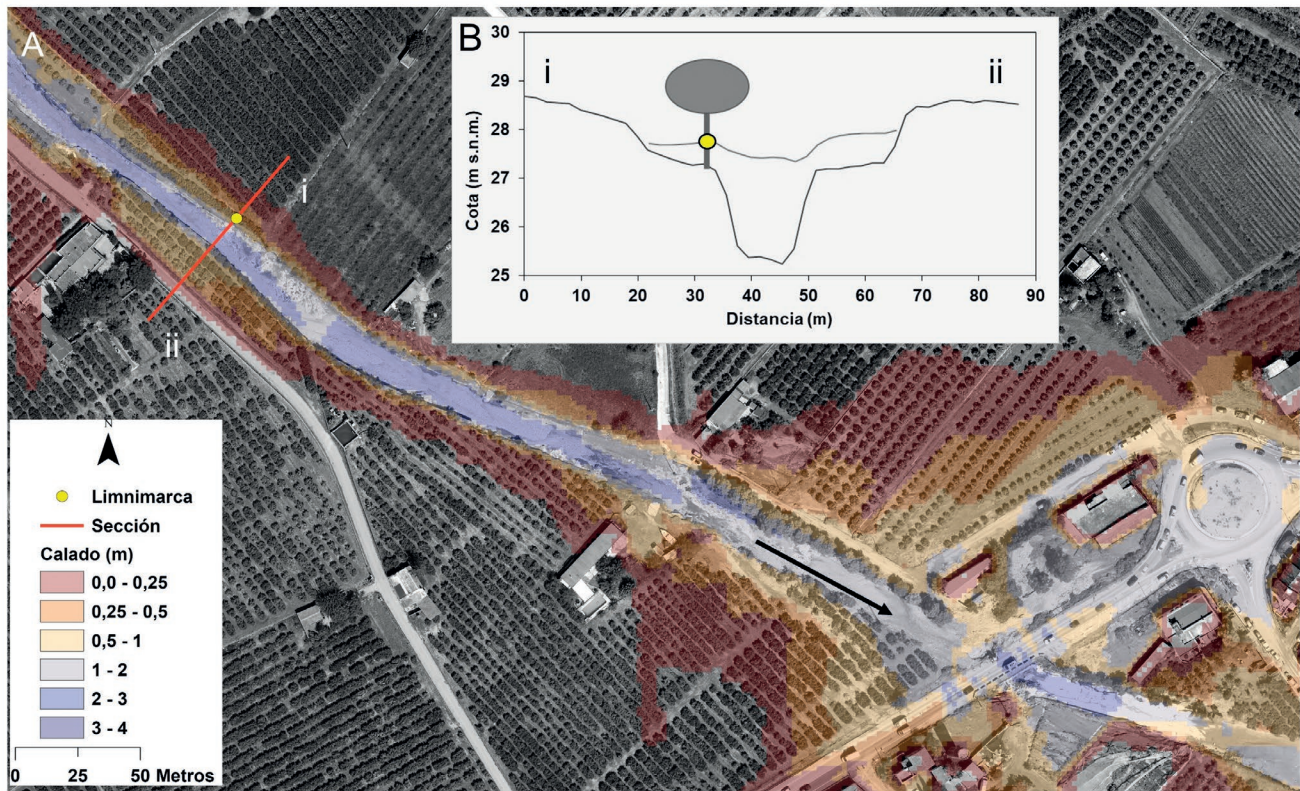


Figura 8 | A) Distribución del calado máximo de la crecida aguas arriba del puente de la Carretera Nacional 340 a la entrada de la población. La línea roja representa la sección de control que pasa por la limnimarca (punto amarillo) situada más arriba del modelo hidráulico. B) Perfil del terreno y nivel máximo de lámina de agua estimada para un caudal de $159 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La lámina de agua presenta la misma cota que la limnimarca. La orientación del perfil transversal es de aguas arriba hacia aguas abajo. La flecha muestra la dirección del flujo.

en los momentos centrales de la crecida que traducen una alta concentración de sedimentos en suspensión. El modelo hidráulico determina que en el centro del canal el diámetro crítico de los clastos transportados es de 0.2 m (con un coeficiente de variación del 30%), mientras que en las paredes del canal esta capacidad aumenta hasta superar el metro de diámetro. Esto explicaría los desperfectos de los márgenes y los bloques arrancados y transportados aguas abajo en el canal e incluso abandonados en la llanura de inundación.

DISCUSIÓN

Incertidumbre de los modelos. Influencia de la lluvia antecedente

En el modelo hidráulico el factor de mayor incertidumbre lo proporcionan el coeficiente de rugosidad y las variaciones en la topografía producidas por la erosión y sedimentación durante la crecida. Esta incertidumbre puede verse disminuida en este caso escogiendo el escenario topográfico post-evento que reproduce mejor los niveles reales del agua. Una variación del $\pm 15\%$ del coeficiente de Manning, considerada como habitual en ejercicios de este tipo (Burnham y Davis, 1990, Amposah *et al.*, 2016) y del mismo orden que los errores determinados en otros trabajos de reconstrucción (Lumbroso y Gaume, 2012; Amposah *et al.*, 2016; Scorpio *et al.*, 2018) produce cambios de altura del agua muy pequeños, de hasta 7 cm. Una variación de ± 10 cm de la altura del agua en la zona desbordada supone un rango de caudales entre 143.2 y 200.5 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Los resultados de la simulación con IBER v3.1 han corroborado una primera aproximación realizada en campo con la ecuación de Manning.

La respuesta del modelo hidrológico es fuertemente dependiente de las condiciones de humedad antecedente de los suelos de la cuenca (Cea y Fraga, 2018). Gracias a disponer de un valor estimado del caudal punta del hidrograma se han podido calibrar las condiciones de humedad inicial de los suelos para el modelo, que han resultado ser diferentes de las que indica la lluvia acumulada en 5 días anteriores (que implica un NC-I) tal como señala el método del SCS (1972), o las de la lluvia acumulada en los últimos 7 días (que significa un NC-III), puesto que ésta asciende a 87.3 mm y por tanto, los suelos no estarían en condición seca (NC-I) de partida. Así, la respuesta más próxima a los valores de caudal punta estimados se consigue con un NC situado entre la condición intermedia (NC-II) y húmeda (NC-III).

El lapso de tiempo real entre el pico de la lluvia y el desbordamiento del Barranc de Sant Jaume y la inundación de la población fue muy corto. La máxima intensidad de la lluvia se registró entre las 10 y las 11 horas UTC y el pico de la avenida en las calles hacia las 11 horas UTC, de acuerdo con los testimonios. El modelo reproduce bien este lapso (Figura 7).

Magnitud de la lluvia y del caudal punta

Las zonas con episodios de lluvias más copiosas e intensas se sitúan, en Catalunya, en la zona litoral, en concreto en el área del Cap de Creus, en el sistema Montseny-Guilleries y en la zona del Prades-Montsià-Els Ports de Tortosa, que incluye el delta del Ebro (Casas *et al.*, 2007; Lorente *et al.* 2013). Para la zona analizada estos estudios consideran que la lluvia máxima en 24 h prevista para un periodo de retorno de 500 años alcanzaría los 200-240 mm. Sin embargo, de acuerdo con datos del SMC, estas previsiones han sido igualadas o incluso superadas por algunos episodios como el presente, o el del 19 de octubre de 2018 con 199.8 mm en 24 h, y un total de 266 mm. En la vecina población de La Ràpita, a unos 8 kilómetros al NE, el día 20 de septiembre de 1972 se recogieron 307 mm en 24 h.

La tabla 1 registra algunos de los episodios de mayor precipitación diaria y mayor intensidad en Catalunya a partir de la segunda mitad del siglo XX. Muchos de los episodios superan ampliamente los 200 mm en 24 h y tienen valores de intensidad de 1 mm/min, pudiendo algunos, entre los que se encuentra el de Les Cases d'Alcanar, superar los 3 mm/min, el cual constituye el rango más elevado de valores registrados (Llasat, 2013). Además, la lluvia máxima observada en los intervalos de 3 y 4 horas en Les Cases d'Alcanar supera levemente los registros récord españoles (González y Bech, 2017). Así, tanto las intensidades de la lluvia, como la lluvia acumulada en 24 h de este episodio pueden considerarse entre las mayores medidas en el NE de la Península Ibérica.

El caudal punta específico o unitario (es decir, el caudal pico dividido por la superficie de la cuenca), que en este caso es de $24.8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$, se ha comparado con el de casos extremos de otras cuencas mediterráneas de dimensiones parecidas, extraídas de referencias bibliográficas (Amposah *et al.*, 2016; 2018; Scorpio *et al.*, 2018) y de reconstrucciones históricas propias (Ruiz-Bellet *et al.*, 2015; Pino *et al.*, 2016). La figura 9 muestra que el caudal específico de Les Cases d'Alcanar se encuentra en la zona de valores máximos, lo cual expresa la gran magnitud de la respuesta de la cuenca en este suceso. El mismo orden de magnitud muestra el índice de torrencialidad del evento (es decir, el caudal pico dividido por el caudal medio de la cuenca) con valor de 12340, considerando un caudal medio de $2 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$ para este tipo de cuenca (Serrat y Porta, 1985). Los valores más altos de este índice para pequeñas cuencas mediterráneas son de 10000 (Conacher y Sala, 1998).

Tabla 1 | Relación de episodios de gran cantidad de lluvia acumulada en 24 h e intensidad en Catalunya (Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Servei Meteorològic de Catalunya).

Observatorio pluviométrico	Fecha	Precipitación en 24h (mm)	Int. máx en 1 h (mm/h)	Int. máx. en 30 min. (mm/h)
Sabadell	25-09-1962	250	110	---
Esparraguera	20-09-1971	308	---	---
Rajadell	10-06-2000	224	120	---
Cabrils	12-12-2016	220.9	132.6	169.6
Prades	23-10-2019	287.4	66.3	88.4
Les Cases d'Alcanar	01-09-2021	251.9	111.6	147.6
El Perelló	23-11-2021	191.9	77	105.8

La base de flash floods mediterráneos EuroMedeFF (Amposah *et al.*, 2018) integra caudales punta específicos de diversos países de la Europa mediterránea (excepto España) del periodo 1991-2015 y contiene datos de microcuencas. La curva envolvente con los máximos eventos de esta base de datos es ligeramente mayor que la obtenida previamente por otros autores en la misma zona (Gaume *et al.* 2009; Marchi *et al.*, 2010). Sobre este ajuste una cuenca como la del Barranc de Sant Jaume tendría un caudal específico con un límite superior entre $45.8\text{-}56.7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$, el doble del acaecido aquí. El elevado coeficiente de escorrentía del evento (0.76) está muy por encima de la media de los conocidos para este tipo de cuencas (Marchi *et al.*, 2010) y ello vendría ocasionado por la alta humedad antecedente de los suelos al inicio de la tormenta.

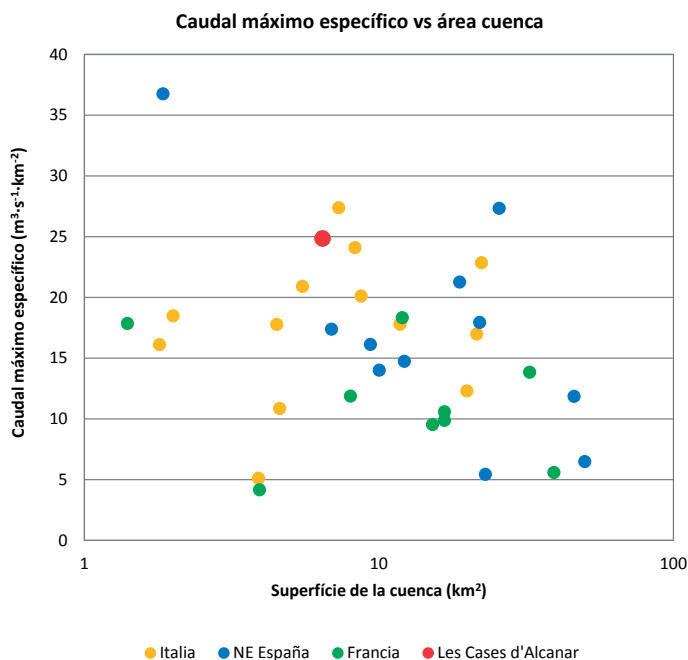


Figura 9 | Caudal máximo específico o unitario ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$) en relación a la superficie de la cuenca (km^2) para diversos *flash-floods* de pequeñas cuencas de hasta 50 km^2 de la vertiente mediterránea occidental (NE de España, Francia, Italia). Datos procedentes de Amposah *et al.* (2016, 2018), Scorpio *et al.* (2018) y propios.

Evolución de la trama urbana de Les Cases d'Alcanar. Cubrimiento del barranco y construcción de la Plaça del Barranc

La población de Les Cases d'Alcanar se desarrolló inicialmente a partir de un pequeño núcleo de pocas casas de pescadores ubicadas en la línea de mar. A partir de la segunda mitad del siglo xx hasta la actualidad esta localidad ha registrado un importante crecimiento urbano (Figura 10). Inicialmente el núcleo de pescadores se unía a la carretera N-340 por una vía de entrada y salida. Al trazarse la calle de Trafalgar, nueva vía de acceso desde la carretera nacional, se construyó un puente sobre el lecho del barranco. El actual puerto fue construido en la década de los setenta. En la década de 1980 se cubrió el tramo final del canal que conforma la actual Plaça del Barranc. Más tarde, a partir del año 2000, se soterró el canal entre la calle Isaac Peral y la Plaça del Barranc, creando un tramo cubierto en forma de túnel de unos 170 m hasta el mar. Durante la segunda mitad del siglo xx se ha ido construyendo el núcleo urbano alrededor del puerto pesquero y el torrente que ha quedado totalmente rodeado por calles y fincas residenciales sobre el cono de deyección y se ha convertido en un canal rectangular de sección variable.

Hasta el momento no se había producido ningún episodio de consecuencias parecidas, pero cabe recordar que el desarrollo urbano relevante tiene menos de 50 años, y este tipo de episodios tiene una recurrencia elevada. El caudal máximo de la inundación ha sido incapaz de circular por las infraestructuras actuales desbordando especialmente en los puntos señalados en el apartado de resultados. La capacidad de desagüe del canal en algunos tramos de la población es de aproximadamente un tercio del caudal punta. Pero, además, los sedimentos transportados por la torrentada obturaron los pasos transversales (puentes con pilas y túnel) reduciendo enormemente las secciones hidráulicas y obligando al flujo a saltar por encima y hacia los laterales. La desviación del flujo por los obstáculos transversales ha tenido, sin embargo, un efecto de reducción (o dispersión) del caudal y la altura de agua circulante por el canal principal, lo cual posiblemente ha evitado desgracias personales y mayores daños.

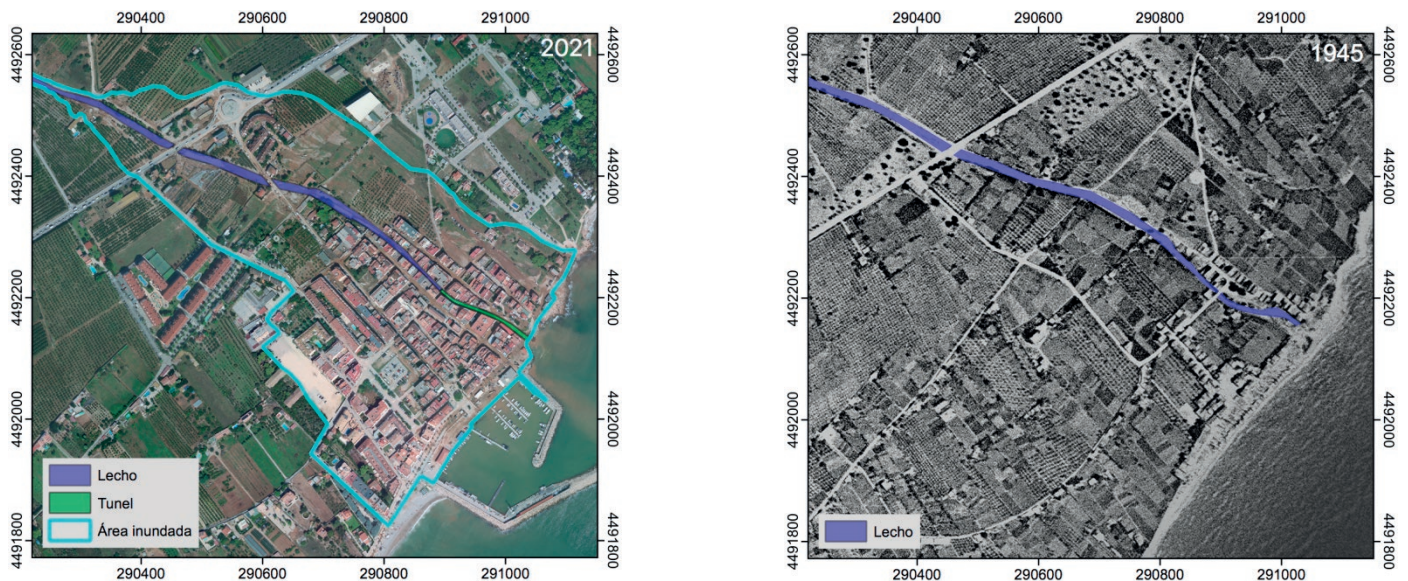


Figura 10 | Evolución del desarrollo urbano de la población de Les Cases d'Alcanar a partir de las fotografías aéreas de 1945 y 2021 del Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. Coordenadas ETRS89 UTM 31N.

Propuesta de medidas de minimización de los impactos

Entre las medidas estructurales que pueden reducir los efectos de nuevos episodios de crecida del barranco sobre la población se pueden apuntar las siguientes:

- a. La revegetación en las cabeceras de la cuenca para crear suelos con mayor capacidad de almacenamiento del agua y a la vez, desvíos del flujo en caso de crecida hacia campos laterales para retener agua.

- b. La construcción de estructuras de contención del agua de escorrentía antes de la llegada a la población. Teniendo en cuenta el volumen de escorrentía liberado en este episodio, del orden de 1.15 hm^3 , se deberían dimensionar unas balsas de retención lateral delimitadas por pequeñas motas (Solución Basada en la Naturaleza (SBN)), para almacenar al menos un 20-25% de este volumen. Estas balsas podrían aprovechar los campos de cultivo que rodean el curso bajo del torrente, antes de su llegada al cono de deyección, se entiende que sólo de manera temporal durante estos episodios
- c. La construcción de un curso alternativo del barranco evitando la población y la carretera N-340 desviando gran parte o la totalidad del flujo de la escorrentía de crecida. Evidentemente, es la medida más eficaz, pero a la vez la más costosa.

Además de las anteriores, las medidas no estructurales son también muy efectivas. Entre ellas son aconsejables: a) el plan local de protección civil actualizado para hacer frente a este riesgo, b) la instalación de sistemas de alerta temprana que avisen a la población de la superación de caudales umbral en el torrente, c) las medidas de autoprotección y entrenamiento de la población, sobre todo de la más vulnerable (colegios, residencias de mayores) ante una emergencia de este tipo.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los registros disponibles, la crecida del Barranc de Sant Jaume en Les Cases d'Alcanar del 1 de septiembre de 2021 debe ser considerada como uno de los flash floods más remarcables del litoral mediterráneo, si se tiene en cuenta la magnitud y la intensidad de la precipitación, el caudal máximo específico, el coeficiente de escorrentía y el impacto sobre la población. Los datos reconstruidos son de gran valor para la planificación de estructuras en cuencas pequeñas que generalmente carecen de estaciones de aforo.

El desbordamiento del flujo del barranco a la entrada de la población a causa de los obstáculos transversales que supusieron algunos puentes, provocó, por un lado, una gran expansión de la zona inundada, pero por otro, una reducción del caudal circulante por el canal principal y la disminución del calado del agua en el interior de la población, que de otra manera hubiese podido causar víctimas mortales y daños de mayor consideración. La contribución del transporte de sedimentos a la obstrucción de drenajes transversales fue clave en la dinámica del evento y de mucha mayor trascendencia que el transporte de materias vegetales.

El crecimiento urbanístico desde la segunda mitad del siglo xx ha ido provocando de forma progresiva la reducción de la capacidad de desagüe del Barranc de Sant Jaume, que ahora es claramente insuficiente para permitir el tránsito de tormentadas como la estudiada. El planeamiento urbanístico actual y futuro de la localidad debe tomar consciencia de la peligrosidad de este tipo de sucesos y de su agravamiento con el crecimiento de la trama urbana alrededor del barranco.

El poder determinar el caudal punta con el modelo hidráulico ha permitido calibrar el modelo hidrológico de la crecida y ajustar las condiciones del NC para la función de pérdidas, que de otra manera eran difíciles de establecer como se ha visto, cuando no podían inducir al error. En este ejemplo se ha visto la necesidad de considerar el estado de humedad de los suelos más allá de los 5 días anteriores al evento, para una correcta información del modelo hidrológico. El análisis de sensibilidad del modelo hidráulico respecto a la altura máxima del nivel del agua (limnimarca) es recomendable que sea \pm igual a la diferencia entre los testimonios observados del evento. Para que la reconstrucción hidráulica e hidrológica post-evento sean óptimas se debe acceder a la zona de estudio lo antes posible. Con ello se garantiza la permanencia de marcas del agua y arrastres y la frescura de la memoria de lo sucedido. De lo contrario, los testimonios son borrados con celeridad porque la población desea, lógicamente, alcanzar la rehabilitación y olvidar el suceso cuanto antes, de manera que desaparecen en los primeros días.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) los datos facilitados sobre la precipitación y radar meteorológico. Juan Carlos Peña (SMC) realizó la clasificación sinóptica del episodio. El Grupo de Investigación de Dinámica Fluvial RIUS de la Universitat de Lleida (2014-SGR-645) facilitó el material topográfico para campo. Así mismo, valoran muy positivamente la disponibilidad abierta de las imágenes aéreas obtenidas por el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC)

justo después del suceso, así como de los MDT. Han sido realmente útiles los testimonios, videos e imágenes obtenidos por la población durante el desarrollo de la crecida.

REFERENCIAS

- Amponsah, W., Marchi, L., Zoccatelli, D., Boni, G., Cavalli, M., Comiti, F., Crema, S., Lucía, A., Marra, F., and Borga, M. 2016. Hydrometeorological characterisation of a flash flood associated with major geomorphic effects: Assessment of peak discharge uncertainties and analysis of the runoff response, *J. Hydrometeor.*, 17, 3063-3077. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0081.1>
- Amponsah, W., Ayrál, P.-A., Boudevillain, B., Bouvier, C., Braud, I., Brunet, P., Delrieu, G., Didon-Lescot, J.-F., Gaume, E., Lebouc, L., Marchi, L., Marra, F., Morin, E., Nord, G., Payrastre, O., Zoccatelli, D., Borga, M. 2018. Integrated high-resolution dataset of high-intensity European and Mediterranean flash floods, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 1783-1794. <https://doi.org/10.5194/essd-10-1783-2018>.
- Barredo, J.I. 2009. Normalised flood losses in Europe: 1970-2016. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 97-104. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-97-2009>
- Barriendos, M., Gil-Guirado, S., Pino, D., Tuset, J., Pérez-Morales, A., Alberola, A., Costa, J., Balasch, J.C., Castellort, X., Mazón, J., Ruiz-Bellet, J.L. 2019. Climatic and social factors behind the Spanish Mediterranean flood event chronologies from documentary sources (14th-20th centuries). *Global and Planetary Change*, 182, 102997. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.102997>
- Berástegui, X., Puig, C. 2003. Mapa geològic de Catalunya 1:100.000 Comarques de l'Ebre. Institut Cartogràfic de Catalunya. Institut per al Desenvolupament de les Terres de l'Ebre, 104 p.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., Coll, A., 2012. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, CIMNE (Universitat Politècnica de Catalunya), 30(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Burnham M., Davis D. 1990. Effects of data errors on computed steady-flow profiles, *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(7), 914-929. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1990\)116:7\(914\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:7(914))
- Canerot, J., Leyva, F., Martín, L. 1974. Mapa Geológico de España 1:50.000 Hoja 547 Alcanar. Serie Magna. Instituto Geológico y Minero de España. Ministerio de Industria.
- Casas, M.C., Herrero, M., Ninyerola, M., Pons, X., Rodríguez, R., Rius, A., Redaño, A. 2007. Analysis and objective mapping of extreme daily rainfall in Catalonia. *International Journal Climat.*, 27(3), 399-409. <https://doi.org/10.1002/joc.1402>
- Cea, L., Fraga, I. 2018. Incorporating antecedent moisture conditions and intraevent variability of rainfall on flood frequency analysis in poorly gauged basins. *Water Resources Research*, 54, 8774-8791, <https://doi.org/10.1029/2018WR023194>
- Conacher, A.C.; Sala, M. (eds.) 1998. *Land Degradation in Mediterranean Environments of the World: Nature and Extent, Causes and Solutions*. Wiley, Chichester, 491 pp.
- Faccini, F., Luino, F., Paliaga, G., Roccati, A., Turconi, L. 2021. Flash flood events along the West Mediterranean coasts: inundations of urbanized areas conditioned by anthropic impacts. *Land*, 10, 620. <https://doi.org/10.3390/land10060620>
- Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., Blaškovičová, L., Blöschl, G., Borga, M., Dumitrescu, A., Daliakopoulos, I., Garcia, J., Irimescu, A., Kohnová, S., Koutroulis, A., Marchi, L., Matreata, S., Medina, V., Preciso, E., Sempere-Torres, D., Stancalie, G., Szolgay, J., Tsanis, I., Velasco, D., Viglione, A. 2009. A collation of data on European flash floods, *J. Hydrol.*, 367, 70-78. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.028>
- Gil-Guirado, S., Pérez-Morales, A., Pino, D., Peña, J.C., López, F. 2022. Flood impact on the Spanish Mediterranean coast since 1960 based on the prevailing synoptic patterns. *Science of the Total Environment*, 807, 150777. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150777>

- González, S., Bech, J. 2017. Extreme point rainfall temporal scaling: a long term (1805-2014) regional and seasonal analysis in Spain. *Int. J. Climatol.* 37, 5068-5079. <https://doi.org/10.1002/joc.5144>
- Llasat, M.C. 2013. A holistic approach to knowledge of floods. *In: Adverse weather in Spain* (C. García-Legaz & F. Valero, eds.). Consorcio de Compensación de Seguros. Madrid Vicente Ediciones, Madrid, 207-219
- Llasat, M.C., Rigo, T., Barriendos, M. 2003. The “Montserrat-2000 flash flood event: a comparison with the floods that have occurred in the Northeastern Iberian Peninsula since the 14th Century. *Int. J. Climatol.*, 23, 453-469. <https://doi.org/10.1002/joc.888>
- Lorente, J., Casas, M.C., Rodríguez-Solá, R., Redaño, A. 2013. Extreme rainfall rates and probable maximum precipitation. *In: Adverse weather in Spain* (C. García-Legaz & F. Valero, eds.). Consorcio de Compensación de Seguros. Madrid Vicente Ediciones, Madrid, 135-148.
- Lumbroso, D., Gaume, E. 2012. Reducing the uncertainty in indirect estimates of extreme flash flood discharges. *J. Hydrol.*, 414-415, 16-30. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.08.048>
- Marchi, L., Borga, M., Preciso, E., Gaume, E. 2010. Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management, *J. Hydrol.*, 394, 118-133. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.017>
- Martín-Vide, J.P., Llasat, M.C. 2018. The 1962 flash flood in the Rubí stream (Barcelona, Spain). *J. Hydrol.*, 566, 441-454. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.028>
- Pino, D., Ruiz-Bellet, J.L., Balasch, J.C., Romero-León, L., Tuset, J., Barriendos, M., Mazon, J., Castelltort, X. 2016. Meteorological and hydrological analysis of major floods in NE Iberian Peninsula. *J. Hydrol.*, 541, 63-89. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.008>
- Ruiz-Bellet, J.L., Balasch, J.C., Tuset, J., Barriendos, M., Mazón, J., Pino, D. 2015. Historical, hydraulic, hydrological and meteorological reconstruction of 1874 Santa Tecla flash floods in Catalonia (NE Iberian Peninsula). *J. Hydrol.*, 524, 279-295, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.023>
- Sánchez, F.J., Lastra, J. 2011. *Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid.
- Sanz-Ramos, M., Cea, L., Bladé, E., López-Gómez, D., Sañudo, E., Corestein, G., García-Alén, G., Aragón-Hernández, J. 2022. Iber v3. Manual de referencia e interfaz de usuario de las nuevas implementaciones, Iber. More than 2D Hydraulic modelling. https://www.scipedia.com/public/Sanz-Ramos_et_al_2022b
- Scorpio, V., Crema, S., Marra, F., Righini, M., Ciccacese, G., Borga, M., Cavalli, M., Corsini, A., Marchi, L., Surian, N., Comiti, F. 2018. Basin-scale analysis of the geomorphic effectiveness of flash floods: A study in the northern Apennines (Italy). *Science of The Total Environment*, 640-641, 337-351. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.252>
- Serrat, D., Porta, J. (eds.). 1985. *Història Natural dels Països Catalans*, Vol. 3, Recursos geològics i sòl. Enciclopedia Catalana, Barcelona.
- Soil Conservation Service (SCS). 1972. *National Engineering Handbook*, Section 4: Hydrology. U.S. Department of Agriculture, Washington DC, USA
- US Army Corps of Engineers (USACE). 2017. *Hydrologic Modelling System HEC-HMS Application Guide*. Hydrologic Engineering Center, Davis, California, USA