

GERARDO BENITO^a

CARLES BENEYTO^b

JOSE ÁNGEL ARANDA^c

MARIA MACHADO^d

FÉLIX FRANCÉS^e

YOLANDA SÁNCHEZ-MOYA^f

INUNDACIONES Y CAMBIO CLIMÁTICO: CERTEZAS E INCERTIDUMBRES EN EL CAMINO A LA ADAPTACIÓN

RESUMEN

En la actualidad, existe una gran incertidumbre sobre los efectos del cambio climático en la peligrosidad de las inundaciones. Los caudales extremos dependen de las características de las cuencas y representan una respuesta local que, a menudo, no puede interpretarse a partir de los modelos de clima. En la práctica, esta incertidumbre dificulta la adaptación a los riesgos futuros según el mandato de la Directiva Europea de Inundaciones (2007/60/EC). En un caso de estudio (rambla de la Viuda, Castelló) se ha aplicado un análisis de caudales máximos (recurrencia de 100 años) sobre la base de proyecciones de

a Departamento de Geología, Museo Nacional de Ciencias Naturales - CSIC. C/ José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid. benito@mncn.csic.es. <https://orcid.org/0000-0003-0724-1790>.

b Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n. 46022 Valencia. carbeib@alumni.upv.es. <https://orcid.org/0000-0003-3358-0710>.

c Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n. 46022 Valencia. jaranda@upv.es. <https://orcid.org/0000-0001-6457-1150>.

d Departamento de Geología, Museo Nacional de Ciencias Naturales - CSIC. C/ José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid. mjmachado09@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-8780-4164>.

e Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n. 46022 Valencia. ffrances@upv.es. <https://orcid.org/0000-0003-1173-4969>.

f Facultad CC. Geológicas, Universidad Complutense de Madrid - Instituto de Geociencias (CSIC-Universidad Complutense de Madrid). 28040 Madrid, España. yol@ucm.es. <https://orcid.org/0000-0002-1966-3838>.

Fecha de recepción: 02-08-2021. Fecha de aceptación: 09-12-2021.

precipitación extrema (escenario RCP 8.5) realizadas con modelos de clima regionales (Eurocordex), y convertida en caudal instantáneo mediante un modelo hidrológico distribuido (TETIS). El análisis muestra una elevada variabilidad de los resultados, por lo que resulta difícil determinar la bondad de los modelos de clima. Por otro lado, se han analizado series largas de inundaciones obtenidas a partir de registros históricos y sedimentarios (paleoinundaciones), que permiten obtener los caudales máximos registrados secularmente. Esta información incorpora eventos de inundación que han ocurrido en periodos pasados de calentamiento relativo o de incremento de la actividad de las inundaciones, considerando que los eventos extremos que han acontecido alguna vez pueden repetirse en el futuro. Estos caudales del pasado se han analizado conjuntamente con registros instrumentales y ha mejorado sustancialmente el cálculo de los cuantiles de inundación requerido en los mapas de peligrosidad de la Directiva de Inundaciones. Los caudales de extremos de paleoocrecidas permiten validar los datos de los modelos de clima e hidrológicos para los cuantiles altos. Esta aproximación constituye una práctica beneficiosa (*win-win actions*), de relativo bajo coste, y que permite avanzar en la adaptación al cambio climático. Igualmente, esta información del pasado proporciona una evidencia clara de sucesos de inundación que posibilitan la recuperación de la cultura del riesgo.

PALABRAS CLAVE: cambio climático; inundaciones; paleoinundaciones; peligrosidad de inundaciones, adaptación al cambio climático; prácticas beneficiosas de adaptación.

FLOODS AND CLIMATE CHANGE: CERTAINTIES AND UNCERTAINTIES ON THE ROAD TO ADAPTATION

ABSTRACT

There are major challenges in dealing with the effects of climate change on flood hazard worldwide. Discharge resulting from extreme rainfalls depend on catchment characteristics and commonly represent a local response that cannot be interpreted entirely from climate models. In practice, this uncertainty makes it difficult to adapt to future risks as mandated by the European Flood Directive (2007/60/EC). In a case study (rambla de la Viuda, Castelló) an analysis of peak discharges (100-year recurrence) has been applied based on extreme precipitation projections (RCP 8.5 scenario) made with regional climate models (Eurocordex), and converted into instantaneous discharge using a distributed hydrological model (TETIS). The analysis shows a high variability in the results, making difficult to determine the goodness of the climate models. On the other hand, long series of floods obtained from historical and sedimentary records (paleofloods) have been analysed, obtaining centennial long records of flood discharges. This information incorporates flood events that have occurred in past periods of relative warming or increased flood activity, considering that extreme events that have occurred in the past may be repeated in the future. These past discharges have been analysed in conjunction with instrumental records, substantially improving the calculation of the flood quantiles required in the Flood Directive hazard maps. Paleoflood extreme data allow validation of climate and hydrological model data for high quantiles. This approach is a win-win action, relatively low-cost,

and allows progressing on the adaptation to climate change. Likewise, this information from the past provides “real” evidence of flood events as a direct guide of flood possibilities, such that local people are motivated to deal with their local flood problems increasing the risk culture.

KEYWORDS: climate change; floods; palaeofloods; flood hazards, climate change adaptation; win-win actions to adaptation.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el último informe del IPCC (Jiménez Cisneros et al., 2014), existe un amplio consenso científico de que el cambio climático producirá variaciones en los patrones de inundación, por lo que es importante avanzar en el estudio de las potenciales consecuencias y riesgos que se puedan derivar (Döll et al., 2015). En la actualidad, existe una gran incertidumbre sobre su efecto en los caudales máximos, ya que estos representan una respuesta local al cambio climático y, frecuentemente, no pueden interpretarse a partir de proyecciones regionales en la precipitación. Por ejemplo, las lluvias intensas de 180-140 mm en 72 horas (Deutscher Wetterdienst, DWD www.dwd.de) registradas en Alemania, Bélgica y Holanda entre el 14 y el 15 de julio de 2021, con más de 190 muertos y más de 1.300 desaparecidos (en el momento en el que escribimos), se produjeron por bajas presiones de mesoescala con trayectoria lenta que individualmente no causan severos desbordamientos, pero en esta ocasión ocurrieron tras la acumulación de varias situaciones de lluvias intensas en junio y julio. En la práctica, la complejidad de las situaciones extremas individuales o combinadas dificulta la planificación y la adaptación a los riesgos futuros debido a la imposibilidad de tomar medidas concretas requeridas en la implementación de la Directiva Europea de Inundaciones (2007/60/EC; EC, 2000). Por otro lado, la primera Ley Europea del Clima (2021/1119/EC; EC, 2021a) “requiere desarrollar e implementar estrategias de adaptación para fortalecer la resiliencia y reducir la vulnerabilidad a los efectos del cambio climático”. Esta brecha existente entre los requerimientos sociopolíticos y el conocimiento científico-técnico condiciona la toma de soluciones por parte de los países europeos, que, en la práctica, ha supuesto una tímida integración de los efectos del cambio climático en el sistema nacional de zonas inundables (EC, 2021b).

En los estudios de los impactos del cambio climático resulta habitual explorar soluciones que resulten beneficiosas (*win-win actions*) y que permitan avanzar en la adaptación al cambio climático. En el caso de las inundaciones, se trata de mejorar nuestro conocimiento sobre los eventos extremos bajo condiciones climáticas adversas y aplicar un enfoque de gestión adaptativa, que permite adoptar soluciones a las condiciones cambiantes (i. e., nueva información) sobre la base de un proceso iterativo continuo de revisión. El punto de partida de esta estrategia consiste en abordar la problemática a escala local mejorando la información y el análisis de los eventos extremos bajo el clima pasado, presente y futuro.

En este sentido, diversos autores (Beneyto et al., 2020; St. George et al., 2020) han propuesto el análisis de series largas de inundaciones obtenidas a partir de registros históricos y de paleoinundaciones para obtener los caudales máximos registrados secularmente. Esta información incorpora eventos

de inundación que han ocurrido en periodos pasados de calentamiento relativo o de incremento de la actividad de las inundaciones. En este enfoque se parte de la premisa de que eventos extremos que han acontecido alguna vez pueden repetirse en el futuro. Estos caudales del pasado se pueden analizar conjuntamente con registros instrumentales, lo que mejora sustancialmente la cuantificación de los cuantiles de inundación requeridos en los mapas de peligrosidad de la Directiva de Inundaciones. Esta aproximación constituye una práctica beneficiosa, de relativo bajo coste y que permite avanzar en la adaptación al cambio climático. Igualmente, esta información del pasado proporciona una evidencia “real” de sucesos de inundación que posibilitan la recuperación de la cultura del riesgo.

En este trabajo se describe un caso de estudio correspondiente a la rambla de la Viuda (provincia de Castelló) donde se ha aplicado un análisis de caudales máximos sobre la base de proyecciones de precipitación extrema (recurrencia media de cien años) realizadas con modelos climáticos regionales (Eurocordex), y que se han incorporado en un modelo hidrometeorológico (TETIS). Los cuantiles de caudales obtenidos con proyecciones de clima futuro se comparan con los resultantes de incorporar eventos extremos de caudal estimados con estudios de paleocrecidas. Los objetivos de este análisis son (1) determinar los caudales extremos de inundaciones sobre la base de proyecciones climáticas y su incertidumbre asociada, (2) determinar los caudales máximos de los registros seculares de paleocrecidas e inundaciones históricas, (3) comparar y determinar la robustez de los resultados en ambos procedimientos y (4) plantear alternativas y análisis conjuntos que permitan mejorar la estimación de caudales máximos bajo condiciones de cambio climático.

METODOLOGÍA

La metodología propuesta (figura 1) incluye tres principales tipos de análisis y/o datos: (1) modelo climático, (2) modelo hidrológico distribuido y (3) modelo paleohidrológico y de cambios ambientales.

La proyección de la tendencia futura de la precipitación máxima y la temperatura se obtiene de la modelización dinámica de EURO-CORDEX (Casanueva et al., 2016), que presenta una resolución estándar de $0,11^\circ$ (~ 12 km). Se han seleccionado cinco modelos (tabla 1) que recogen la variabilidad de cuatro modelos de circulación global (GCM) y tres modelos regionales de clima (RCM). Los periodos climáticos considerados son 1971-2000 para el clima actual observado (base de datos Spain02v04) y para el histórico simulado con los modelos de clima (histórico simulado), y 2041-2070 (futuro simulado) para el periodo de futuro con el escenario de emisiones RCP8.5. Los datos Spain02 corresponden a datos diarios observados (precipitación, temperatura media, máxima y mínima) en las estaciones AEMET e interpolados en la rejilla definida por la iniciativa Eurocordex (Herrera et al., 2016).

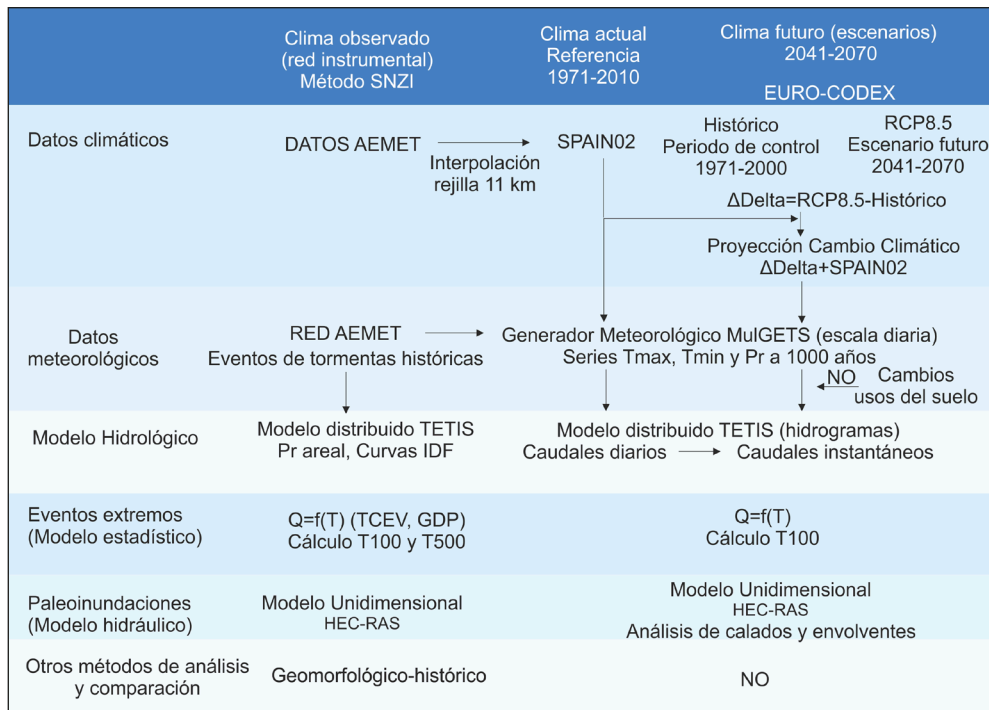


Figura 1. Esquema del proceso metodológico.

Tabla 1. Proyecciones EURO-CORDEX implementadas (Modelos 1, 7, 8, 9 y 11).
Estas proyecciones resultan de la combinación de cuatro modelos globales y tres modelos regionales de clima.

ID	Modelos de Circulación Global (Earth System Models; ESM)	RCM
1	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CCLM4-8-17
7	IPSL-IPSL-CM5A-MR	RCA4
8	MOHC-HadGEM2-ES	CCLM4-8-17
9	MOHC-HadGEM2-ES	RACMO22E
11	MPI-M-MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17

En las salidas de los RCM se han corregido los sesgos mediante el “método delta” (Zahn & von Storch, 2010). La obtención de la señal de cambio climático (“delta”) se obtuvo por comparación del modelo climático en periodo de control (1971-2000) con la serie de observaciones de Spain02 (climatología de referencia) en el mismo periodo y se trasladó a la proyección del modelo climático (2041-2070). La proyección ya corregida, pero de escasa longitud (treinta años), se introdujo en el generador meteorológico (MulGETS) para simular mil años de precipitaciones y así obtener los cuantiles

de alto periodo de retorno de una forma más verosímil. Por lo tanto, el generador no se utilizó para incorporar la señal del cambio climático vía parametrización, por ejemplo, sino que únicamente se utilizó para obtener series largas y así poder estimar los cuantiles de alto periodo de retorno.

La generación de precipitación en MulGETS incluye cinco pasos: (1) determinación de los parámetros del generador meteorológico: p_{00} , p_{10} y función de distribución de precipitaciones a escala mensual; (2) cálculo de matrices de correlación de ocurrencia de precipitación y cantidades; (3) generar la ocurrencia de precipitación espacialmente correlacionada; (4) establecer un vínculo entre el índice de ocurrencia y las cantidades de precipitación promedio para cada estación y construir la distribución multiexponencial o multigamma para cada estación, y (5) generar cantidades de precipitación basadas en el índice de ocurrencia de la ocurrencia generada. Además, como se concluye en Chen et al. (2014) y Mehan et al. (2017), MulGETS reproduce satisfactoriamente la correlación observada tanto para la ocurrencia de precipitación como para las cantidades de lluvia. Además, se ha observado en algunos estudios con una red densa de pluviómetros que el modelo satisface la correlación de la lluvia generada en los distintos puntos, así como las cantidades en cada uno de ellos.

Los datos climáticos se incorporan en el modelo hidrológico distribuido TETIS (Francés et al., 2007) calibrado y validado con datos observados. El modelo ecohidrológico TETIS es un modelo conceptual (estructura de tanques) con parámetros físicamente basados que incorpora una estructura efectiva de parámetros (Francés et al., 2007) con únicamente nueve parámetros que calibrar en el submodelo hidrológico. La calibración de estos parámetros se realizó en dos fases: una primera mediante un análisis de sensibilidad de estos a partir de unos valores establecidos mediante el criterio experto y una segunda fase a través del potente algoritmo automático de calibración que incorpora el modelo TETIS. Los resultados de la función objetivo (Nash-Sutcliffe) son de 0,93 para los caudales en calibración en Maria Cristina (periodo 2003-2004), de 0,928 de validación temporal en Maria Cristina (2000-2001) y de 0,428 en la validación espacial en Vall d'Alba (2003-2004).

La implementación del modelo TETIS se realizó a escala diaria basándose en los trabajos anteriores realizados por Montalvo y Francés (2017) usando datos de lluvias de Spain02 v5. El modelo hidrológico diario permite la asignación de probabilidad a la magnitud de los hidrogramas en los puntos de entrada del embalse (PE). Los caudales diarios se han transformado en instantáneos aplicando una ecuación empírica de corrección (ver figura 7 de Beneyto et al., 2020). En el análisis de frecuencias de inundaciones para clima observado con lluvias de Spain02 v5 se utilizó el programa AFINS 2.0 basado en algoritmos de máxima verosimilitud (Botero & Francés, 2006). Las funciones con mejor ajuste fueron la distribución de valores extremos de dos componentes (TCEV) y Pareto generalizada (GDP), fundamentalmente debido a la existencia de dos poblaciones de eventos extremos (Francés, 1998).

El estudio de paleocrecidas se ha basado en la estratigrafía de los depósitos de remanso, su datación mediante radiocarbono y luminiscencia y la determinación del calado mínimo de las crecidas. Los registros corresponden al estudio realizado por Machado et al. (2017) en la rambla de la Viuda y Benito et al. (2020) en el río Montlleó. La estimación de caudal asociado a los niveles de crecida se ha obtenido mediante el modelo hidráulico HEC-RAS, habiéndose realizado un levantamiento topográfico con GPS RTK (Trimble 4700). En el análisis de la frecuencia se combinaron los datos instrumentales y

datos de paleocrecidas utilizando el programa AFINS 2.0. Los datos presentaron su mejor ajuste a una distribución de valores extremos de dos componentes (TCEV).

ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio comprende la rambla de la Viuda (RDV), un río efímero mediterráneo que confluye con el río Millars en Vila-real (provincia de Castelló). Su cuenca presenta una superficie de $\sim 1.500 \text{ km}^2$ y se forma de la confluencia del río Montlleó y la rambla Carbonera y en su tramo más bajo recibe el caudal del río Lluçena-Alcora (figura 2). La geología de la cuenca en su sector norte se enmarca en el Sistema Ibérico, con relieves de caliza y margas del Cretácico y Jurásico de dirección NE-SW, en su parte central está compuesto por gravas y arenas que rellenan las depresiones de tipo *graben* generadas durante una fase distensiva del Neógeno y Cuaternario (Simón et al., 2013), y en la plana costera comprende depósitos de gravas cuaternarias con morfología de abanicos aluviales procedentes de los relieves existentes cerca de la costa de Castelló (Segura-Beltran & Pardo-Pascual, 2019).

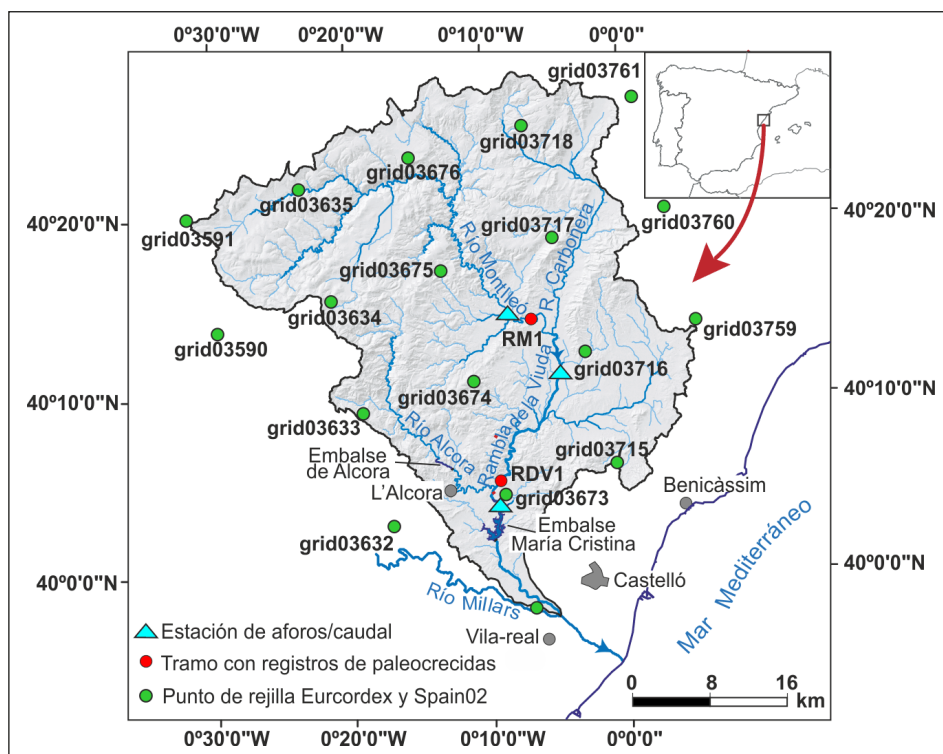


Figura 2. Localización de la rambla de la Viuda y posicionamiento sobre la cuenca de drenaje la rejilla del Spain02 con separación de $0,11^\circ$.

En los relieves altos (1.250-1.720 m) se presenta un clima mesomediterráneo con vegetación de pino y encinas y en el resto de la cuenca es de tipo termomediterráneo con vegetación arbustiva mediterránea. La precipitación varía de norte a sur desde valores de ~750 mm/a en el sector del Sistema Ibérico a valores de ~400 mm/a en el sector bajo de la cuenca (Mateu, 1974). La mayor parte de las lluvias ocurre en otoño (septiembre a noviembre), con un segundo máximo al final del invierno y primavera (marzo a mayo).

La figura 2 muestra los tramos con registro de paleocrecidas en la rambla de la Viuda (RVD1; Machado et al., 2017) y en el río Montlleó (RM1; Benito et al., 2020), así como la localización de las estaciones de aforo y los embalses existentes en la cuenca.

RESULTADOS

Registros de inundaciones en clima actual (datos observados en aforos)

La información de caudal procede de dos estaciones de aforo de la red SAIH, Vall d'Alba (en operación desde 2007) y Montlleó (desde 1971) y dos estaciones de registro en los embalses de Maria Cristina y Alcora (desde 1959), donde el caudal se estima a partir del balance de flujo de entrada y salida (figura 2). El régimen de caudal se encuentra fuertemente condicionado por el patrón de lluvias, la elevada permeabilidad del sustrato debido al dominio de calizas carstificadas y la elevada pérdida de transmisión del flujo hacia el acuífero aluvial en las depresiones (Beneyto et al., 2020). El flujo superficial ocurre con una media de 31 días/año, en relación con eventos que típicamente duran 2-3 días, y su generación requiere de episodios de lluvia acumulada superior a 70 mm (Camarasa & Segura, 2001). Las lluvias más intensas (i. e., hasta 300 mm en 24 horas) se producen principalmente en otoño y están asociadas a células convectivas de mesoescala (Llasat & Puigcerver, 1990). Estas lluvias pueden producir inundaciones con picos de 1.500 m³/s en el tramo inferior de la cuenca y contribuyen a un régimen hidrológico irregular, donde las crecidas generan hasta el 80 % del volumen de caudal anual (Segura & Camarasa, 1996). La presa de Maria Cristina, localizada en la parte baja de la cuenca, se construyó en 1925 y tiene una capacidad de 20 millones de m³ y un aliviadero con desagüe diseñado de hasta 600 m³/s. Desde su construcción (iniciada en 1910), se han producido vertidos por coronación debido a inundaciones extremas en los años 1920, 1922, 1962, 1969 y 2000. De las inundaciones de 1920 y 1922 las referencias corresponden a la prensa de la época y a los informes técnicos relacionados con los trabajos de construcción (Sociedad General de Riegos, 1925). La inundación del 15 de octubre de 1962, la mayor del registro de aforos, produjo un vertido por coronación en la presa de 0,7 m de calado y alcanzó un caudal pico de 1.500 m³/s según el gestor de la presa (Mateu, 2010). La inundación de 1969 registró un caudal medio diario de 238 m³/s, con un caudal pico de 585 m³/s calculado con parámetros regionales de la ecuación de Fuller (Machado et al., 2017). Para el evento del 24-26 de octubre del 2000 se ha reconstruido un hidrograma con pico estimado de 1.268 m³/s (Gabaldó et al., 2002), aunque las marcas de altura de nivel existentes en un pilar de la presa muestran una altura intermedia entre la inundación de 1962 y 1969 (probablemente ~945 m³/s; Machado et al., 2017). En el río Montlleó la

mayor inundación del periodo de aforos (1971-2021) se produjo en el año 2000, con un caudal medio diario de 129 m³/s, que transformado en caudal pico resulta en 600 m³/s (Beneyto et al., 2020).

En relación con la tendencia temporal en la hidrología, el análisis detallado del volumen de flujo de entrada en el embalse de Maria Cristina en los últimos 65 años muestra una reducción en el número medio de días anuales con flujo medio desde >100 días (1959-1978) a 25 días (1991-2021; Calle, 2018). Este cambio en el número de días con flujo, no relacionado con las inundaciones, sugiere una reducción de la escorrentía principalmente ocasionada por el aumento de la cubierta vegetal en las laderas. Sin embargo, el análisis de los picos de caudal registrados en las estaciones de aforo (1959-2021) no muestra una tendencia temporal definida o cambios significativos en su frecuencia, aunque existen ciclos multidecadales propios de la variabilidad natural del clima. El análisis de frecuencia de inundaciones obtenidas de los registros de aforos ajustadas a las distribuciones TCEV y GDP se describe en el apartado “Proyección en los caudales máximos (modelo hidrológico)” junto con los resultados de la incorporación de datos del pasado (paleocrecidas).

Proyecciones futuras según modelos de cambio climático

Proyección en la precipitación máxima

En este apartado se describen los resultados obtenidos de la aplicación de una selección de modelos de cambio climático de la base de datos Eurocordex para el escenario RCP8.5. La retícula del modelo regional en el dominio de la cuenca de la rambla de la Viuda comprende dieciocho estaciones de la rejilla de datos Spain02 (0,11°), doce dentro de la cuenca y seis en el exterior. Un primer análisis ha consistido en determinar la capacidad de los distintos modelos regionales para reproducir adecuadamente la precipitación máxima para el periodo de control 1971-2000 (valor observado *vs.* simulado por el modelo; figura 3a). Dado que las muestras son de treinta años, la comparativa se centró en los cuantiles entre 10 y 100 años.

Seguidamente se analizó el grado de correlación entre cada estación de la rejilla mediante matrices de correlación y de covarianza, excluyendo los datos de precipitación inferiores a 1 mm (tabla 2). De esta forma, los valores de correlación entre puntos próximos de la retícula son altos y disminuyen ligeramente a medida que aumenta la distancia en la retícula. La función de probabilidad de lluvia en puntos representativos de la rejilla muestra que el parecido entre la muestra observada y simulada es elevado hasta el cuantil de 20 años, pero existe una alta desviación para cuantiles mayores (figura 3a). Esto indica la falta de datos o de longitud temporal de las series requerida para caracterizar cuantiles de interés en el análisis de extremos (e. g., 100 años). Las series de datos de precipitación se ampliaron a 1.000 años mediante el generador de clima (MulGETS), y se obtuvieron las posiciones de dibujo o función de distribución empírica para cuantiles de hasta 2.000 años de periodo de retorno (figura 3b).

Tabla 2. Estadísticos de la precipitación observada y simulada en diferentes puntos de la rejilla para el periodo 1971-2000.

Rejilla	Precipitación observada				Precipitación simulada			
	% días secos	% días húmedos	Media	Varianza	% días secos	% días húmedos	Media	Varianza
3673	84,9	15,1	9,8	182,5	85,7	14,3	10,4	180,4
3674	83,0	17,00	9,4	178,1	84,1	15,9	10,1	173,8
3676	79,5	20,5	8,3	124,4	81,5	18,5	9,0	111,3
3717	81,4	18,6	9,8	195,1	82,6	17,4	10,6	177,4

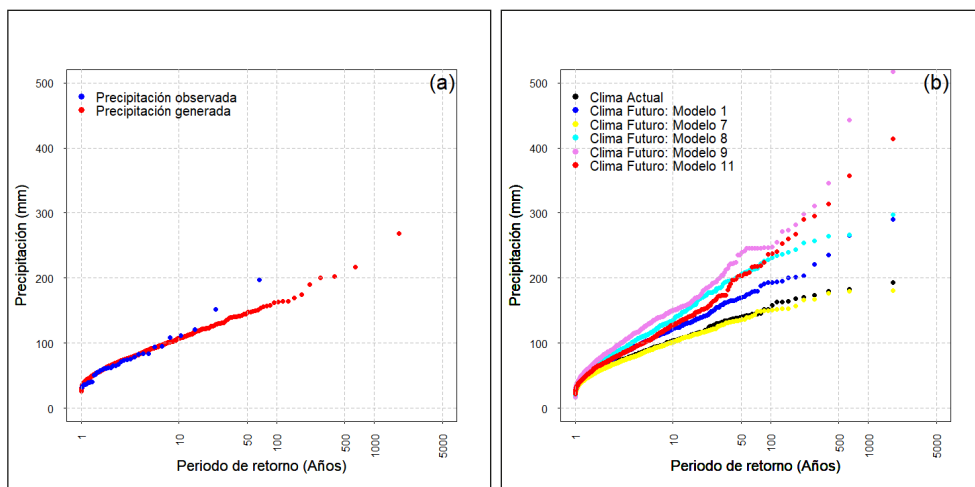


Figura 3. Resultados de las simulaciones con la precipitación máxima diaria en la rejilla 3717. a) Posiciones de dibujo (o función de distribución empírica) de la lluvia diaria máxima anual para el periodo 1971-2000 generada por los modelos de clima (histórico simulado) y por las precipitaciones observadas obtenidas de la base de datos Spain02 v5 (climatología de referencia); b) posiciones de dibujo para la rambla de la Viuda con las series de precipitación generadas de mil años a partir de los datos de los modelos climáticos.

En los modelos de clima futuro se sigue una metodología similar a la aplicada al clima actual, determinando el porcentaje de días secos y húmedos (no lluvia vs. lluvia) para cada uno de los puntos de la rejilla (*grids*) con los datos observados y de los modelos de clima futuro. De este análisis, se constata un aumento del porcentaje de días secos (consecuentemente, disminución de los días húmedos) y un aumento mínimo de la media de la precipitación respecto al clima actual. Seguidamente se obtuvieron las posiciones de dibujo de las series de precipitación modelada (clima histórico y futuro) y de las series

extendidas mediante el generador de clima (figura 3b). El modelo que genera las precipitaciones más altas es el 9, mientras que el modelo 7 produce las precipitaciones más bajas, que son más próximas al clima actual (figura 3b). La dispersión de la lluvia máxima diaria para un tiempo de recurrencia (Tr) de cien años obtenida con los modelos varía aproximadamente entre 150-250 mm. En los registros observados, estos valores se han producido en eventos de lluvias máximas, y es destacable el episodio de 1962, con 271 mm en 36 horas (Segura, 2006).

Proyección en los caudales máximos (modelo hidrológico)

El modelo hidrológico TETIS se calibró usando factores correctores mediante un algoritmo de optimización con retoque experto manual y se validó para el periodo observado. La función objetivo utilizada ha sido el Índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (en adelante NSE), aunque en las correcciones manuales se ha dado mayor peso a la comparación visual entre los hidrogramas observado y simulado. Las series sintéticas de precipitación de mil años tanto en clima actual como para los escenarios de clima futuro se implementaron en el modelo hidrológico para obtener series de caudales máximos medios diarios. A partir de los caudales diarios se calcularon los instantáneos en los puntos de interés (tabla 3).

Tabla 3. Caudales máximos medios diarios (m^3/s) simulados basados en lluvias máximas de los modelos de clima para el clima actual (1971-2000) y clima futuro (2041-2070; modelos 1, 7, 8 y 11). El caudal instantáneo máximo se ha obtenido a partir de los medios diarios sobre la base de relaciones empíricas.

	Caudal medio diario (m^3/s)			Caudal instantáneo máximo (m^3/s)		
	Embalse de María Cristina	Punto con paleoocrecidas RDV1	Punto con paleoocrecidas río Montlleó	Embalse de María Cristina	Punto con paleoocrecidas RDV1	Punto con paleoocrecidas río Montlleó
Clima actual	197	158	68	490	396	234
Modelo 1	287	217	90	703	583	299
Modelo 7	128	88	46	324	226	165
Modelo 8	562	407	214	1.343	984	643
Modelo 9	1.821	1.673	953	4.159	3.834	2.409
Modelo 11	590	592	595	1.407	1.411	1.589

Las series de caudales máximos anuales instantáneos se ajustaron a diversas funciones y se encontraron los mejores ajustes para las distribuciones TCEV y GDP. El porcentaje de cambio de los caudales instantáneos para la inundación de Tr 100 años muestra una reducción en el futuro de entre el -35 % y -50 % en los modelos 1 y 7, y un aumento de entre el 10 y el 25 % en los modelos 8 y 11, y del 63 % en el modelo 9. Los caudales instantáneos de los cuantiles ajustados a los datos de clima actual (obtenido del modelo de clima) resultan inferiores a los obtenidos de las series anuales de aforos. De esta forma,

el caudal de Tr 10.000 años (969 m³/s) es inferior a los >1.300 m³/s que se registraron en el embalse de Maria Cristina en los años 1922, 1962, 1969 y 2000.

Tabla 4. Cuantiles de caudal instantáneo (m³/s) calculados con una distribución TCEV para el clima actual y proyecciones de clima en el punto de paleorecidas en rambla de la Viuda (RVD1).

Punto de paleorecidas de Rambla de la Viuda (caudal en m ³ /s)						
T años	Clima actual	Proyecciones climáticas				
		M1	M7	M8	M9	M11
5	94	61	45	66	99	59
10	135	89	65	133	193	118
25	196	123	89	223	315	238
50	245	148	107	290	406	329
100	292	173	125	356	496	418
500	401	230	166	507	701	622
1.000	446	245	183	570	787	706
5.000	549	308	221	715	981	903
10.000	592	326	238	768	1,056	969

Tabla 5. Cuantiles de caudal instantáneo (m³/s) calculados con una distribución TCEV para el clima actual y proyecciones de clima en el punto de paleorecidas en el río Montlleó (ML1).

Punto de paleorecidas de Montlleó (caudal en m ³ /s)						
T años	Clima actual	Proyecciones climáticas				
		M1	M7	M8	M9	M11
5	82	51	37	58	87	51
10	109	71	52	102	145	100
25	138	97	71	159	219	228
50	157	116	84	201	273	325
100	173	134	98	243	328	420
500	201	177	129	339	452	639
1.000	211	194	142	378	503	730
5.000	226	234	172	469	622	940
10.000	233	252	185	505	668	1,010

Reconstrucción de caudal y frecuencia de inundaciones del pasado

Registros estratigráficos y caudales estimados

Los estudios de paleocrecidas se localizan en dos puntos de la cuenca, en concreto en el río Montlleó (superficie de la cuenca de 657 km²) cerca de la confluencia con la rambla Carbonera y en la rambla de la Viuda (superficie de la cuenca de 1.240 km²) justo antes de la confluencia con el río Lluca (figura 2).

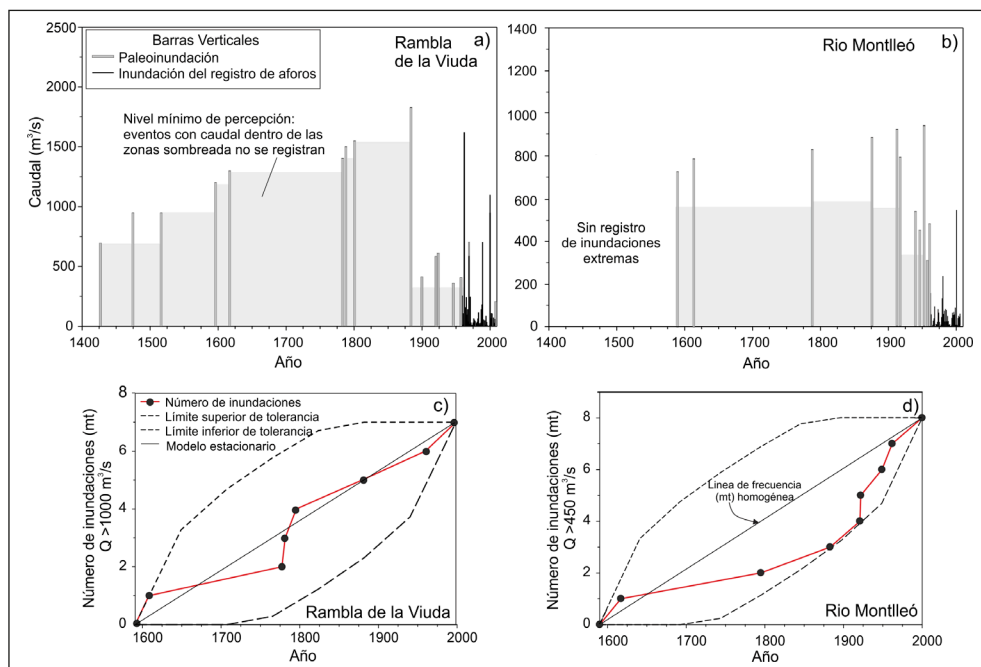


Figura 4. a) Registro de caudales de paleocrecidas y datos de aforos en la rambla de la Viuda (RDV1), aguas arriba del embalse de Maria Cristina; b) Ídem en el río Montlleó (RM1); c) Test de estacionariedad para caudales superiores a 1.000 m³/s en RDV1; d) Test de estacionariedad para caudales superiores a 450 m³/s en RM1.

En la rambla de la Viuda, el registro de paleocrecidas abarca los últimos seiscientos años (Machado et al., 2017; figura 4a). La frecuencia media de las crecidas extremas (>1.000 m³/s) es de 1 cada 40 años durante los periodos 1420-1620 y 1883-2020. La disminución en la frecuencia de grandes inundaciones durante 1620-1775 coincide con el Mínimo de Maunder Tardío (1675-1715 CE), relacionado con una reducción de la actividad solar con condiciones más frías y secas en el este de España. Se registró un corto periodo de mayor frecuencia de grandes inundaciones entre 1775 y 1810 (al menos tres grandes

inundaciones), correspondiente a condiciones más húmedas y cálidas de duración decenal coincidente climáticamente con la Anomalía de Maldà. Las condiciones climáticas de la Anomalía Maldà constituyen un análogo de las esperables en las proyecciones de cambio climático futuro. La mayor inundación registrada corresponde a este periodo, en concreto a 1883, con un caudal estimado de 1.830 m³/s. La crecida de 1787 produjo la rotura en la antigua presa de l'Alcora y excedió los 1.500 m³/s, una magnitud similar a la de las ocurridas en 1783 y 1801. Durante el siglo xx al menos tres crecidas excedieron los 1.000 m³/s, y destacan las ocurridas en 1920 (~1.000 m³/s), 1962 (~1.500 m³/s) y 2000 (~1.268 m³/s).

En el río Montlleó, el registro de paleocrecidas comprende los últimos cuatrocientos años (Benito et al., 2020; figura 4b). En total, se registran 31 paleoinundaciones en un rango de caudales de 20-950 m³/s y al menos cinco inundaciones excedieron un caudal de 740-950 m³/s. Esta información contrasta con los datos de la estación de aforos del río Montlleó, localizada 3 km aguas arriba del tramo con datos de paleocrecidas, y que dispone de aforos desde 1971, con un caudal máximo registrado de 129 m³/s. Los episodios con mayor frecuencia de inundaciones ocurrieron en (1) 1570-1620, (2) 1775-1795, (3) 1850-1890 y (4) 1920-1969. Estos periodos de mayor frecuencia coinciden con los registrados en la rambla de la Viuda, y se evidencia igualmente la escasa frecuencia de eventos entre 1620 y 1775 CE. Los periodos de frecuentes inundaciones 1 y 3 correspondieron a oscilaciones climáticas más frías de lo habitual (entre 0,3 y 0,2 °C), mientras que los periodos 2 y 4 se caracterizaron por una mayor variabilidad climática interanual (inundaciones y sequías). Esta elevada variabilidad interanual de las precipitaciones ha aumentado en los últimos 150 años, lo que ha dado lugar a una reducción del caudal máximo anual.

Análisis de frecuencias de inundaciones

Los cambios en vegetación, usos de suelo y clima han podido afectar a los caudales durante los eventos moderados, aunque resulta evidente que para la generación de inundaciones extremas se requieren condiciones de saturación del suelo. El análisis de frecuencia de inundaciones asume que la serie mantiene sus propiedades estadísticas en el tiempo y, por lo tanto, la existencia de periodos con aumento de la frecuencia de eventos pone en duda dicho comportamiento estacionario. La estacionariedad de las muestras con caudales de paleocrecidas (datos censurados) se ha confirmado mediante el test de Lang, que presupone que las series de inundación pueden ser descritas como un proceso de Poisson homogéneo (Lang et al., 1999). En este test se calcula el intervalo de tolerancia del 95 % del número acumulado de inundaciones por encima del umbral o nivel censurado. La estacionariedad de las series se confirma cuando los puntos de la muestra se localizan dentro de los intervalos de tolerancia del 5 y del 95 % (Naulet et al., 2005).

La serie temporal de datos de inundaciones de la rambla de la Viuda ha mostrado condiciones estacionarias para las inundaciones >1.000 m³/s para el periodo 1617-2014 (figura 4c). Igualmente, la serie de paleocrecidas+datos de aforo del río Montlleó ha presentado un comportamiento estacionario para caudales >450 m³/s para el periodo CE 1590-2000 (figura 4d). Este análisis confirma el comportamiento estacionario de la muestra en el tiempo, i. e., que las inundaciones se generaron de forma aleatoria

a partir de una distribución de probabilidad simple con momentos estables, y que se puede analizar mediante modelos estadísticos paramétricos (Lang et al., 1999).

El análisis de frecuencia usando conjuntamente datos de paleocrecidas y aforos (paleocrecidas+aforos) muestra valores más altos de magnitud en los cuantiles de inundación que los obtenidos solo con el registro de aforos (tabla 6). En el caso de la RDV1, por ejemplo, la inundación de probabilidad anual del 1 % (Tr 100 años) basada en conjunto de datos de paleocrecidas e instrumental es 1.570 m³/s, mientras que usando únicamente datos del registro sistemático es de 1.300 m³/s. La inundación de probabilidad anual de 0,1 (Tr 1.000 años) utilizada convencionalmente para el diseño hidráulico de vertederos de presas es de 2.615 m³/s, muy superior al diseño del vertedero de la presa actual (600 m³/s). Estos datos muestran un infradiseño en el vertedero de la presa de Maria Cristina.

En el caso del río Montlleó, los cuantiles obtenidos con paleocrecidas+aforos muestran igualmente valores de caudales superiores a los calculados con datos de aforos, con una diferencia del 40 y 60 % en los cuantiles de baja probabilidad (Tr > 50 años; tabla 6). Para el caso de la inundación de probabilidad anual del 1 %, basada en el conjunto de datos de paleocrecidas e instrumental, el caudal obtenido es de 870 m³/s, mientras que usando el registro sistemático es de 570 m³/s.

Tabla 6. Cuantiles de caudal instantáneo (m³/s) obtenidos de ajustar una distribución TCEV a series de caudal de (1) aforos+paleocrecidas y (2) aforos solo. Se ha calculado el porcentaje de cambio de aumento de caudal resultante de incluir datos de paleocrecidas sobre las series sistemáticas de aforo. Los cálculos se han obtenido en los puntos de paleocrecidas en la rambla de la Viuda y en el río Montlleó.

Probabilidad de excedencia anual, %	Periodo de retorno Tr, años	Río Montlleó			Rambla de la Viuda		
		Aforos+ paleocrecidas, m ³ /s	Aforos m ³ /s	Cambio %	Aforos+ paleocrecidas, m ³ /s	Aforos m ³ /s	Cambio %
20	5	95	75	27	155	110	41
10	10	230	120	92	480	305	57
4	25	490	260	88	920	710	30
2	50	680	415	64	1.250	1.000	25
1	100	870	570	53	1.570	1.300	21
0,2	500	1.300	920	41	2.305	1.975	17
0,1	1.000	1.480	1.060	40	2.615	2.250	16

Estas diferencias en los cuantiles muestran cómo los datos de paleocrecidas incorporan valores de caudales máximos con una componente temporal que supera la variabilidad meteorológica generada en unas pocas décadas. Es decir, se amplía el registro de la secuencia secular y las fluctuaciones cíclicas no captadas en periodos cortos de aforos. En el caso de RVD1, supone incrementar un 15-20 % el

caudal, pero en RM1 la diferencia es del 40-50 %. Estos resultados parecen reflejar la mayor sensibilidad de las cuencas pequeñas a los cambios en la magnitud y la frecuencia de las inundaciones debido a la variabilidad climática de los ciclos seculares, mientras que una cuenca más grande amortigua la respuesta debido a la limitada extensión de las tormentas convectivas. En suma, el registro secular de inundaciones proporciona un conocimiento sólido sobre las inundaciones peligrosas que puede ayudar a priorizar las acciones de la gestión para la adaptación al cambio climático.

DISCUSIÓN

Incertidumbres en los actuales modelos de cambio climático

En este estudio se ha aplicado la generación de modelos de clima futuro (CMIP5, ver IPCC, 2013), y de modelos hidrológicos distribuidos en su transformación a caudales con objeto de determinar el impacto del cambio climático en la peligrosidad de inundaciones. En concreto, se han aplicado diversos modelos de clima regionales (MCR) anidados sobre modelos de la circulación general atmosféricos y oceánicos (CGM) incluidos en la iniciativa Eurocordex (Jacob et al., 2014). A su vez, los datos observados Spain02 para el periodo de control (1971-2000) provienen de la interpolación de 2.500 estaciones de AEMET que permiten disponer de puntos con información meteorológica (clima de referencia) con una resolución espacial similar a Eurocordex (~10 km). Mediante estos datos observados se puede abordar la corrección de los sesgos sistemáticos de estos modelos (e. g., método delta) para su aplicación a estudios de impacto en diversos sectores (Casanueva et al., 2016; Gutiérrez et al., 2019). En el caso de extremos, se ha seleccionado un escenario de emisiones RCP8.5 que corresponde al límite superior de los procesos de calentamiento global (*worst case*; IPCC, 2013). El conjunto de modelos (global y regional) y el escenario de emisiones caracterizan la incertidumbre que afecta a la resolución de las proyecciones de futuro de las variables climáticas. Fernández et al. (2019) analizan la incertidumbre procedente de la aplicación de diferentes proyectos de comparación de modelos globales y regionales (MIP) y del conjunto de fuentes que estos utilizan (multi-MIP *ensembles*): GCM, escenario futuro, variabilidad interna, RCM y resolución espacial. Los resultados muestran que los modelos globales GCM sobre los que se anidan los modelos regionales (RCM) son el principal generador de la incertidumbre en el análisis de cambio climático. En definitiva, la perspectiva de un esfuerzo computacional adicional y el desarrollo de los RCM con aumento de la resolución no conduciría a mejoras sustanciales de las proyecciones climáticas (Fernández et al., 2019).

Otro aspecto importante que se debe considerar es la propia capacidad de los modelos de clima para la caracterización de extremos y, en particular, de la precipitación máxima diaria. En general, los modelos climáticos han mostrado una alta capacidad y robustez en las proyecciones de variables climáticas medias como la temperatura y, en menor medida, de la precipitación total. Por ejemplo, los resultados de los estadísticos de la precipitación observada (clima de referencia) y simulada (clima histórico) para el periodo 1971-2000 en diferentes puntos de la rejilla muestran una elevada similitud (tabla 2). Sin embargo, las lluvias máximas diarias de las observaciones (1971-2000) y las generadas por los modelos de clima (clima histórico) muestran fuertes discrepancias a partir del cuantil de periodo

de retorno de veinte años (figura 3a). Por lo tanto, se evidencia que los modelos de cambio climático presentan carencias en la caracterización de extremos de precipitación, particularmente en zonas como la mediterránea, donde las lluvias intensas dependen de eventos meteorológicos locales y a mesoescala. Esta cascada de incertidumbres afecta a los resultados de cada modelo e incrementa la diversidad de los resultados entre modelos. En este punto, se plantea la duda sobre la selección de los resultados ofrecidos por los modelos, es decir, si optar por los rangos de mayor/menor precipitación, o la media ofrecida por un grupo de modelos que reflejen condiciones adversas de lluvia extrema. En nuestro caso, y para un periodo de retorno de cien años, el modelo 7 produce lluvias máximas diarias similares al clima actual obtenido del modelo de clima (~150 mm/día), mientras que en el resto de los modelos se obtiene valores superiores (~250 mm/día en el modelo 9). En el estudio de extremos, y particularmente en hidrología, resulta paradójico el cálculo de estadísticos de lluvia y escorrentía (e. g., Tr 100 años) a partir de series de treinta años en el periodo de control (1971-2000) y de clima futuro (2041-2070). Esta incertidumbre se trata de paliar mediante la aplicación de generadores meteorológicos, tales como el modelo MulGETS (Chen et al., 2014). Diversos autores han indicado que estos generadores estocásticos no son capaces de reproducir de forma adecuada los eventos extremos (Verdin et al., 2015). Esta problemática se ha abordado recientemente mediante la integración de datos regionales y de paleocrecidas, lo que ha permitido caracterizar la cola superior de la función de distribución de la lluvia y los caudales extremos (Beneyto et al., 2020). Sin embargo, estas mejoras en los generadores meteorológicos aplicadas a clima futuro serían complejas de comprobar teniendo en cuenta la supuesta no estacionariedad de las series temporales de los extremos de lluvia.

En el modelo hidrológico distribuido, los parámetros físicos (cubierta vegetal y usos del suelo, humedad, etc.) en condiciones de clima actual se han calibrado y validado para la generación de hidrogramas. Los detalles sobre el proceso de calibración y validación se pueden encontrar en Francés et al. (2007). En el caso de las proyecciones de futuro, resulta complejo determinar los posibles cambios en la vegetación y los usos del suelo, cuyo efecto en la hidrología puede ser mayor que los producidos por el cambio climático (Rodríguez-Lloveras et al., 2016). En ocasiones, estos cambios en el uso de suelo y la cubierta vegetal dependen de factores socioeconómicos que, en el ámbito europeo, se encuentran fuertemente influidos por la política agraria común (Boellstorff & Benito, 2005; Rodríguez-Lloveras et al., 2015).

En resumen, la aplicación de modelos de clima en la estimación de caudales máximos de inundación presenta una elevada incertidumbre que dificulta la operatividad de los resultados. No obstante, la aplicación de los modelos de clima al estudio de las inundaciones informa de los posibles cambios cualitativos en la magnitud y frecuencia, aunque desde el punto de vista de la gestión del riesgo resulta complicado representar la incertidumbre a escala local (e. g., mapas de peligrosidad) y su comunicación a los gestores y a la población en general.

Incertidumbres y certezas de los registros de paleocrecidas

El estudio de las paleocrecidas comporta una serie de supuestos requeridos para la estimación del caudal de la inundación, aunque igualmente conlleva la certeza de la evidencia física del calado alcanzado por las inundaciones pasadas. En la reconstrucción de caudales de paleocrecidas se asume que la

geometría del cauce fluvial no ha variado en el tiempo o que los cambios del lecho han sido mínimos. En la práctica, la mayor parte de los estudios de paleocrecidas se desarrollan en tramos con cauce en roca (cañones rocosos) o en cauces semialuviales (Benito et al., 2020). En los ríos de lecho rocoso la geometría del cauce fluvial puede permanecer estable o con pocos cambios en la escala temporal de cientos o pocos miles de años (Whipple et al., 2000). En el caso de cauces semialuviales (fondo aluvial y laterales en roca), pueden producirse procesos de incisión o sedimentación que conviene identificar para la restitución de la geometría del cauce en las tareas del cálculo del caudal (e. g., Machado et al., 2017). En estos casos, se incluye dicha incertidumbre como un rango de caudal asociado a las paleoinundaciones.

Los registros más largos de paleoinundaciones (seculares y milenarios) se obtienen de secuencias estratigráficas de depósitos finos acumulados en zonas de remanso (*slackwater flood deposits*; SWD). Sin embargo, la formación de remansos y la acumulación de SWD requieren geometrías adecuadas (Benito et al., 2003), abundante arena en suspensión y condiciones hidráulicas que permitan su preservación en el tiempo (House et al., 2002). En definitiva, los estudios de paleocrecidas conllevan una exploración detallada del terreno y, en algunos ríos, pueden darse resultados negativos, por lo que es un método que depende de las condiciones locales.

En el cálculo de caudal a partir de SWD se asume que la altura de los depósitos se relaciona de manera aproximada con el máximo calado alcanzado por dicha inundación. Esta premisa es difícil de verificar, aunque varios trabajos (Jarrett & England, 2002) concluyen que la altura del depósito se aproxima al nivel máximo de la inundación, particularmente en depósitos emplazados en los márgenes del cauce. En la estimación de caudales de las paleocrecidas se aplican modelos hidráulicos que permiten relacionar la altura del sedimento con un caudal de inundación (Benito et al., 2020). La mayoría de los estudios de paleocrecidas asumen un modelo de flujo unidimensional para realizar los cálculos de caudal (Machado et al., 2017; Benito et al., 2020), aunque es cada vez más frecuente el uso de modelos hidráulicos bidimensionales en tramos de geometría compleja (Bohorquez et al., 2013).

Los depósitos de las paleocrecidas se acumulan cuando el nivel de la inundación supera la altura de las orillas, por lo que desde el punto de vista hidrológico se trata de datos censurados por encima de un umbral de altura (caudal). Por lo tanto, se necesita conocer el umbral de percepción (i. e., caudal mínimo requerido para desbordar), la duración (periodo de tiempo) para la cual el umbral es válido y la edad absoluta o relativa de la inundación (figura 4a, 4b). El factor crítico es conocer el número de inundaciones que han excedido el umbral, ya que la probabilidad asignada al evento depende de la frecuencia de excedencia durante un tiempo dado.

Otro tema estadístico que puede acarrear incertidumbre en el análisis de frecuencia de inundaciones está relacionado con la estacionariedad estadística de los datos, i. e., se asume que cada muestra contiene datos independientes e idénticamente distribuidos. En los últimos años, la “no estacionariedad” se ha convertido en una cuestión importante, reconociendo la posibilidad de que las poblaciones futuras de eventos, como las inundaciones, difieran notablemente de las poblaciones pasadas (Milly et al., 2008). En el supuesto de que los procesos que generen las inundaciones en el futuro fueran sustancialmente diferentes, las series de los registros de las inundaciones pasadas no serían relevantes. La

detección de la no estacionariedad se ha establecido en cuencas que han experimentado un cambio de suelo rural a urbano sobre un área extensa, y se ha observado que se puede duplicar la magnitud de los picos de inundación anual (Villarini et al., 2009). Sin embargo, la no estacionariedad atribuida al cambio climático resulta difícil de detectar (Matalas, 2012). Las series temporales de extremos pueden presentar cierto movimiento irregular (decadal, intradecadal o secular) que forma parte de la propia estructura de la serie temporal (Kendall, 1976). De hecho, en los registros de paleoocrecidas estudiados se identifican periodos con mayor ocurrencia de inundaciones durante momentos climáticos relativamente más húmedos y, sin embargo, el comportamiento de las inundaciones extremas a largo plazo muestra un proceso estacionario y homogéneo de acuerdo con el test de estacionariedad de Lang (figura 4c, 4d). Por lo tanto, las variaciones decadales en las series de aforos y los ciclos mutidecadales y seculares pueden formar parte del propio comportamiento temporal de la muestra. Más importante aún, los procesos que generan lluvias intensas en el clima mediterráneo (sistemas convectivos de mesoescala) seguirán manteniéndose en cualquiera de los escenarios de cambio climático. En resumen, se requiere un análisis cuantitativo para discernir si los cambios forman parte de la composición temporal de la serie o si se trata de comportamiento no estacionario en alguno de los momentos estadísticos (o en todos).

El camino de la adaptación a los extremos futuros

Los caudales de las inundaciones asociadas a las proyecciones del cambio climático contienen una gran incertidumbre que se deriva de la variabilidad de los resultados de las precipitaciones extremas proyectadas por los diferentes modelos de cambio climático. Además, se presentan incertidumbres adicionales relacionadas con la modelización hidrológica (uso y condiciones del suelo) y con la imposibilidad de calibrar estos modelos de futuro. Debido a estas incertidumbres, los impactos del cambio climático no pueden cuantificarse con la precisión que se requiere dentro de la Directiva Europa de Inundaciones (2007/60/EC). Por otro lado, la primera Ley Europea del Clima pretende el desarrollo e implementación de estrategias de adaptación que fortalezcan la resiliencia y reduzcan la vulnerabilidad a los efectos del cambio climático (EC, 2021a). Se insta, por lo tanto, a la producción de una cartografía de peligrosidad de inundaciones que considere los efectos del cambio climático con la dificultad que conlleva representar las incertidumbres de los modelos de cambio climático. Entre las formas propuestas para abordar este mandato legislativo destaca la aplicación de una gestión adaptativa, permitiendo implementar soluciones que se acomoden a las condiciones cambiantes basadas en un proceso iterativo de escrutinio continuo, con revisión de la estrategia de adaptación a medida que se produce nueva información (Döll et al., 2015).

Resulta evidente que el camino de la adaptación al cambio climático demanda un nuevo enfoque basado en el desarrollo de nuevas herramientas y conocimientos que aborden el análisis y la predicción de las futuras posibles tendencias de la peligrosidad a escala local. Hasta el momento, las actuaciones en los países europeos se han centrado demasiado en las respuestas generales (*top-down*) derivadas de los modelos climáticos cuyas incertidumbres son difíciles de trasladar a escala prácticas

operativas y de comprensión local. Combinando los resultados de los diversos análisis (tabla 7), se observa que los modelos de cambio climático generan un amplio rango de caudales que, para el Tr 100 años ($Q = 225\text{-}730 \text{ m}^3/\text{s}$), apenas alcanzan el 50 % del caudal observado en inundaciones extremas ocurridas en 1920, 1962 y 2000, y que desbordaron la presa de Maria Cristina. Otras alternativas como los métodos basados en información regional tipo Caumax (CEDEX, 2011) calculan para este periodo de retorno caudales ($Q = 2.547 \text{ m}^3/\text{s}$) que superan los registrados durante los últimos quinientos años. El análisis de frecuencias con datos observados para el periodo 1962-2018 calcula para Tr 100 años caudales ($Q = 1.300 \text{ m}^3/\text{s}$) que se aproximan a los valores estimados para la inundación del año 2000 ($\sim 1.268 \text{ m}^3/\text{s}$), pero inferior al evento del año 1962 ($\sim 1.500 \text{ m}^3/\text{s}$). Por su parte, el análisis de frecuencias con datos de paleocrecidas y aforos, que recoge quinientos años de registro en condiciones de variabilidad climática secular, calcula para Tr 100 un caudal de $1.570 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabla 7. Cuantiles de caudal instantáneo (m^3/s) obtenidos de ajustar una distribución TCEV a diferentes series de datos y modelos de clima en el embalse de Maria Cristina.

*Caumax: Caudal Máximo (CEDEX, 2011). **PMF: Inundación Máxima Probable.

	Rambla de la Viuda (Embalse de Maria Cristina). Caudales en m^3/s						
Periodo de retorno, años	10	50	100	500	1.000	5.000	10.000
Aforos	305	1.000	1.300	1.975	2.250	2.895	3.100
Aforos + paleocrecidas	480	1.250	1.570	2.035	2.615	3.310	3.560
M. Hidrometeorológico	180	365	445	640	720	900	965
Caumax*	522	-	2.547	5.837	-	-	-
Clima futuro M8 (mín.)	85	175	225	380	465	725	870
Clima futuro M1 (med.)	116	235	300	495	600	905	1.075
Clima futuro M9 (max.)	210	520	730	1.510	2.030	3.985	5.300
PMF**	10.700						

Estos resultados muestran que, en el caso de las inundaciones fluviales y pluviales, es necesario adoptar enfoques locales o *bottom-up* que mejoren nuestro entendimiento del impacto del clima en las inundaciones. La ciencia de las inundaciones es capaz de producir información sobre lo que es posible en términos de magnitud y frecuencia de las inundaciones a escala local, proporcionando orientación para la adaptación al cambio climático. Esta aproximación local basada en el conocimiento de los extremos combinando modelos y datos pasados permite adoptar soluciones beneficiosas que, independiente del futuro incierto de los impactos del clima, proporcionan una dirección robusta y clara de las acciones que se deben desarrollar a nivel urbanístico y de planificación. Este futuro seguirá siendo incierto pero sustentado en el hecho irrefutable de que lo que ha ocurrido en el pasado puede ocurrir de nuevo. En este camino, los datos de inundaciones extremas pasadas pueden utilizarse en combinación

con generadores meteorológicos, modelos de físicos de la atmósfera y modelos hidrológicos para guiarnos en el análisis de los riesgos a escala local.

CONCLUSIONES

Actualmente existe una gran incertidumbre de los efectos del cambio climático en la frecuencia y magnitud de las inundaciones a escala regional y local. Este trabajo genera conocimiento y series de datos que permiten identificar incertidumbres y certezas en el camino de la adaptación al riesgo basado en tres tipos aproximaciones: *a*) modelos de cambio climático (Eurocordex), *b*) modelos hidrológicos distribuidos (TETIS) y *c*) datos de inundaciones del pasado que ocurrieron en momentos de calentamiento relativo (paleocrecidas y registros históricos). Las principales conclusiones son las siguientes:

- Los cuantiles de caudal instantáneos obtenidos con proyecciones climáticas muestran una elevada dispersión respecto a los obtenidos para el clima actual (periodo de control simulado; 1971-2000). El modelo 8 parece tener un comportamiento más estable, con un incremento en caudal de las proyecciones respecto al periodo de control de entre el +11 % (Tr 25 años) y +6-10 % (Tr 50 a 10.000 años).
- El generador meteorológico (MulGETS) presenta elevada capacidad para incorporar datos meteorológicos del pasado (Spain02) y del futuro (escenarios de cambio climático). La principal limitación del generador reside en la escasa variabilidad de los extremos obtenidos de las series cortas tanto de control (1971-2000) como de futuro (2041-2070).
- Los caudales para los cuantiles (Tr > 25 años) obtenidos para clima actual (simulado) son entre 2 y 3 veces inferiores a los obtenidos del análisis de registro de aforos (1959-2011). Esta disparidad en los resultados indica la importancia del análisis de series largas en la determinación de los cuantiles y la deficiencia de los modelos de clima en la caracterización de los caudales extremos en la zona de estudio.
- La incorporación de caudales pasados (paleocrecidas) en periodos cálidos muestra mayor consistencia en la estimación de los cuantiles de interés en la planificación de riesgos (Tr 100 años) y de infraestructuras sensibles (Tr 1.000 años), debido a que incorpora caudales máximos que no aparecen registrados en las estaciones de aforo.
- Los datos de extremos del paleocrecidas permiten valorar la coherencia de los datos de los modelos de clima e hidrológicos para los cuantiles elevados (Tr > 50 años), y la identificación de los modelos de clima o media de modelos con mejor comportamiento a escala local.
- La implementación de un modelo hidrológico distribuido permite la integración de la información de caudales máximos localizados en diversos puntos de la cuenca y paliar la falta de información histórica y de paleocrecidas en los puntos de interés.
- La necesidad de una nueva aproximación basada en el conocimiento local (*bottom-up*) se puede sustentar en aproximaciones multidisciplinares que generen certidumbres y certezas sobre los procesos climáticos extremos y sus magnitudes, y que sirvan de guía en el camino a la adaptación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por Fundación Biodiversidad (MITERD) a través del proyecto Adaptapresa, y por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España a través de los proyectos de investigación EPHIMED (CGL2017-86839-C3-1-R), TETISCHANGE (RTI2018-093717-B-100) y EPHIDREAMS (PID2020-116537RB-I00), cofinanciados de fondos europeos (FEDER). Agradecemos la revisión y los comentarios realizados por tres revisores anónimos y el trabajo realizado por los editores de la revista.

REFERENCIAS

- Beneyto, C., Aranda, J. Á., Benito, G., & Francés, F. (2020). New approach to estimate extreme flooding using continuous synthetic simulation supported by regional precipitation and non-systematic flood data. *Water*, 12(11). doi: 10.3390/w12113174
- Benito, G., Harden, T. M., & O'Connor, J. E. (2020). Quantitative Paleoflood Hydrology. En Wohl, E. (ed.). *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* (2.^a ed., vol. 9). Elsevier.
- Benito, G., Sánchez-Moya, Y., Medialdea, A., Barriendos, M., Calle, M., Rico, M., Sopena, A., & Machado, M. J. (2020). Extreme floods in small mediterranean catchments: long-term response to climate variability and change. *Water*, 12(4), 1008.
- Benito, G., Sánchez-Moya, Y., & Sopena, A. (2003). Sedimentology of high-stage flood deposits of the Tagus River, Central Spain. *Sedimentary Geology*, 157(1-2), 107-132. doi: 10.1016/s0037-0738(02)00196-3
- Boellstorff, D. & Benito, G. (2005). Impacts of set-aside policy on the risk of soil erosion in central Spain. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 107(2), 231-243. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2004.11.002>
- Bohorquez, P., García-García, F., Pérez-Valera, F., & Martínez-Sánchez, C. (2013). Unsteady two-dimensional paleohydraulic reconstruction of extreme floods over the last 4000 yr in Segura River, southeast Spain. *Journal of Hydrology*, 477, 229-239. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.11.031
- Botero, B. A. & Francés, F. (2006). *AFINS Version 2.0-Análisis de Frecuencia de Extremos con Información Sistemática y No Sistemática*. Valencia: Research Group on Hydraulic and Hydrology. Department of Hydraulic Engineering and Environment, Polytechnical University of Valencia.
- Calle, M. (2018). *Morphosedimentary dynamics of ephemeral rivers affected by gravel Mining: GIS mapping and geomorphic change detection*. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/55964/>
- Camarasa, A. M. & Segura, F. (2001). Flood events in Mediterranean ephemeral streams (ramblas) in Valencia region, Spain. *Catena*, 45(3), 229-249. doi: [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00146-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00146-1)
- Casanueva, A., Kotlarski, S., Herrera, S., Fernández, J., Gutiérrez, J. M., Boberg, F., Colette, A., Christensen, O. B., Goergen, K., Jacob, D., Keuler, K., Nikulin, G., Teichmann, C., & Vautard, R.

- (2016). Daily precipitation statistics in a EURO-CORDEX RCM ensemble: added value of raw and bias-corrected high-resolution simulations. *Climate Dynamics*, 47(3), 719-737. doi: 10.1007/s00382-015-2865-x
- CEDEX (2011). *Mapa de caudales máximos*. Memoria Técnica. Madrid: Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.
- Chen, J., Brissette, F. P., & Zhang, X. J. (2014). A Multi-Site Stochastic Weather Generator for Daily Precipitation and Temperature. *Transactions of the ASABE*, 57(5), 1375-1391. doi: 10.13031/trans.57.10685
- Döll, P., Jiménez-Cisneros, B., Oki, T., Arnell, N. W., Benito, G., Cogley, J. G., Jiang, T., Kundzewicz, Z. W., Mwakalila, S., & Nishijima, A. (2015). Integrating risks of climate change into water management. *Hydrological Sciences Journal*, 60(1), 4-13. doi: 10.1080/02626667.2014.967250
- European Commission (2000). *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A32000L0060>
- European Commission (2021a). *Impact of climate change on floods: Survey findings and possible next steps to close the knowledge and implementation gap*. European Flood Working Group.
- European Commission (2021b). *Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ("European Climate Law")*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32021R1119yqid=1627892432177>
- Fernández, J., Frías, M. D., Cabos, W. D., Cofiño, A. S., Domínguez, M., Fita, L., Gaertner, M. A., García-Díez, M., Gutiérrez, J. M., Jiménez-Guerrero, P., Liguori, G., Montávez, J. P., Romera, R., & Sánchez, E. (2019). Consistency of climate change projections from multiple global and regional model intercomparison projects. *Climate Dynamics*, 52(1), 1139-1156. doi: 10.1007/s00382-018-4181-8
- Francés, F. (1998). Using the TCEV distribution function with systematic and non-systematic data in a regional flood frequency analysis. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 12(4), 267-283. doi: 10.1007/s004770050021
- Francés, F., Vélez, J. I., & Vélez, J. J. (2007). Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 332(1), 226-240. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.032>
- Gabaldó, O., Fleitz, J., & Villalba Bergado, F. (2002). SAIH Flood warning system and emergency management in the Júcar basin (Spain): The case study of October 2000. En *Mitigation of Climate Induced Natural Hazards (MITCH) Workshop II: Advances in Flood Forecasting* (p. 15). Barcelona, 10-12 de junio de 2002, Flood Warning and Emergency Management.
- Gutiérrez, J. M., Maraun, D., Widmann, M., Huth, R., Hertig, E., Benestad, R., Roessler, O., Wibig, J., Wilcke, R., Kotlarski, S., San Martín, D., Herrera, S., Bedia, J., Casanueva, A., Manzananas, R., Iturbide, M., Vrac, M., Dubrovsky, M., Ribalaygua, J., Pórtoles, J., Rätty, O., Räisänen, J., Hingray, B., Raynaud, D., Casado, M. J., Ramos, P., Zerenner, T., Turco, M., Bosshard, T., Štěpánek, P., Bar-

- tholy, J., Pongracz, R., Keller, D. E., Fischer, A. M., Cardoso, R. M., Soares, P. M. M., Czernecki, B., & Pagé, C. (2019). An intercomparison of a large ensemble of statistical downscaling methods over Europe: Results from the VALUE perfect predictor cross-validation experiment. *International Journal of Climatology*, 39(9), 3750-3785. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.5462>
- Herrera, S., Fernández, J., & Gutiérrez, J. M. (2016). Update of the Spain02 gridded observational dataset for EURO-CORDEX evaluation: assessing the effect of the interpolation methodology. *International Journal of Climatology*, 36(2), 900-908. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.4391>
- House, P. K., Pearthree, P. A., & Klawon, J. E. (2002). Historical flood and paleoflood chronology of the Lower Verde River, Arizona: stratigraphic evidence and related uncertainties. En House, P. K., Webb, R. H., Baker, V. R., & Levish, D. R. (eds.). *Ancient Floods, Modern Hazards: Principles and Applications of Paleoflood Hydrology* (vol. 5, pp. 267-293). Washington, DC: American Geophysical Union.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge / Nueva York: Cambridge University Press.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O., Bouwer, L., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., & Yiou, P. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14(2), 563-578. doi: 10.1007/s10113-013-0499-2
- Jarrett, R. D. & England, J. F. (2002). Reliability of paleostage indicators for paleoflood studies. En House, P. K., Webb, R. H., Baker, V. R., & D. R. Levish (eds.). *Ancient Floods, Modern Hazards: Principles and Applications of Paleoflood Hydrology* (vol. 5, pp. 91-109). Washington, DC: American Geophysical Union.
- Jiménez Cisneros, B. E., Oki, T., Arnell, N. W., Benito, G., Cogley, J. G., Döll, P., Jiang, T., & Mwakalila, S. S. (2014). Freshwater resources. En Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R., & White, L. L. (eds.). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change* (pp. 229-269). Cambridge / Nueva York: Cambridge University Press.
- Kendall, M. G. (1976). *Time-series* (2.^a ed.). Nueva York: Hafner Press.
- Lang, M., Ouarda, T. B. M. J., & Bobée, B. (1999). Towards operational guidelines for over-threshold modeling. *Journal of Hydrology*, 225, 103-117.
- Llasat, M. C. & Puigcerver, M. (1990). Cold air pools over Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 42(3), 171-177. doi: 10.1007/bf01314823
- Machado, M. J., Medialdea, A., Calle, M., Rico, M. T., Sanchez-Moya, Y., Sopena, A., & Benito, G. (2017). Historical palaeohydrology and landscape resilience of a Mediterranean rambla (Castellon, NE Spain): Floods and people. *Quaternary Science Reviews*, 171, 182-198. doi: 10.1016/j.quascirev.2017.07.014

- Matalas, N. C. (2012). Comment on the Announced Death of Stationarity. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(4), 311-312. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000215
- Mateu, J. F. (1974). La Rambla de la Viuda. Clima e hidrología. *Cuad. Geogr*, 15, 47-68.
- Mateu, J. F. (2010). *La Primera Confederación Hidrográfica del Júcar (1934-1942)*. Valencia: Confederación Hidrográfica del Júcar.
- Mehan, S., Guo, T., Gitau, M. W., & Flanagan, D. C. (2017). Comparative Study of Different Stochastic Weather Generators for Long-Term Climate Data Simulation. *Climate*, 5(2), 26. <https://doi.org/10.3390/cli5020026>
- Milly, P. C. D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P., & Stouffer, R. J. (2008). Stationarity Is Dead: Whither Water Management? *Science*, 319(5863), 573-574. doi: 10.1126/science.1151915
- Montalvo, C. & Francés, F. (2017). Análisis integral del impacto del Cambio Climático en los regímenes de agua, crecidas y sedimentos de una rambla mediterránea. *Ingeniería del Agua*, 21, 263.
- Naulet, R., Lang, M., Ouarda, T., Coeur, D., Bobee, B., Recking, A., & Moussay, D. (2005). Flood frequency analysis on the Ardeche river using French documentary sources from the last two centuries. *Journal of Hydrology*, 313(1-2), 58-78. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.02.011
- Rodríguez-Lloveras, X., Bussi, G., Francés, F., Rodríguez-Caballero, E., Solé-Benet, A., Calle, M., & Benito, G. (2015). Patterns of runoff and sediment production in response to land-use changes in an ungauged Mediterranean catchment. *Journal of Hydrology*, 531, 1054-1066. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.014>
- Rodríguez-Lloveras, X., Buytaert, W., & Benito, G. (2016). Land use can offset climate change induced increases in erosion in Mediterranean watersheds. *Catena*, 143, 244-255. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.04.012>
- Segura-Beltrán, F. S. (2006). Las inundaciones de la Plana de Castelló. *Cuadernos de Geografía*, 79, 75-100.
- Segura-Beltran, F. S. & Camarasa, A. (1996). Balances hídricos de crecidas en ramblas mediterráneas: Pérdidas hídricas. En Marzol, M. V. D. & Valladares, P. (eds.). *Clima y Agua: La Gestión de un Recurso Climático* (pp. 235-245). San Cristóbal de la Laguna: La Laguna University.
- Segura-Beltran, F. S. & Pardo-Pascual, J. E. (2019). Fan Deltas and Floodplains in Valencian Coastal Plains. En Morales, J. A. (ed.). *The Spanish Coastal Systems: Dynamic Processes, Sediments and Management* (pp. 489-516). Switzerland AG: Springer Nature.
- Simón, J. L., Pérez-Cueva, A. J., & Calvo-Cases, A. (2013). Tectonic beheading of fluvial valleys in the Maestrat grabens (eastern Spain): insights into slip rates of Pleistocene extensional faults. *Tectonophysics*, 593, 73-84. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.02.026>
- Sociedad General de Riegos (1925). *Pantano de Maria Cristina, Castelló de la Plana*. Castelló, Imprenta de Francisco Segarra.
- St. George, S., Hefner, A. M., & Avila, J. (2020). Paleofloods stage a comeback. *Nature Geoscience*, 13(12), 766-768. doi: 10.1038/s41561-020-00664-2

- Verdin, A., Rajagopalan, B., Kleiber, W., & Katz, R. W. (2015). Coupled stochastic weather generation using spatial and generalized linear models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 29(2), 347-356. doi: 10.1007/s00477-014-0911-6
- Villarini, G., Smith, J. A., Serinaldi, F., Bales, J., Bates, P. D., & Krajewski, W. F. (2009). Flood frequency analysis for nonstationary annual peak records in an urban drainage basin. *Advances in Water Resources*, 32(8), 1255-1266. doi: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2009.05.003>
- Whipple, K. X., Snyder, N. P., & Dollenmayer, K. (2000). Rates and processes of bedrock incision by the Upper Ukak River since the 1912 Novarupta ash flow in the Valley of Ten Thousand Smokes, Alaska. *Geology*, 28(9), 835-838. doi: 10.1130/0091-7613(2000)28<835:rapobi>2.0.co;2
- Zahn, M. & von Storch, H. (2010). Decreased frequency of North Atlantic polar lows associated with future climate warming. *Nature*, 467(7313), 309-312. doi: 10.1038/nature09388.

Cómo citar este artículo:

Benito, G., Beneyto, C., Aranda, J. Á., Machado, M.^a, Francés, F., & Sánchez-Moya, Y. (2021). Inundaciones y cambio climático: certezas e incertidumbres en el camino a la adaptación. *Cuadernos de Geografía*, 107, 191-216. <https://doi.org/10.7203/CGUV.107.21424>



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