

Aproximación multidisciplinar al estudio del impacto del cambio climático en las inundaciones para la adaptación del diseño y análisis de seguridad de presas

G. Benito¹, J.A. Aranda², C. Beneyto², M. Iturbide³, M.J. Machado¹, M. Calle¹, F. Francés², J.M. Gutiérrez³, A. Medialdea⁴, Y. Sánchez⁵

¹ Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC, Madrid

² IIAMA, Universitat Politècnica de València, València

³ Grupo de Meteorología. Instituto de Física de Cantabria (CSIC-UC), Santander, Cantabria

⁴ Geographische Institut, Universität zu Köln, Köln, Alemania

⁵ Instituto de Geociencias, CSIC-Universidad Complutense de Madrid, Madrid

MULTIDISCIPLINARY APPROACH TO THE STUDY OF THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON FLOODS FOR THE ADAPTATION OF THE DESIGN AND SECURITY ANALYSIS OF DAMS: This paper discusses the advances in the development of new data and methods that allow the reconstruction of long series of extreme flood data, and the application of flood analysis tools in conditions of climatic variability (past records and future projections). The work focuses on one case studies located in the Rambla de la Viuda (Maria Cristina Dam), with Mediterranean climate. The aim is to compare the effects of climate change on future extreme floods, with changes in flood frequency laws determined from paleo-gauged and historical data. This methodology aims to improve the impact of climate change on hydrological extremes and their application to the design of sensitive infrastructures, with emphasis on dams. Hydro-climatic indicators will be estimated using historical, instrumental and climate series data projected with CMIP5 models.

Palabras clave: Cambio Climático, Seguridad Presas, Inundación, Paleocreencias, Peligrosidad

Key words: Climate Change, Dam safety, Flood, Paleofloods, Natural Hazards

Introducción

El diseño de ingeniería de infraestructuras sensibles como las presas se basa en registros cortos de datos observados y el análisis de frecuencia de inundación suponiendo un clima estacionario (Penas et al., 1997). Los impactos recientes del cambio climático en el ciclo hidrológico muestran la necesidad de avanzar en las metodologías que permitan ampliar el registro de eventos extremos y de nuevas herramientas que incorporen en el análisis de frecuencias la información no sistemática y modelos no estacionarios dependientes de la variabilidad del clima, mejorando el diseño de infraestructuras sensibles en el contexto del cambio climático (Ho et al., 2017). Sin embargo, la aplicación de nuevas herramientas y datos hidro-climáticos ha sido bastante difícil debido al número limitado de modelos no estacionarios, a los escasos registros de inundaciones a largo plazo para probar la eficacia de esta metodología, y a la falta de modelos climáticos que generen proyecciones fiables y datos clave sobre eventos extremos (Hall et al., 2014). En este

trabajo se exponen los avances en el desarrollo metodológico que permita reconstruir series largas de datos de inundaciones extremas, y la aplicación de herramientas de análisis de las inundaciones en condiciones de variabilidad climática (registros pasados y proyecciones futuras). El trabajo se centra en un caso de estudio con clima Mediterráneo, en concreto en la presa de María Cristina, en la Rambla de la Viuda (Castellón). Se pretende comparar los efectos del cambio climático en las inundaciones extremas futuras, con cambios en las leyes de frecuencia de las inundaciones determinados a partir de datos de paleocreencias e históricos.

Metodología

La metodología propuesta (Fig. 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-

ID	Earth System model (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

Tabla 1. Proyecciones EURO-CORDEX implementadas.
 Table 1. Regional climate projections used in this study.

CORDEX que presenta una resolución estándar de 0.11° (~12km). Se han seleccionado 5 modelos (Tabla 1) que recogen la variabilidad de 5 modelos de circulación global (GCMs) y 4 modelos regionales de clima (RCMs). Los periodos climáticos considerados son 1971-2000 para el clima observado y el escenario clima actual simulado, y 2041-2070 para el periodo de futuro para el escenario de emisiones RCP8.5.

En las salidas de los RCMs se han corregido los sesgos mediante el "método delta", comparando el periodo 2041-2070 con el experimento histórico simulado (1971-2000). La "delta" resultante contiene la señal del cambio climático que ha de sumarse posteriormente al conjunto de datos de observaciones Spain02 v5 (climatología de referencia), obteniendo así las proyecciones de cambio climático susceptibles de ser utilizadas en estudios de impactos.

Los datos climáticos se incorporan en el modelo hidrológico distribuido TETIS calibrado y validado con datos observados. El modelo hidrológico diario permite la asignación de de probabilidad a la magnitud de los hidrogramas en los puntos de entrada del embalse (PE). Los caudales diarios se han transformado en instantáneos aplicado un factor de 2.98. En la estimación de los cuantiles de 1000 y 5000 años del caudal instantáneo máximo se han realizado tres pasos: (1) se generan 1000 años de precipitación y temperaturas diarias con el modelo meteorológico correspondiente a cada escenario climático por generación de Montecarlo (software MulGETS); (2) se simulan los caudales diarios con el modelo hidrológico diario, y (3) se seleccionan los caudales diarios máximos anuales y se convierten en instantáneos.

El estudio de paleocrecidas se ha basado en la estratigrafía de los depósitos de remanso, su datación mediante radiocarbono y luminiscen-

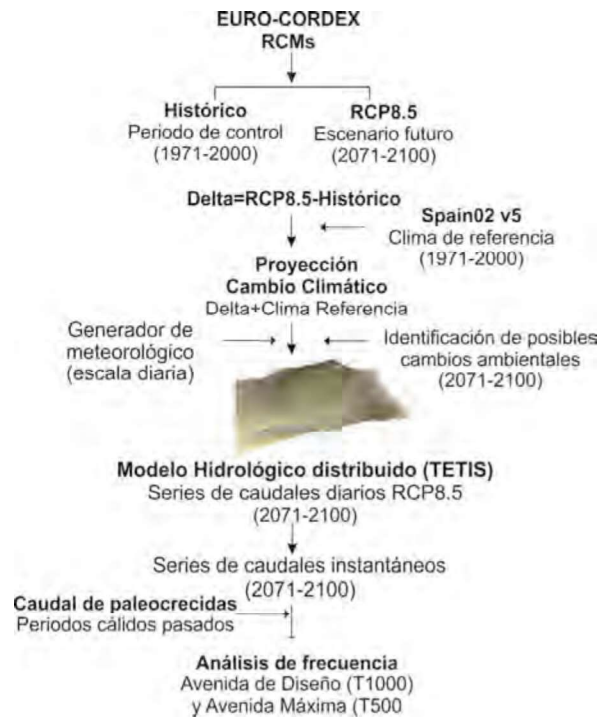


Fig. 1. Esquema del proceso metodológico
 Fig. 1. Methodological chartflow

cia, y determinación del calado mínimo de las crecidas. La estimación de caudal asociado a los niveles de crecida se ha obtenido mediante el modelo hidráulico HEC-RAS, habiéndose realizado un levantamiento topográfico muy detallado (GPS). Los datos de paleocrecidas se han completado con la información histórica disponible (Machado et al., 2017). En el análisis de la frecuencia se combinaron los datos instrumentales, y datos de paleocrecidas utilizando el programa AFINS basado en algoritmos de Máxima Verosimilitud. Los datos presentaron su mejor ajuste a una distribución de tipo TCEV, permitiendo la determinación de los cuantiles de interés en seguridad de presas (1000, 5000 y 10.000 años).

Resultados

Proyección de precipitación máxima

La retícula del modelo regional comprende 18 estaciones de la rejilla de datos Spain02v5, 12 dentro de la cuenca y 6 en el exterior. En 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 (obs vs predicted). Dado que las muestras son de 30 años la comparativa se centró en los cuantiles entre 10 y 100 años. El modelo que genera las precipitaciones más altas es el 9, mientras que el modelo 7 genera las precipitaciones más bajas. Seguidamente se analizó el grado de correlación entre cada estación de la rejilla mediante matrices de correlación y de covarianza, eliminando los datos de precipitación inferiores a 1 mm. 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 100 años, existiendo una alta desviación para cuantiles mayores (Fig. 2). Esto muestra la falta de datos (40 años).

Modelo Hidrológico

El modelo hidrológico TETIS se calibró y validó para el periodo observado. Las series sintéticas de precipitación de 1000 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, que se transformaron en caudales instantáneos.

Los cuantiles de caudal instantáneos obtenidos mediante proyecciones climáticas (Tabla 2) muestran una elevada dispersión respecto a los obtenidos en el clima actual. El modelo 8 parece tener un comportamiento más estable con un incremento en Q respecto al periodo de control de entre el +11% (T25) y +6-10% (T50 a T10.000). Los caudales para los cuantiles obtenidos para clima actual (40

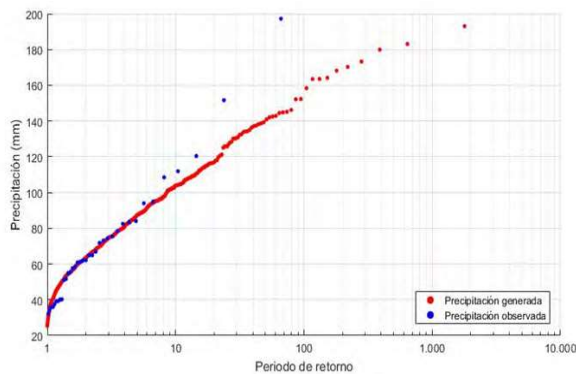


Fig. 2. Función de distribución empírica de la lluvia diaria máxima anual sobre el grid 3717
 Fig. 2. Plotting positions of anual máxima daily rainfall.

T años	Clima actual	Proyecciones climáticas				
		M1	M7	M8	M9	M11
10	180	116	83	194	207	160
25	280	179	131	312	360	277
50	363	236	174	399	518	398
100	446	302	225	485	727	557
500	637	494	379	683	1507	1145
1000	717	598	465	765	2032	1539
5000	897	906	725	952	3986	2995
10000	967	1073	870	1025	5300	3968

Tabla 2. Cuantiles de caudal instantáneo (m^3s^{-1}) para calculados para el clima actual y proyecciones de clima. Table 2. Peak discharges (m^3s^{-1}) at recurrence intervals calculated for current climate and climate projections.

años de registro) son entre 2 y 3 veces inferiores a los obtenidos del análisis de registro de aforos (1959-2011), demostrando la importancia del análisis de series largas para la determinación de cuantiles.

Registros de paleocrecidas

En la Rambla de la Viuda el registro de paleocrecidas abarca los últimos 600 años (Machado et al., 2017). La frecuencia media de las crecida extrema ($>1000 m^3s^{-1}$) es de 1 cada 40 años durante los periodos 1420-1620 y 1883 al presente. La disminución en la ocurrencia de grandes inundaciones durante 1620-1775 (ausencia de grandes inundaciones) coincide con el Mínimo de Maunder Tardío (1675-1715 CE) relacionado con una disminución de la actividad solar con condiciones de frío y secado en el este de España. Se registró un corto período 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 coincidentes climáticamente con la Anomalía de Maldá. Las condiciones climáticas de la Anomalía Maldá serían análogas a las esperables en las proyecciones de Cambio Climático futuro. La mayor inundación registrada corresponde a este periodo, en concreto en 1883 con un caudal estimado de $1830 m^3s^{-1}$. La crecida de 1787 produjo la rotura de la presa de la Alcora, y excedió los $1500 m^3s^{-1}$, siendo de magnitud similar a las ocurridas en 1783 y 1801.

Durante el siglo 20 al menos tres crecidas excedieron los $1000 m^3s^{-1}$, destacando la ocurrida en 1920 ($\sim 1000 m^3s^{-1}$), 1962 ($\sim 1500 m^3s^{-1}$), 2000 ($\sim 1268 m^3s^{-1}$).

T años	Q aforos	Q paleo	% Cambio	Caumax
5	110	155	30	400
10	305	480	36	522
25	710	920	22	790
50	1000	1250	20	
100	1300	1570	17	2547
500	1975	2305	14	5837
1000	2250	2615	14	
5000	2900	3300	14	
10000		3565		

Tabla 3. Ajuste TCEV de caudales (m^3s^{-1}) en Rambla de la Viuda, y diferencia (%). Caumax según CEDEX (2011).

Table 1. TCEV distribution fitted to systematic (aforos) and non-systematic (paleo) data in R. de la Viuda.

Los cambios en vegetación, usos de suelo y clima han podido afectar a los caudales durante eventos moderados, pero durante las crecidas extremas se requiere de condiciones de saturación del suelo. Se ha realizado un análisis de estacionaridad (Test de Lang; Lang et al., 1999) de la frecuencia de las inundaciones $>1000 m^3s^{-1}$, mostrando condiciones estacionarias para el periodo 1617-2014. El análisis de frecuencias combina datos del registro instrumental (presa de María Cristina) con datos censurados del estudio de paleocrecidas mediante el método de Máxima Verosimilitud. El mejor ajuste se obtiene para una función de distribución del tipo Two Component Extreme Value (TCEV). Este análisis de frecuencia con datos de paleocrecidas muestra valores más altos de magnitud de los cuantiles de inundación que los obtenidos solo con el registro sistemático (Tabla 3). Por ejemplo, la inundación de probabilidad anual del 1% basada en conjunto de datos de paleocrecidas e instrumental es $1570 m^3s^{-1}$, mientras que el uso del registro sistemático es de $1300 m^3s^{-1}$. Además, la inundación de 1000 años utilizada para el diseño hidráulico de vertederos de presas como resultado de nuestro análisis de frecuencia es de $2615 m^3s^{-1}$, lo que pone de relieve el diseño deficiente de la presa actual ($600 m^3s^{-1}$). Estos datos muestran que el diseño actual representa un riesgo importante para la seguridad de las presas de la represa María Cristina.

Conclusiones

Los datos de los cuantiles de interés en la seguridad de presas (1000 y 5000 años) obtenidos mediante proyecciones de clima

muestran una elevada incertidumbre, con aumentos de 180-340% (modelo 9) y disminuciones de 20-35% (modelo 7). Esta variabilidad muestra la dificultad de obtener caudales para cuantiles altos incluso en el caso de la generación de series de precipitación de 1000 años, dado que estos conservan los parámetros estadísticos de las series de clima proyectadas de 30 años.

La incorporación de caudales pasados (paleocrecidas) en periodos cálidos muestra mayor consistencia en la estimación de los cuantiles de interés en infraestructuras sensibles. La mayor crecida del registro ocurrida en 1883 ($1830 m^3s^{-1}$) podría representar un grave riesgo de colapso en el embalse de María Cristina (aliviadero de $600 m^3s^{-1}$) que, en caso de rotura, podría tener consecuencias catastróficas para las comunidades de Vila-Real y Almansora. Según nuestro estudio, la avenida de diseño (T1000) se estima en $2615 m^3s^{-1}$, y la avenida Máxima (T10,000 años) en $3565 m^3s^{-1}$.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por Fundación Biodiversidad (MAPAMA) a través del proyecto Adaptapresa, y por la CICYT Proyectos FLOOD-MED (CGL2008-06474-C02-01), TETIS-MED (CGL2008-06474-C02-02) y EPHIMED (CGL2017-86839-C3-1-R).

Bibliografía

- CEDEX, 2011. Mapa de caudales máximos. Memoria Técnica, Madrid, 67 pp.
- Hall, J., et al. 2014, Understanding flood regime changes in Europe: a state-of-the-art assessment, *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 2735-2772.
- Ho, M., Lall, U., Allaire, M., Devineni, N., Kwon, H.H., Pal, I., Raff, D., y Wegner D. 2017. The future role of dams in the United States of America, *Water Resources Research*, 53, 982-998.
- Machado, M.J., Medialdea, A., Calle, M., Rico, M.T., Sánchez-Moya, Y., Sopena, A., Benito, G. 2017. Historical palaeohydrology and landscape resilience of a Mediterranean rambla (NE Spain). *Quaternary Science. Reviews* 171,182-198.
- Penas, J., Berga, L. y de Andrés, M. 1997. Clasificación de presas en función del riesgo potencial. Guía Técnica. MMA. Madrid, 55 pp.