

Hidrología de paleocrecidas aplicada al cálculo de la Avenida de Diseño y Avenida Máxima de presas

G. Benito¹, M. Rico¹, A. Díez Herrero², Y. Sánchez-Moya³, A. Sopena³ y V. R. Thorndycraft¹

¹ CSIC-Centro de Ciencias Medioambientales, Serrano 115 bis, 28006 Madrid. benito@ccma.csic.es, mayte@ccma.csic.es, varyl@ccma.csic.es

² Dpto. de Ingeniería Geológica y Minera, Universidad de Castilla la Mancha, 45071 Toledo. andres.diez@uclm.es

³ Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid. yol@geo.ucm.es, sopena@geo.ucm.es

ABSTRACT

Spanish regulations on dam safety recommend the estimation of a return period of 1000 years for the Design Flood and of 10,000 for the Safety Check Flood. The criteria used for the calculations are based on Flood Frequency Analysis (FFA) from gauge record data or on the Probable Maximum Flood (PMF) which is the hypothetical maximum of rainfall turned into runoff. The short gauge records affords little support for the FFA and for the hypothetical PMF, which in addition to the absence of a associated probability, limits the utility of these indices for risk-based dam safety decisions. Palaeoflood techniques are a means of directly assessing the probability of extreme floods and testing the validity of the PMF-based models. In this paper, palaeoflood record was applied to a case study in the Guadalentín river, upstream of the Valdeinfierno reservoir (372 km²) with a spillway capacity of 550 m³s⁻¹ (design flood). In addition, available historical flood data was collected. Palaeoflood data and gauge record, were combined for the FFA, using existing methods for the fitting of distribution functions, such as the maximum likelihood. Palaeoflood analysis provides a discharge of 2350 m³s⁻¹ for the design flood (1000-yr return period), and 3450 m³s⁻¹ for the safety check flood (10,000 yr-return period). The discharge estimated by the PMF is 5786 m³s⁻¹, showing an overestimation of this empirical method. Some recommendations for the calculation of the safety check flood and design flood are provided which can improve existing legislation on dam safety.

Key words: palaeofloods, design flood, dam safety, flood frequency analysis, Guadalentín river.

INTRODUCCIÓN

Según el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses (MOPTMA, 1996), la categoría de una presa desde el punto de vista de la seguridad está condicionada por el riesgo previsible que genera a elementos situados aguas abajo. Así, la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el riesgo de inundaciones (MJI, 1995) cataloga las presas en tres tipos: Categoría A, afecciones graves a núcleos urbanos; Categoría B, daños materiales o medioambientales importantes; y Categoría C, daños materiales moderados. Aunque la Directriz insiste en el empleo de métodos de cálculo de tipo probabilístico (análisis estadístico y cálculo hidrometeorológico) en el cálculo de la avenida de diseño, recomienda nuevamente la consideración de datos "históricos". Igualmente, se diferencia entre avenida de proyecto o diseño (máxima para un correcto funcionamiento de órganos de desagüe) y avenida extrema (avenida mayor que la presa debe soportar sin que se produzca su rotura). Para determinar dichas avenidas la Guía Técnica de Seguridad de Presas (Comité Español de Grandes Presas, 1997) recomienda los siguientes periodos de retorno:

CATEGORÍA DE LA PRESA	AVENIDA DE PROYECTO	AVENIDA EXTREMA
A	1.000	5.000-10.000
B	500	1.000-5.000
C	100	100-500

La estimación de estos periodos de retorno a partir de las exiguas series de datos foronómicos o meteorológicos del registro sistemático (ordinario) carece del rigor científico que requiere la envergadura de estos proyectos. En las últimas décadas, se ha utilizado el concepto de la avenida máxima probable o PMF para su aplicación a la seguridad de presas y embalses (Berga, 1998). Esta metodología se basa en maximizar las situaciones que producen precipitaciones extremas hasta obtener una máxima precipitación probable (PMP), que es transformada en caudales mediante modelos de precipitación-escorrentía. Esta metodología, además de compleja, aparece limitada por la falta de probabilidad asociada a la PMF, lo que obstaculiza su uso para la toma de decisiones basadas en el riesgo hidrológico. Las técnicas paleohidrológicas constituyen una herramienta perfecta para alargar el periodo de registro de los eventos

extremos a varios miles de años, y su utilización en la determinación de la función de distribución de frecuencias de avenidas. En este trabajo, se presentan los resultados obtenidos en la reconstrucción del registro de paleocrecidas de gran magnitud en un caso de estudio localizado en el río Guadalentín. En esta zona se contemplarán distintas metodologías según se trate de depósitos de avenidas depositados en zonas de baja energía (slackwater flood sediments) (Baker *et al.*, 1983; Benito *et al.*, 2003) o se utilizan niveles geomorfológicos como umbrales de caudal excedidos o no sobrepasados por las paleocrecidas (Levish *et al.*, 1996). Igualmente, se utilizan las referencias documentales (avenidas históricas) para completar o contrastar los datos de paleocrecidas (Benito *et al.*, 2003).

Para la estimación de los caudales asociados a las alturas de los depósitos (calado o nivel mínimo alcanzado por la avenida) o de las referencias históricas, se ha utilizado el modelo hidráulico unidimensional HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center, 1995). La ley de frecuencias se ha calculado mediante métodos existentes de ajuste de funciones de distribución con datos no sistemáticos, basados en algoritmos de máxima verosimilitud (Stedinger y Cohn, 1986; Francés, 2004). Los caudales asociados a crecidas con periodos de retorno elevado se han comparado con los resultantes del cálculo de la avenida máxima probable (PMF).

CUENCA ALTA DEL GUADALENTÍN

En el río Guadalentín (tramo alto conocido como río Luchena), se han realizado 9 perfiles estratigráficos en los depósitos de crecida en un tramo de 2,5 km situado en el

entorno de la confluencia de la Rambla Mayor y río Caramel (Fig. 1), aguas arriba del embalse de Valdeinfierno. El río Guadalentín presenta un régimen mediterráneo, marcadamente torrencial. Las estaciones de aforo se localizan en los embalses de Valdeinfierno y Puentes. El embalse de Valdeinfierno se construyó entre 1806-1892, con una altura de la cerrada de 49,21 m, longitud de coronación de 165 m, volumen de embalse de 14,19 hm³, y una capacidad de aliviadero de 550 m³s⁻¹ (avenida de diseño). Se trataría de una presa de tipo A por sus dimensiones y por el riesgo que supondría su rotura sobre la presa de Puentes, localizada aguas abajo.

Los depósitos de crecidas se localizan en los laterales más alejados o protegidos de los cursos de los ríos Caramel y Rambla Mayor, aguas arriba de un cañón rocoso de unos 25-30 m de anchura donde confluyen ambos ríos. Igualmente, se han encontrado depósitos en pequeñas cavidades desarrolladas en las paredes del cañón rocoso, y en el interior de algunos barrancos afluentes. Los depósitos de inundación están constituidos por arenas, limos y, ocasionalmente arcillas, presentando espesores que oscilan entre unos pocos centímetros y 0,4 m. Desde el punto de vista sedimentológico, las secuencias verticales más comunes son granodecrecientes, con estructuras masiva, laminación horizontal y laminación cruzada. Con mucha frecuencia, las unidades arenosas terminan con estructuras producidas por la migración de *climbing ripples*, sobre los que se deposita una fina lámina de limos que representa el final de la crecida.

Se han realizado 13 dataciones mediante C-14, obteniéndose en los depósitos más antiguos una edad de 1985±50 BP, aunque la mayor parte de los niveles presentan

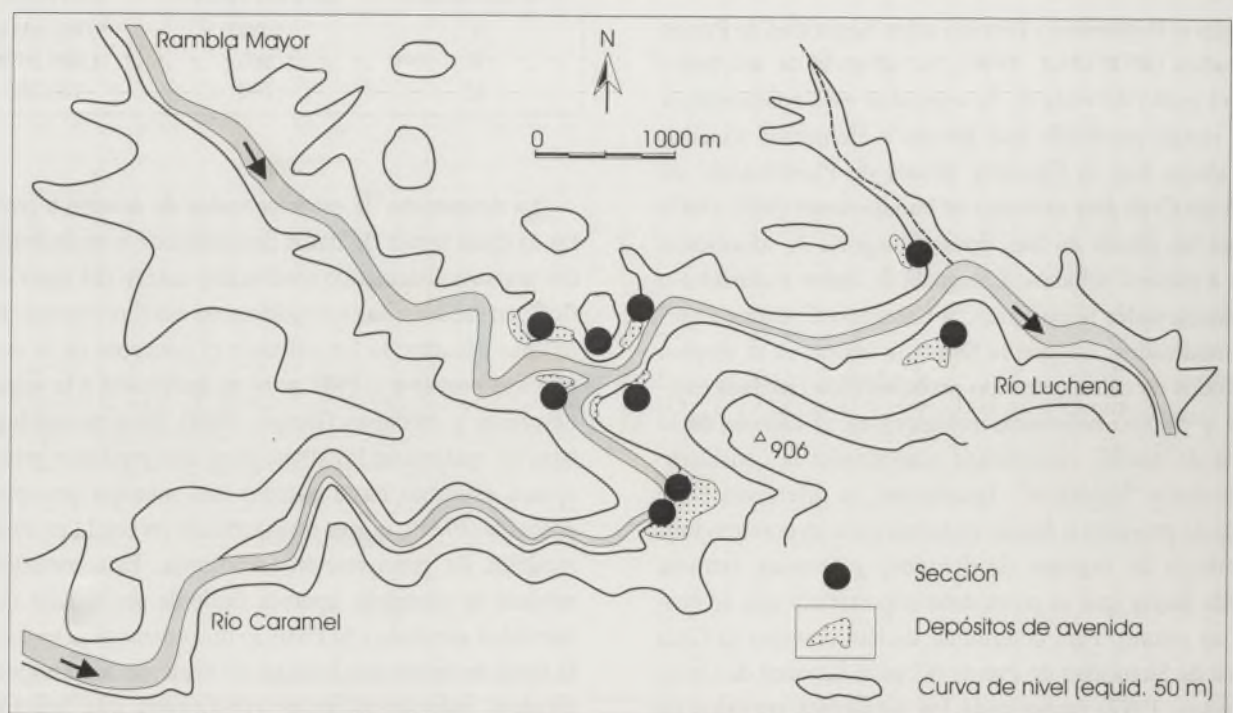


FIGURA 1. Localización de secciones estratigráficas estudiadas en la Rambla Mayor y el Río Caramel.

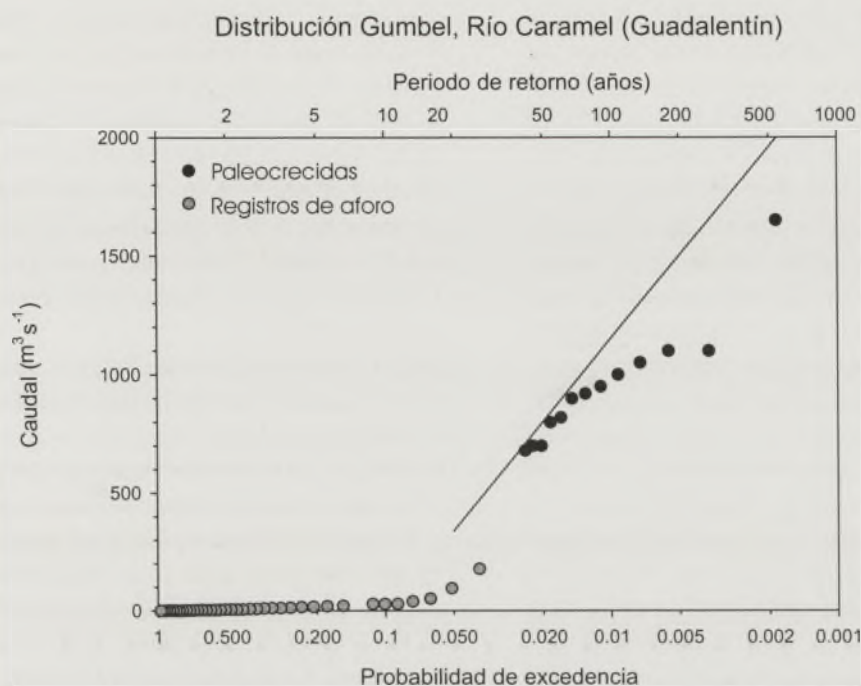


FIGURA 2. Distribución Gumbel utilizando datos sistemáticos (registros de aforos) y no sistemáticos (registros de paleocrecidas) para el río Guadalentín aguas arriba del embalse de Valdeinfierno.

edades correspondientes a los últimos 1000 años. Los caudales punta estimados para estas paleocrecidas oscilan entre los $15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $1616 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, este último corresponde a la avenida de 1973, de la cual no existe registro foronómico en esta parte alta de la cuenca. Estos caudales punta asociados a las paleocrecidas son hasta tres veces superiores a la capacidad de aliviadero de la presa de Valdeinfierno, que debería ser capaz de evacuar la avenida de periodo de retorno de 1000 años. En el análisis estadístico se ha realizado la asignación de probabilidades mediante la fórmula de Weibull, a la que se ha aplicado una distribución Gumbel mediante el método de máxima verosimilitud (Fig. 2).

El principal problema encontrado en este ajuste estadístico proviene de los datos de aforo, debido a que la mayor parte de los caudales del embalse de Valdeinfierno corresponden a valores medios diarios. Por ello, se ha optado por eliminar del análisis los caudales medios y utilizar los registros de caudal instantáneo en aquellos años que se dispone en la serie. De acuerdo con este análisis, las crecidas con periodo de retorno (T) de 100, 500, 1000, 5000 y 10000 años corresponden a caudales de 1150, 1950, 2300, 3100 y $3450 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ respectivamente. Estos datos resultan del mismo orden que los obtenidos por el CEDEX a partir del cálculo hidrometeorológico de avenidas mediante un modelo distribuido, y que corresponden a caudales de 935, 1722, 2121, 3204 y $3727 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para estos mismos periodos de retorno. De estos datos se deduce que la avenida de diseño utilizada para dimensionar la capacidad del aliviadero de la presa de Valdeinfierno ($550 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) se encuentra infraestimada para la magnitud de las crecidas del Guadalentín en esta parte alta

de la cuenca. La dimensión de este aliviadero de acuerdo al Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses (MOPTMA, 1996) debería de realizarse para una avenida de diseño de $2300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y una avenida extrema de $3450 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. El caudal de la avenida máxima probable (PMF) ha sido calculado mediante una fórmula empírica donde se establece una relación de las precipitaciones máximas registradas a nivel mundial (envolvente), en donde se han introducido modificaciones para España. De acuerdo a esta fórmula empírica la PMF para la cuenca aguas arriba de Valdeinfierno es de $5786 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (A. Jiménez, comunicación personal). Este método sobreestima los valores de caudal y su aplicación en el diseño de presas puede suponer el sobredimensionado de los órganos de desagüe y los parámetros de seguridad, con el consiguiente encarecimiento de la obra.

CONCLUSIONES

En este trabajo se pone en evidencia el potencial que presenta el estudio de paleocrecidas para la determinación de caudales punta y sus correspondientes periodos de retorno aplicado al cálculo de las avenidas de proyecto y máxima de presas. Los trabajos se han centrado en la cuenca alta del río Guadalentín, aguas arriba del embalse de Valdeinfierno. Los depósitos de crecidas más antiguos datan de hace unos 2000 años, aunque el registro más completo comprende los últimos 1000 años, con un total de 25 eventos registrados. Los caudales punta estimados para estas paleocrecidas oscilan entre los $15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $1616 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. De acuerdo al análisis estadístico realizado utilizando los caudales de

las paleocrecidas, junto con algunos datos de caudales punta disponibles en la estación de aforos de Valdeinfierno, la avenida de diseño de la presa de Valdeinfierno es de $2300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, mientras que la extrema es de $3450 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. De este trabajo se puede concluir que los estudios de paleocrecidas proporcionan nuevas herramientas metodológicas para la determinación de los cuantiles de crecida elevados como son las avenidas de 500, 1000, 5000 y 10.000 de periodo de retorno. Estos datos de paleocrecidas corresponden a evidencias físicas de calados o niveles de agua alcanzados por las crecidas en periodos de tiempo de varios miles de años, y presentan ventajas sobre la incertidumbre de los datos estadísticos o determinísticos obtenidos a partir de datos de aforo o de precipitación de series temporales de unas pocas décadas. Por otro lado, los caudales obtenidos mediante la estimación empírica de la PMF ($5786 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) sobreestiman los valores de caudal resultantes, y por tanto no permiten realizar una estimación realista sobre los órganos de desagüe de las presas. En resumen, este trabajo aporta una nueva propuesta metodológica dirigida a la administración y a consultoras para la incorporación de las técnicas de paleocrecidas al proceso de estimación de la avenida de diseño y extrema.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado con la financiación del Proyecto CICYT REN2001-1633/RIES "Incorporación de datos de paleocrecidas e inundaciones históricas al cálculo de la avenida de diseño de presas" (PALEOCAP).

REFERENCIAS

- Baker, V.R., Kochel, R.C., Patton, P.C. y Pickup, G. (1983): Paleohydrologic analysis of Holocene flood slack-water sediments, *En: International Conference on Fluvial Sedimentology*, 2d, Glasgow, Scotland, 1981, Proceedings: Keele, England, Blackwell: 229-239.
- Benito, G., Sopeña, A., Sánchez, Y., Machado, M.J. y Pérez González, A. (2003): Palaeoflood Record of the Tagus River (Central Spain) during the Late Pleistocene and Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 22: 1737-1756.
- Berga, L. (1998): New trends in hydrological safety. *En: Dam Safety* (L. Berga, Ed.). Balkema, Róterdam: 1099-1106.
- Comité Español de Grandes Presas (1997): *Guías Técnicas de seguridad de Presas y Embalses*. Guía No. 4. Avenida de Proyecto. 107 p.
- Francés, F. (2004): Flood frequency analysis using systematic and non-systematic information. *En Systematic, paleoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation: Methodological guidelines* (G. Benito y V.R. Thorndycraft, Eds.). CSIC-Centro de Ciencias Medioambientales, Madrid: 55-70.
- Hydrologic Engineering Center (1995): *HEC-RAS, River Analysis System*, Hydraulics Reference Manual, (CPD-69).
- Levish, D.R., Ostenaar, D.A. y O'Connell, R.H. (1996): Paleohydrologic bounds and the frequency of extreme floods on the Santa Ynez river, California. *En: A Prehistoric look at California Rainfall and Floods*. Weather Symposium, California: 1-19.
- MJI (1995): *Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de inundaciones*. Resol. 1 enero. BOE, 38.
- MOPTMA (1996): *Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses*. Orden de 12 de marzo. B.O.E., 78.
- Stedinger, J. y Cohn, T.A. (1986): Flood frequency analysis with historical and paleoflood information. *Water Resources Research*, 22: 785-793.