



Metodología para el análisis de rotura de presas con aterramiento mediante simulación con fondo móvil

Marcos Sanz-Ramos, Gonzalo Olivares Cerpa & Ernest Bladé i Castellet

To cite this article: Marcos Sanz-Ramos, Gonzalo Olivares Cerpa & Ernest Bladé i Castellet (2019) Metodología para el análisis de rotura de presas con aterramiento mediante simulación con fondo móvil, Ribagua, 6:2, 138-147, DOI: [10.1080/23863781.2019.1705198](https://doi.org/10.1080/23863781.2019.1705198)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/23863781.2019.1705198>



© 2020 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group on behalf of the International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR)



Published online: 20 Jan 2020.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 234






View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)

Metodología para el análisis de rotura de presas con aterramiento mediante simulación con fondo móvil

Marcos Sanz-Ramos , Gonzalo Olivares Cerpa  and Ernest Bladé i Castellet 

Institut Flumen, Universitat Politècnica de Catalunya - CIMNE, Barcelona, Spain

RESUMEN

Los estudios de rotura de presas permiten evaluar la peligrosidad y el riesgo por inundación asociado a un posible fallo de estas estructuras. La legislación y documentos técnicos vigentes en España marcan el camino a seguir para la correcta clasificación de la presa en función del riesgo potencial que supone para la sociedad, la economía y el medioambiente. Sin embargo, existe un vacío en las recomendaciones a seguir cuando la presa a clasificar se encuentra parcial o totalmente aterrada de sedimentos. El presente documento tiene por objeto presentar una metodología para afrontar estudios de rotura de presas aterradas mediante simulación numérica conjunta de la formación de la brecha y el transporte de sedimentos (fondo móvil). La aplicación de esta metodología a un caso de estudio real ha permitido observar cómo el hidrograma tras la rotura considerando fondo móvil es sensiblemente diferente al obtenido por la metodología estándar que considera fondo fijo dentro del vaso.

PALABRAS CLAVE

Rotura presas; aterramiento; transporte sedimentos; clasificación presas; riesgo; inundación; simulación 2D; Iber

Introducción

Las inundaciones son fenómenos naturales que causan graves daños económicos, ambientales y sociales [1,2]. La sensibilidad de la población frente a eventos que potencialmente puedan ocasionar riesgo es muy diversa, dependiendo en gran medida del tipo de riesgo y de su percepción a la exposición del riesgo.

Para hacer frente a esta problemática, la Unión Europea ha tratado de fijar unas pautas para minimizar el riesgo de inundación. La Directiva Europea 2007/60/CE de inundaciones [3], transpuesta en el estado español mediante el Real Decreto 903/2010 de 9 julio [4], obliga a los estados miembros a realizar una serie de fases para evaluar el riesgo de inundación. Estas fases se pueden resumir en tres bloques: la identificación y selección de las áreas de riesgo potencial (Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación, EPRI, y Áreas con Riesgo Potencial Significativo de Inundación, ARPSI); la elaboración de mapas de peligrosidad y riesgo; y la realización de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI).

Los PGRI son documentos que deben permitir gestionar una eventual inundación y, además, ofrecer al ciudadano información referente a su nivel de exposición y riesgo frente a este tipo de sucesos. Sin embargo, estos documentos no contemplan, por el momento, la evaluación de la peligrosidad y el riesgo por inundaciones urbanas (por precipitación) o de carácter no fluvial. Tampoco se incluyen las inundaciones provocadas por

la rotura de una presa o balsa, tratándose éstas de forma específica mediante una categorización propia de cada país según el riesgo potencial.

En España se contempla el análisis de la peligrosidad y riesgo de inundación por una eventual rotura de una presa o balsa a través del ‘Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses’ [5] y de la ‘Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones’ [6]. En ellos se describe, entre otros aspectos, cómo clasificar la presa o balsa en función del riesgo potencial que pueda derivarse de una posible rotura o de un funcionamiento incorrecto según tres categorías A, B o C (siendo A la categoría de mayor riesgo y C la de menor en función de daños y afecciones), o sobre quién recae la responsabilidad de realizar dicha clasificación. Los aspectos técnicos para elaboración de estudios de clasificación de la presa se plasmaron en la ‘Guía Técnica para la Clasificación de presas en función del riesgo potencial’ [7], en adelante *Guía Técnica*.

La modificación del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (DPH), llevada a cabo mediante el Real Decreto 9/2008 [8], concretó la obligación de propietarios de presas y balsas de más de 5 metros o más de 100.000 m³ de disponer del pertinente estudio de clasificación de presa o balsa (Artículos 356 y 367), antes exentos. La aplicación es válida para titulares públicos y privados de presas y balsas existentes, en fase de construcción y de proyecto.

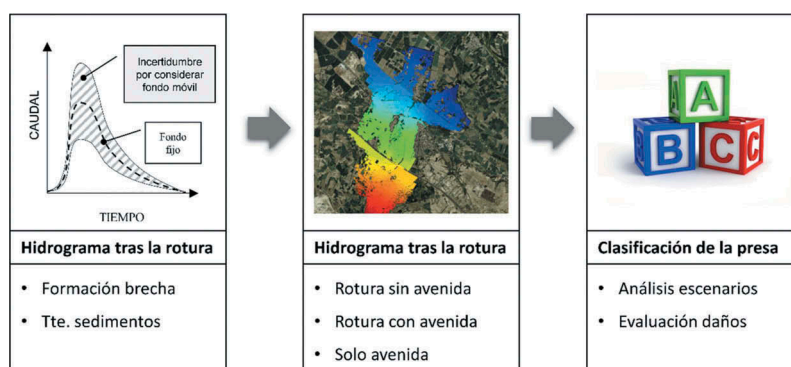


Figura 1. Esquema de la metodología para el estudio de rotura de presas con aterramiento.

Las presas situadas en cursos fluviales, además de elevar la lámina de agua, provocan la interrupción, parcial o total, de la dinámica sedimentaria del río. Consecuentemente se produce la acumulación de sedimentos en el embalse [9–12]. En función de la morfología del embalse, la aportación de sedimentos y los años que lleve en funcionamiento la presa, el nivel de aterramiento puede llegar a ser muy importante [9,11,13,14].

Teniendo en cuenta lo anterior, el análisis de rotura de presas en ríos se puede enfocar desde dos puntos distintos: en situación original (sin aterramiento) o en situación actual (con aterramiento). Sin embargo, la *Guía Técnica* no especifica, ni tampoco las legislaciones mencionadas anteriormente, cuál de estas situaciones deben estudiarse, en qué casos escoger un enfoque en detrimento del otro (*Guía Técnica*. Capítulo II, apartado 6.1) o cómo proceder en caso de que el aterramiento no sea menospreciable. La *Guía Técnica* indica que se deben realizar los estudios considerando fondo fijo tan solo aguas abajo de la presa, dejando un vacío en lo referente al sedimento sujeto a moverse dentro del embalse en caso de rotura (*Guía Técnica*. Capítulo II, apartados 5.4.1 y 5.4.3).

Con el objetivo de afrontar esta problemática, se presenta el desarrollo de una metodología que permite realizar estudios de clasificación de presas con aterramiento, parcial o total, situadas en cursos fluviales. El análisis, que se puede llevar a cabo de manera individual o integrada, incluye una nueva propuesta para el cálculo del hidrograma tras la rotura cuando la presa presenta aterramiento considerando el fondo móvil en el embalse. La nueva metodología se muestra a través del estudio de clasificación de una pequeña presa (5,25 m de altura) situada en la cuenca alta del río Llobregat (España), y cuyo nivel de aterramiento es superior al 75 %. Los resultados hidráulicos (hidrograma tras la rotura) y de clasificación fueron comparados con la metodología clásica (fondo fijo).

Materiales y métodos

La metodología propuesta se basa en lo que describe la *Guía Técnica* en el apartado 5.1 del Capítulo III (Método completo). En este apartado se fomenta el empleo de modelos hidráulicos completos ya que son los únicos capaces de representar con precisión la formación de la brecha, la definición del hidrograma tras la rotura, la propagación de la onda de avenida y, por ende, la determinación del área de inundación, la peligrosidad del flujo y los riesgos asociados.

Esta metodología puede ser aplicada al estudio de rotura de presas de manera integral o tratando cada proceso por separado (Figura 1). Los procesos que la integran se dividen en tres: un modelo que permita realizar la generación de la brecha teniendo en cuenta el fondo móvil (transporte de sedimentos) para la obtención del hidrograma tras la rotura; un modelo que permita simular la inundación a partir del hidrograma obtenido; y la evaluación de los distintos escenarios para cuantificar los posibles daños tras la rotura.

Los dos primeros procesos requieren de modelos hidráulicos según el Método Completo propuesto por la *Guía Técnica*. En la actualidad existen numerosos programas para el cálculo del hidrograma tras la rotura (DAMBRK, SMPDBK, Iber, etc.) y para la simulación de inundaciones en régimen variable (INFOWORKS, Hec-Ras, Iber, GUAD 2D, etc.), o combinación de ambos (una revisión de estos modelos se puede encontrar en [15]). Sin embargo, son escasos los modelos que permiten simular el hidrograma tras la rotura y la inundación teniendo en cuenta la previsible movilización de sedimentos que la rotura generaría en una presa aterrada.

La elección entre un proceso integrado o por separado depende del modelo hidráulico utilizado. Para el caso de estudio que se presenta a continuación se empleó el análisis por separado. Primero se obtuvo el hidrograma de rotura utilizando el modelo numérico bidimensional Iber [16,17], que integra una herramienta para realizar de formación de

la brecha y el cálculo hidráulico teniendo en cuenta el transporte de sedimentos (fondo móvil) [18–20]. Posteriormente, este hidrograma alimentó el modelo unidimensional Hec-Ras [21]. El estudio de clasificación de la presa se llevó a cabo empleando la metodología tradicional (fondo fijo) y la metodología propuesta (fondo móvil), a fin de poderlas comparar.

Caso de estudio

La presa a clasificar se sitúa, de manera oblicua al flujo, en un pequeño meandro en el tramo medio del

río Llobregat, en el noreste de la Península Ibérica (Figura 2). La presa, construida a finales del siglo XIX para obtener energía para una colonia industrial, actualmente eleva la lámina de agua para alimentar un canal (Figura 3a) y generar energía hidroeléctrica mediante una mini-central.

La estructura está construida de un solo bloque de hormigón. Presenta una planta ligeramente curvada (70 m), con un alzado de altura variable y 5,25 m - altura máxima de (Figura 3c), por tanto debe ser clasificada. No presenta órganos de desagüe más allá de un pequeño vertedero en la margen izquierda.

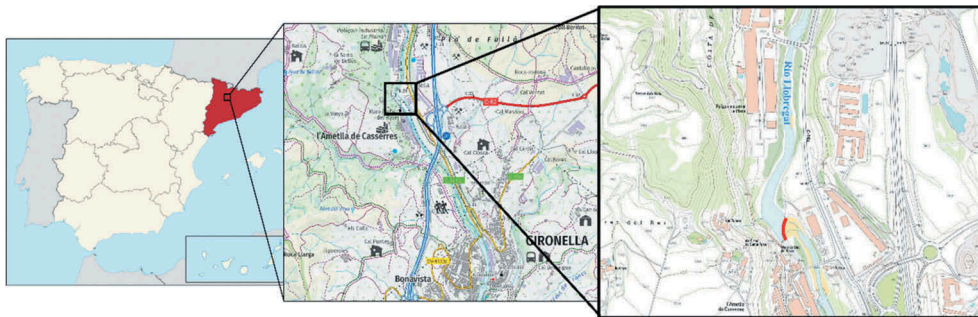


Figura 2. Ubicación de la presa estudiada. En rojo se muestra la alineación en planta de la presa (Fuente: ICGC).

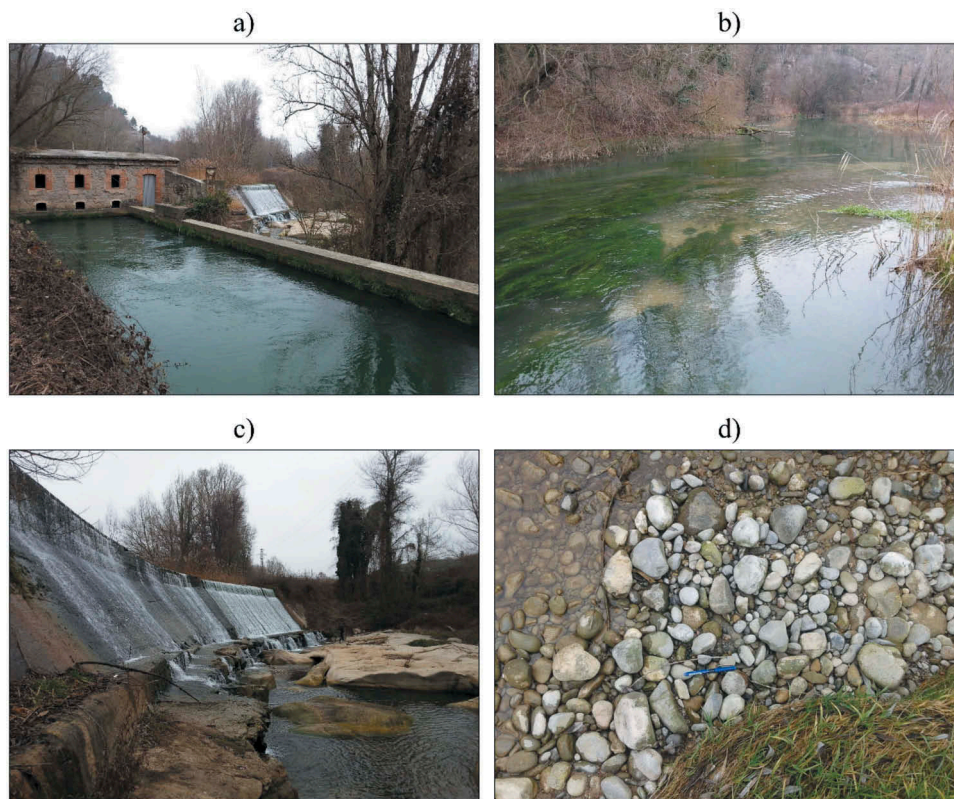


Figura 3. Detalle del estado actual de la presa: (a) canal de entrega de la mini-central; (b) estado de sedimentación en el embalse; (c) cuerpo de presa (órgano de desagüe situado en la margen izquierda y descalce de los cimientos) y (d) tamaño del sedimento situado aguas abajo.

Su construcción, previa a la del embalse de La Baells (1976), ha propiciado la acumulación de sedimentos en el embalse (Figura 3b). Asimismo, se aprecia la ausencia de sedimentos aguas abajo del cuerpo de presa (Figura 3c), quedando al descubierto parte de la cimentación y el lecho rocoso. Ello indica que la dinámica sedimentaria ha sido importante para los caudales que se producen en la zona, ya sea por escorrentía o por desembalse desde La Baells.

El vaso del embalse se encuentra prácticamente aterrado de sedimentos (Figura 3b). El fondo del embalse se sitúa entre 0,5 y 1 m por debajo de la cota de coronación. Teniendo en cuenta que el lecho rocoso se encuentra a pocos metros por debajo de la cimentación (Figura 3c), la altura de sedimentos podría alcanzar en algunas zonas los 4,5 metros de profundidad (no existe una batimetría previa a la construcción de la presa).

La extensión del modelo de inundación tras la rotura se extrajo de los mapas de inundabilidad existentes en la zona [22], teniendo en cuenta afecciones a zonas sensibles para el caudal de periodo de retorno de 500 años. El tramo resultante fue de 12 km, desde la cola del embalse hasta el azud de Cal Ponts (Puig-Reig), e incorporó núcleos urbanos, infraestructuras de carácter básico (autopistas y carreteras) y zonas industriales.

Hidrograma tras la rotura

El hidrograma tras la rotura se obtuvo mediante el modelo numérico bidimensional Iber. La extensión del modelo fue aproximadamente de 1 km, desde la confluencia de la riera de Portella con el río Llobregat (900 m aguas arriba del cuerpo de presa) hasta el puente que da acceso a la antigua colonia industrial de l'Ametlla de Casserres (100 m aguas abajo del cuerpo de presa).

La topografía utilizada es una combinación del Modelo Digital del Terreno (MDT) de 5×5 m del Institut Cartogràfic i Geogràfic de Catalunya (ICGC) y las secciones empleadas en el modelo unidimensional para la realización del PGRI del río Llobregat [22]. La presa se incorporó manualmente en el modelo a partir de los datos geométricos. Para la discretización espacial se empleó una malla de cálculo de aproximadamente a 13.300 elementos triangulares, cuyo tamaño osciló entre 3 y 7 metros. Se utilizó una malla más densa en el embalse y en el cuerpo de presa para obtener mayor precisión en los resultados.

Se simularon los distintos escenarios descritos en la Figura 1, empleando el caudal correspondiente al periodo de retorno de 500 años ($Q_{500} = 937,2 \text{ m}^3/\text{s}$) como caudal de avenida. Las características de la brecha quedaron definidas según lo expuesto en la *Guía*

Técnica (Capítulo II, apartado 5.3). La rugosidad se definió constante e igual para todo el modelo con un valor del coeficiente de Manning de 0,044, en concordancia con lo expuesto en el PGRI del río Llobregat [22], aunque la existencia de macrófitos (Figura 3b) podría modificar dicho valor [23,24], así como los esfuerzos tensionales para el inicio del movimiento del sedimento [25].

Para el análisis con fondo móvil se utilizó el módulo de sedimentos de fondo de Iber [18]. La ecuación empleada para evaluar el transporte de sedimentos fue la desarrollada por Meyer-Peter y Müller [26], con la posterior redefinición de Wong y Parker [27]. Según lo observado (Figura 3), el sedimento se compone de arenas aguas arriba de la presa y de gravillas aguas abajo de la presa. Los parámetros del sedimento utilizados fueron: $D_{50} = 0,03$ m, porosidad de 0,4 y ángulo de fricción interna de 0,55. Se definió la posición de la roca a la cota del terreno aguas abajo de la presa (Figura 3c), donde la roca del lecho aflora.

La simulación se realizó alimentando inicialmente el modelo con el caudal de diseño constante (Q_{500}) desde la cola del embalse. Una vez alcanzado el régimen estacionario, se habilitó la formación de la brecha y el módulo de transporte de sedimentos. También se analizó la situación con fondo fijo para su posterior comparación. Los hidrogramas obtenidos para el escenario de rotura de presa en situación de avenida se utilizaron como condición de entrada en el modelo hidráulico para el análisis de la propagación aguas abajo.

Propagación del hidrograma

La simulación de la propagación de los hidrogramas correspondientes a los distintos escenarios se llevó a cabo mediante el modelo numérico unidimensional Hec-Ras. La elección de este modelo frente a otros vino motivada por la existencia previa de un modelo hidráulico completo realizado por la Agència Catalana del Aigua (ACA) dentro del PGRI del río Llobregat [22]. Este modelo incluye el curso alto y medio del río, así como arroyos de importancia. El modelo, que fue adaptado a las necesidades del estudio (desde la presa hasta la localidad de Puig-Reig), incorpora 12 puentes y 11 azudes y pequeñas presas en el tramo de estudio de 12 km.

Se analizaron los tres escenarios descritos por la *Guía Técnica* (Capítulo II, apartado 5.2). Los escenarios que contemplan la rotura de la presa (con y sin avenida) fueron calculados en régimen variable, y se alimentaron con los hidrogramas obtenidos con el modelo Iber: por un lado los obtenidos mediante la metodología clásica (fondo fijo) y por otro los obtenidos mediante la

metodología propuesta (fondo móvil). Finalmente se simuló la situación en avenida sin rotura de presa a fin de evaluar los daños incrementales que ésta provoca (régimen permanente).

Clasificación de la presa

La clasificación de la presa, considerada como ‘pequeña presa’, se llevó a cabo bajo las recomendaciones de la *Guía Técnica*, tanto con fondo fijo como móvil. El proceso de clasificación se detalla en el Capítulo III, apartado 4. La evaluación de daños puede realizarse de manera cualitativa, si la clasificación de la presa es obvia, o cuantitativa, a partir de variables hidráulicas. En el caso de estudio se optó por una determinación de los efectos de la rotura de forma cuantitativa.

Resultados

Hidrograma tras la rotura

La formación de la brecha se fijó en 10 minutos, por tratarse de una presa de gravedad, siendo el ancho de la

brecha de 23,3 m (1/3 de la longitud de coronación). La malla de cálculo evolucionó reduciendo la cota progresivamente desde coronación hasta el lecho del río. Las consecuencias hidráulicas de este fenómeno son la creación de una vía de flujo preferente donde el campo de velocidades y el calado se incrementan (Figura 4), provocando la movilización de sedimentos. Este efecto fue más acusado en situación de rotura con avenida considerando el fondo móvil (Figura 4).

La sucesión de imágenes que se muestra en la Figura 5 permiten observar la evolución del lecho del río a lo largo de la simulación (7 horas). Se consideró el inicio de la formación de la brecha como el instante inicial para la evaluación de los resultados (t_{0h}). Durante la primera hora de simulación (de t_{-1h} a t_{0h}) no existió transporte de sedimentos, y sirvió para la obtención del régimen estacionario. Una vez iniciada la formación de la brecha (t_{0h}) se activó el módulo de transporte de sedimentos, lo que provocó variaciones importantes en el cauce del río. En los 10 primeros minutos (t_{+10m}), tiempo equivalente al de la formación de la brecha, se superaron los 4 metros de erosión

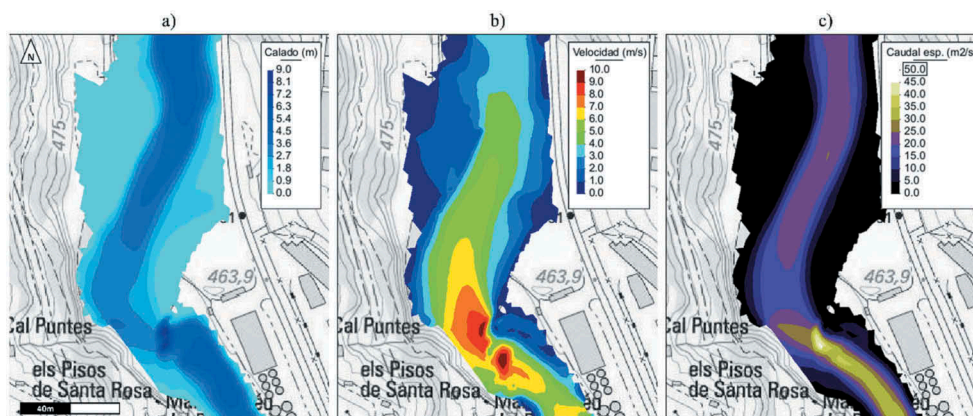


Figura 4. Mapa de calados (a), velocidades (b) y caudal específico (c) quince minutos después de iniciarse la formación de la brecha.

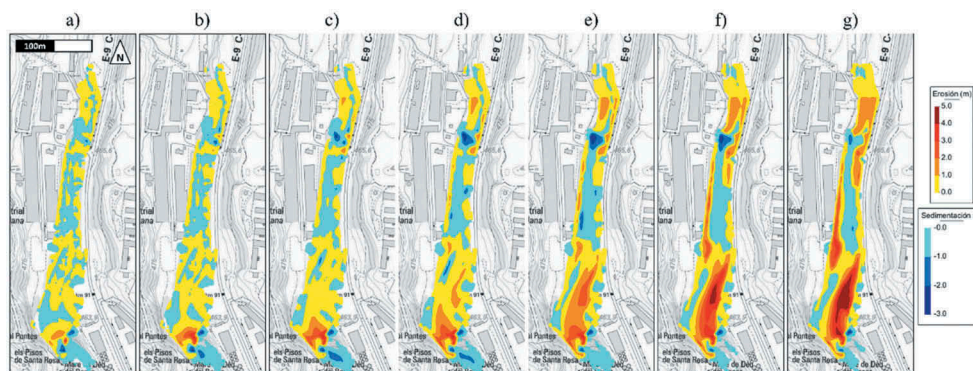


Figura 5. Evolución del lecho en el embalse. Mapa de erosión (+) y sedimentación (–) para los tiempos (a) +5 min, (b) +10 min, (c) +30 min, (d) +1 h, (e) +2 h, (f) +4 h y (g) +6 h sucedidos tras la rotura de la presa.

(Figura 5b) aguas arriba de la presa. La erosión obtenida fue progresiva y avanzó hacia aguas arriba. Para tiempos de simulación grandes (t_{+6h}) se puede observar que el lecho del río ha alcanzado el equilibrio (Figura 5g). El sedimento movilizado del embalse se depositó aguas abajo de la presa (Figura 5b, c, d, e). Al final de la simulación se observa la existencia de una gran zona de erosión en la margen izquierda del río aguas arriba de la presa (colores cálidos) y pequeñas zonas de sedimentación en el centro del embalse y aguas abajo de la presa (colores fríos), a ambos lados de la brecha (Figura 5g). La mayoría del sedimento se movilizó hacia aguas abajo.

La exigua capacidad del embalse en la situación actual condujo a hidrogramas post-rotura de escasa relevancia, con un caudal pico alrededor de $25 \text{ m}^3/\text{s}$ por encima del Q_{500} con la metodología clásica (fondo fijo). El hidrograma tras la rotura con mayor significancia para el estudio de clasificación de la presa se dio para el escenario con avenida empleando la metodología propuesta (fondo móvil). En este caso el caudal fue de $64,8 \text{ m}^3/\text{s}$ por encima del caudal de 500 años de periodo de retorno, lo que supuso un incremento del 4,1 % con respecto a la situación con fondo fijo y tuvo una duración de entre 10 y 15 minutos mayor (Figura 6).

Propagación del hidrograma

Según el PGRI, la Máxima Crecida Ordinaria (MCO) es de $59 \text{ m}^3/\text{s}$. Para caudales inferiores al MCO no se producen daños de consideración [22]. De los escenarios de cálculo analizados, tan solo el hidrograma obtenido según la metodología propuesta (fondo móvil) fue ligeramente superior a la MCO. Por este motivo, tan solo se analizaron los daños incrementales debidos a la rotura de la presa en situación de avenida con

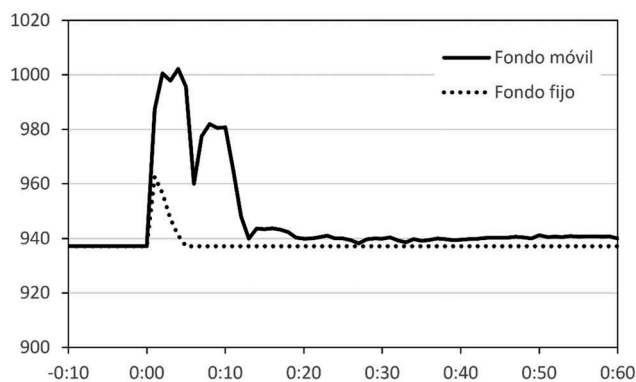


Figura 6. Comparativa del hidrograma tras la rotura considerando fondo móvil (línea sólida) y fondo fijo (línea punteada).

fondo móvil (Escenario 2) frente a la situación de avenida sin rotura (Escenario 3).

El Escenario 2 se realizó en régimen variable. Para poder comparar los resultados con el Escenario 3, realizado en régimen permanente, se ajustaron los parámetros del modelo para que la inundación con un caudal de 500 años de periodo de retorno fuese similar a la calculada en régimen variable.

La propagación del frente de onda provocado por la rotura de la presa (Escenario 2) generó una sobreelevación de la lámina de agua de 0,4 m en el tramo comprendido entre la presa y el puente que da acceso a l'Ametlla de Casserres (Figura 7). Este puente propició un 'efecto presa', inundando algunas zonas aguas arriba del mismo y regulando el caudal hacia aguas abajo. Las sobreelevaciones desde este puente hasta el final del tramo de estudio fueron inferiores a 0,07 m, y no supusieron un incremento en los niveles de riesgo. Cabe destacar que el puente de la Av. de Catalunya (en la localidad de Gironella) presenta un comportamiento hidráulico distinto en régimen permanente y en régimen variable. La diferencia de cota entre aguas arriba y aguas abajo de este puente fue de 0,01 m, de modo que la entrada en carga del mismo (Figura 7, Puente Av. de Catalunya) es atribuible al tratamiento interno de las ecuaciones de flujo a través de puentes con los dos módulos de cálculo que emplea Hec-Ras [28]. Por lo tanto, no se consideró como un daño incremental.

Clasificación de la presa

Con el objetivo de clasificar la presa en función del riesgo potencial, se evaluaron los daños incrementales dividiendo la zona de estudio en dos subtramos. El primero, definido desde la presa hasta el puente de acceso a l'Ametlla de Casserres (Figura 2), y el segundo, desde este punto hasta el final del tramo de estudio (Puig-Reig).

El incremento de la lámina de agua de 0,4 m en el primer tramo afectaría a edificaciones situadas en la margen derecha del río. Sin embargo, estos edificios ya se encontrarían inundados con unos niveles muy similares bajo la avenida de 500 años de periodo de retorno, de modo que no existirían daños incrementales. En el segundo tramo, a excepción de la sobreelevación provocada por el puente de la Av. de Catalunya (Figura 7), no se apreció la inundación de nuevas zonas sujetas a ser tenidas en cuenta para el análisis de daños.

El análisis de la metodología clásica (fondo fijo) arrojó resultados de menor envergadura, tanto en los niveles de agua como en la extensión de la mancha de inundación. Por el contrario, la metodología propuesta,

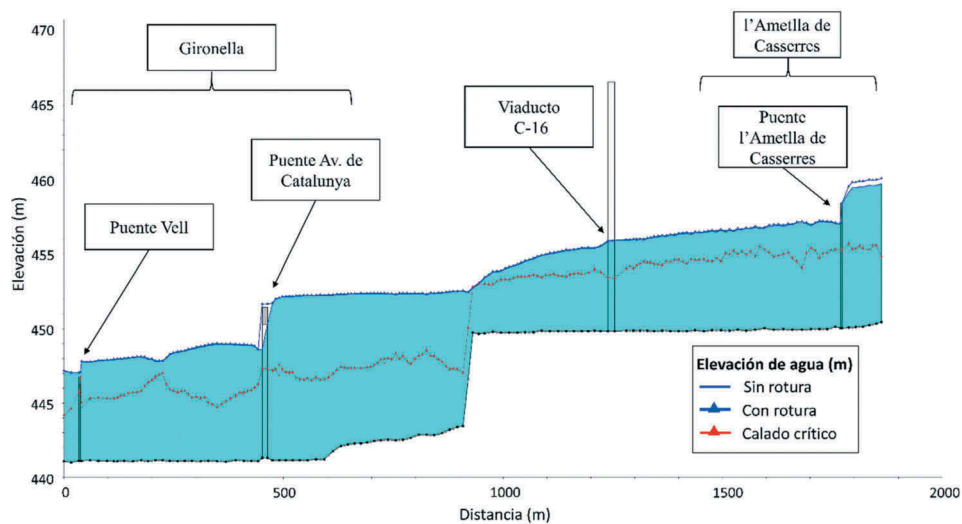


Figura 7. Perfil longitudinal del río Llobregat para la inundación de periodo de retorno de 500 años (línea azul con superficie coloreada) y rotura de la presa (línea azul con marcador). Tramo comprendido entre el pie de presa y la localidad de Gironella. Las franjas verticales representan estructuras situadas en el cauce (puentes y viaductos).

que considera el fondo móvil en el embalse, generó un caudal de rotura superior. Ello originó una mancha de inundación superior, afectando a nuevas zonas (sobre todo en los primeros metros). A pesar de ello, en ambos supuestos la clasificación de la presa resultó ser de tipo C.

Discusión

Con el objetivo de proporcionar orientaciones para la adecuada clasificación de presas a partir de los documentos legales BOE-A-1996-7319 [5] y BOE-A-1995-3865 [6], el Ministerio de Medio Ambiente, a través de la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas, publicó las recomendaciones que se plasman en la *Guía Técnica* [7]. Este documento tiene como fin definir las bases técnicas para el análisis de la rotura de grandes presas. Sin embargo, en dicho documento existen aspectos relevantes que pueden estar sujetos a interpretación, por lo que algunos Organismos de Cuenca han elaborado información adicional para facilitar su aplicación. Este es el caso de la ACA con el documento '*Criteris d'interpretació de la Guia Tècnica de Classificació de preses en funció del risc potencial*' [29].

La *Guía Técnica* es aplicable para diferentes tipologías de presas (gravedad, contrafuertes, bóveda y materiales sueltos). Para cada una de ellas se describe el tipo de rotura y las características de la brecha mediante fórmulas y criterios, ofreciendo cierta libertad en el caso de presas 'rígidas' (gravedad, contrafuertes

y bóveda). Las dimensiones de la brecha sirven para definir el hidrograma tras la rotura, ya sea de manera teórica (para alimentar modelos numéricos o conceptuales) o directamente a través de modelos numéricos. Debido a la falta de normativa técnica alternativa al respecto, la *Guía Técnica* se ha adoptado como norma de referencia para la clasificación de balsas y pequeñas presas (entre 5 y 15 m de altura o más de 100.000 m³). En este tipo de obras, los mecanismos de formación de la brecha pueden diferir (p.ej. rotura por tubificación, deslizamiento de taludes, licuación, erosión por rebosamiento, etc.), así como los tiempos de formación de la brecha y dimensiones de la brecha, por lo que sería conveniente estudiarlos e incluirlos de forma específica en la normativa. Además, los niveles de aterramiento pueden ser no menospreciables, sobre todo para el gran número de pequeñas presas que deben clasificarse. A pesar de todo ello, en el marco de trabajo definido por la *Guía Técnica* existe cierta libertad para adaptar la metodología descrita a cada caso de estudio, siempre que sea debidamente justificada (*Guía Técnica*. Capítulo III, apartado 1).

Teniendo en cuenta lo anterior, el análisis de rotura de presas en ríos se puede enfocar desde dos puntos de vista muy distintos: el estudio en situación original (sin aterramiento) o el estudio en situación actual (con aterramiento). Sin embargo, la *Guía Técnica* no especifica, ni tampoco las legislaciones mencionadas anteriormente, cuál de estas situaciones debe estudiarse, en qué casos escoger un escenario en detrimento del otro (*Guía Técnica*. Capítulo II, apartado 6.1) o cómo

proceder en caso de que el aterramiento sea no menos apreciable. La *Guía Técnica* indica que se deben realizar los estudios considerando fondo fijo tan solo aguas abajo de la presa, dejando un vacío en lo referente al sedimento sujeto a moverse dentro del embalse (*Guía Técnica*. Capítulo II, apartado 5.4.1 y 5.4.3).

Es previsible que existan diferencias entre ambas hipótesis (sin y con aterramiento). Por un lado, la acumulación de sedimentos en el embalse reducirá el volumen del embalse (V), siendo ésta una de las principales variables para el cálculo de los tiempos de formación (T) y anchos (B) de la brecha en el caso de presas de materiales sueltos. En este sentido, en pequeñas presas de gravedad, los tiempos de formación de la brecha pueden estar muy por debajo de los indicados (del orden de pocos segundos), por lo que se estaría subestimando el hidrograma tras la rotura. Por otro lado, la movilización de sedimentos dentro del embalse puede dar lugar, en función de la hipótesis analizada, a un incremento puntual de la capacidad de almacenamiento que, en función del tiempo de formación de la brecha, puede ocasionar un mayor volumen de vertido (hidrograma tras la rotura).

Asimismo, aunque la consideración de transporte de sedimentos en los estudios de clasificación de presas no es tenida en cuenta por las normativas actuales, su consideración en este tipo de estudios se encuentra en sintonía con la metodología expuesta en la *Guía Técnica* (Capítulo III, apartado 5). En este sentido, cabe destacar que los modelos hidráulicos que permiten evaluar el transporte de sedimentos lo hacen, en general, mediante formulaciones empíricas. Estas formulaciones han sido obtenidas bajo condiciones muy específicas (granulometría uniforme, caudal constante, geometrías simples, etc.), y que son muy distintas a las de un lecho de río. La elección de una u otra formulación puede dar resultados sensiblemente diferentes [30] y, en cualquier caso, resulta necesaria la realización de una campaña experimental para determinar las características del sedimento. Tan solo de este modo se podría realizar la calibración y validación del modelo numérico, y por tanto asegurar la fiabilidad de los resultados.

En el caso de estudio, para los parámetros escogidos, los resultados indican que se puede producir una considerable movilización de sedimentos (se estima un volumen movilizado superior a 1200 m^3 durante la primera hora), principalmente durante el tiempo de incremento de caudales tras la rotura de la presa (alrededor de 500 m^3 para tiempos inferiores a 15 min). Este incremento puntual de la capacidad del embalse por la movilización de sedimentos provoca también un incremento en el caudal punta y en el volumen del hidrograma (Figura 6). Este fenómeno se producirá de una

manera más o menos acusada en función del tamaño de la presa, del caudal circulante por el río, la formulación de transporte de sedimentos empleada, el tamaño de partícula considerado y del tipo de rotura (rápida o lenta), así como el coeficiente de rugosidad del fondo escogido [24,31]. En el caso de estudio, la formulación de transporte de sedimentos de fondo empleada se encuentra del rango de aplicación del diámetro de partícula propuesto para las ecuaciones consideradas (0,002 a 0,03 m).

Conclusiones

Los estudios de rotura de presas con aterramiento considerando la movilización de los sedimentos acumulados no son contemplados, por el momento, por la legislación vigente ni por los documentos técnicos de referencia. Sin embargo, la *Guía Técnica* incorpora una cierta flexibilidad para el uso de metodologías alternativas a la hora de clasificar la presa en función del riesgo potencial, lo que permite, y en cierto punto propicia, el desarrollo de técnicas que consideren el efecto de los sedimentos.

En el presente documento se ha presentado una metodología para afrontar estudios de rotura de presas situadas en cursos fluviales, cuyo estado de aterramiento del embalse pueda condicionar el análisis hidráulico. La metodología se basa en la obtención del hidrograma tras la rotura considerando el fondo móvil aguas arriba de la presa, es decir, empleando formulaciones de transporte de sedimentos con el objetivo de conocer la evolución del lecho durante la formación de la brecha de rotura y su efecto en los hidrogramas generados.

Se pone en relieve la falta de recomendaciones al respecto, así como la necesidad de disponer de metodologías para cubrir este vacío con el fin de afrontar este tipo de estudios. La presente propuesta permite realizar un estudio de clasificación de presas aterradas considerando las particularidades de las mismas e incorporando los procesos físicos involucrados durante el proceso de formación de la brecha y la propagación del hidrograma. El método también se presenta como una alternativa adecuada para embalses cuyo nivel de aterramiento sea elevado o se desconozca la batimetría del vaso del embalse.

Esta nueva metodología se ha ilustrado mediante el estudio de clasificación de una pequeña presa cuyo nivel de aterramiento es superior al 75 %. Se estudió el hidrograma tras la rotura con el fondo fijo (metodología clásica) y con el fondo móvil (metodología propuesta). Los resultados obtenidos mediante la metodología propuesta (fondo móvil) muestran un incremento puntual en la capacidad de almacenamiento del embalse respecto

a la original. Consecuentemente se produjo un hidrograma con un caudal punta y duración mayores que con la metodología clásica (fondo fijo). En el caso de estudio, la clasificación de la presa, aun empleando la nueva metodología (fondo móvil), desembocó en la misma categoría que con la metodología clásica (fondo fijo).

Esta nueva metodología se presenta como una alternativa adecuada para el análisis de rotura de presas existentes cuyo nivel de aterramiento del embalse modifique considerablemente las características del mismo. Asimismo, nuevos retos se abren para los estudios de clasificación de presas con aterramiento, ya que se podría estimar el volumen de sedimentos movilizado, las zonas potenciales de erosión y sedimentación tras la rotura, así como los daños causados por arrastre y colisión del sedimento movilizado en personas, en bienes/inmuebles, en infraestructuras y en el medioambiente.

ORCID

Marcos Sanz-Ramos  <http://orcid.org/0000-0003-2534-0039>

Gonzalo Olivares Cerpa  <http://orcid.org/0000-0001-9649-0881>

Ernest Bladé i Castellet  <http://orcid.org/0000-0003-1770-3960>

Referencias

- [1] ISDR. Global assessment report on disaster risk reduction. Geneva: United Nations; 2009.
- [2] Kron W. Flood risk = hazard · values · vulnerability. *Water Int.* 2005;30:58–68.
- [3] DOUE-L-2007-82010. Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación. 2007.
- [4] BOE-A-2010-11184. Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación. 2010.
- [5] BOE-A-1996-7319. Orden de 12 de marzo de 1996 por la que se aprueba el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses. 1996.
- [6] BOE-A-1995-3865. Resolución de 31 de enero de 1995, de la Secretaría de Estado de interior, por la que se dispone la publicación del Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundación. 1995.
- [7] MMA. Clasificación de presas en Función del Riesgo Potencial - Guía Técnica. Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas; 1996.
- [8] BOE-A-2008-755. Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio

- Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril 2008.
- [9] Arbat-Bofill M, Bladé E, Sánchez-Juny M, et al. Suspended sediment dynamics of Ribarroja Reservoir (Ebro River, Spain). In: Schleiss AJ, et al., editors. *Reservoir Sedimentation*. CRC Press; 2014. p. 99–107.
 - [10] Palau A, Batalla RJ, Rosico E, et al. Management of water level and design of flushing floods for environmental river maintenance downstream of the Riba-Roja reservoir (lower Ebro River. NE Spain). In: *Proc. HYDRO 2004, A New Era for Hydropower*; 2004 Oct 18 –20;Porto, Portugal.
 - [11] Schleiss AJ, Franca MJ, Juez C, et al. Reservoir sedimentation. *J Hydraul Res.* 2016;54:595–614.
 - [12] Vericat D, Batalla RJ. Efectos de las presas en la dinámica fluvial del bajo Ebro. *Rev C&G.* 2004;18:37–50.
 - [13] Casamor J, Calafat A. El problema del aterramiento de embalses y el cálculo de las reservas hidráulicas. *Tierra y Tecnol.* 2018. doi:10.21028/jlc.2018.10.01.
 - [14] Martínez Salvador A, Conesa García C, García Lorenzo R, et al. Estimación de aportes sedimentarios a embalses de pequeñas cuencas mediterráneas mediante GeoWEPP. Ensayo en la cuenca vertiente del río Mula al embalse de la Cierva (cuenca del río Segura). *Limnetica.* 2015;34:41–56.
 - [15] Caballero FJ, Monteiro RM, Morán R, et al. Estudios de rotura de presas y balsas. El avance en las herramientas y técnicas disponibles para modelación de propagación de las avenidas y la asignatura pendiente de la rotura del dique. In: *Proc. Las IV Jornadas Ingeniería del Agua.* 2015 Oct 21–22;Córdoba.
 - [16] Bladé E, Cea L, Corestein G, et al. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Rev Int Métodos Numér Cálculo Diseño Ing.* 2014;30:1–10.
 - [17] Sanz-Ramos M, Bladé E, Palau A, et al. IberHABITAT: evaluación de la idoneidad del hábitat físico y del hábitat potencial útil para peces. Aplicación en el río Eume. Ribagua. 2019. doi:10.1080/23863781.2019.1664273.
 - [18] Corestein G, Bladé E. Validación del módulo de transporte de sedimentos de fondo - Modelo Iber. In: *III Jornadas Ingeniería del Agua: La Protección Contra Los Riesgos Hídricos. JIA 2013.* Valencia; 2013. p. 27–34. http://www.iberaula.es/Temas/DisplayTema?id_tema=673.
 - [19] Bladé E, Cea L, Corestein G. Modelización numérica de inundaciones fluviales. *Ing Agua.* 2014;18:68.
 - [20] Corestein G, Bladé E, Niñerola D. Modelling bedload transport for mixed flows in presence of a non-erodible bed layer. In: *River Flow 2014.* CRC Press; 2014. p. 1611–1618.
 - [21] Brunner GW. HEC-RAS. River Analysis System. Hydraulic Reference Manual (Version 4.1). 2008.
 - [22] ACA. Planificació de l'Espai Fluvial. Estudis d'inundabilitat en l'àmbit del projecte PEFCAT - Memòria específica Conca del Llobregat. 2009.
 - [23] Sanz-Ramos M, Bladé E, Palau A, et al. Estudio de la influencia de los macrófitos en la hidrodinámica de un río empleando simulación numérica 2D. In: *XIX Conf. Iber. Assoc. Limnol. Coimbra*; 2018.
 - [24] Sanz-Ramos M, Bladé E, Niñerola D, et al. Evaluación numérico-experimental del comportamiento histórico

- del coeficiente de rugosidad de los macrófitos. *Ing Agua*. 2018;22:109–124.
- [25] Sanz-Ramos M, Bladé E, Palau-Ibars A. Evaluación de las posibilidades de remoción de macrófitos mediante avenidas controladas. In: XI Jornadas Españolas Presas. León; 2018.
- [26] Meyer-Peter E, Müller R. Formulas for bed-load transport. In: IAHSR 2nd Meet. Stock. Append. 2. IAHR. 1948.
- [27] Wong M, Parker G. Reanalysis and correction of bed-load relation of Meyer-Peter and Müller using their own database. *J Hydraul Eng*. 2006;132:1159–1168.
- [28] Bladé E, Sánchez-Juny M, Sánchez HP, et al. Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable una visión a partir del modelo HEC-RAS. Edicions UPC; 2009. <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.3/36841#.WUKGQqeiwA.mendeley> (accessed 15 June 2017).
- [29] ACA. Criteris d'interpretació de la Guia tècnica de Classificació de preses en funció del risc potencial. Agència Catalana de l'Aigua, Generalitat de Catalunya; 2014.
- [30] Soares-Frazão S, Canelas R, Cao Z, et al. Dam-break flows over mobile beds: experiments and benchmark tests for numerical models. *J Hydraul Res*. 2012;50:364–375.
- [31] Bladé E, Sanz-Ramos M, Dolz J, et al. Modelling flood propagation in the service galleries of a nuclear power plant. *Nucl Eng Des*. 2019;352:110180.