

DISEÑO DE PLANES DE EMERGENCIA DE OBRAS HIDRÁULICAS ANTE SU RIESGO DE FALLO – TEORÍA Y CASO DE ESTUDIO

DESIGN OF EMERGENCY PLANS DUE TO THE FAILURE RISK OF HYDRAULIC WORKS – THEORY AND CASE STUDY

JUAN CAMILO OCHOA RIVERA

I.C., Doctor en Ingeniería Civil, Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, jcochoar@unal.edu.co

Recibido para revisar 28 de Abril de 2005, aceptado 29 de Agosto de 2005, versión final 1 de Octubre de 2005

RESUMEN: Aunque las presas hidráulicas son generalmente estructuras bastante seguras, no se encuentran exentas de un cierto riesgo de fallo, el cual varía a lo largo de la vida útil de la obra. Dado que ese riesgo existe y puede llegar a ser significativo, resulta conveniente analizar el posible colapso de este tipo de estructuras y valorar sus consecuencias. Esto ha de hacerse esencialmente con el fin de reducir los costos potenciales asociados al fallo, los cuales suelen deberse principalmente a la pérdida de vidas humanas y bienes materiales. Una forma de minimizar dicha pérdida consiste en diseñar e implantar Planes de Emergencia que permitan adoptar medidas efectivas de protección de personas y bienes. En este artículo se describe la base técnica y la estructura de un marco metodológico para la elaboración de dichos Planes de Emergencia, y se presenta, con propósitos ilustrativos, una síntesis del Plan diseñado para una presa en España.

PALABRAS CLAVE: Presas, Planes de emergencia, modelamiento de colapso de presas, FLDWAV

ABSTRACT: Dams are built to be highly safe hydraulic works. Nevertheless, they are not exempt from a certain failure risk, which turns in a variable value along the time service of the dam. As the mentioned dam-failure risk can be a significant hazard, analysis on dam-break is becoming important, as same as the assessment of its consequences. This type of studies are intended to reduce the costs linked to dam-failure, which are mainly due to the losses of human beings and material goods. A suitable way to minimize such losses consists of designing Emergency Plans, which permit to prepare and implant appropriate protection measures. A methodological framework to carry out this kind of Emergency Plans is introduced in this paper, accompanied by a case study corresponding to an Emergency Plan of a Spanish dam.

KEYWORDS: Dam-breach, emergency plans, dambreak modeling, FLDWAV.

INTRODUCCIÓN

La rotura de presas se ha convertido en las últimas cuatro décadas en una materia de investigación que tiene cada vez mayor auge, debido a la relevancia de sus implicaciones en campos como la planificación de protección civil, la gestión de presas basada en riesgo, y el diseño de programas de ordenamiento territorial. La importancia del estudio del riesgo de fallo se evidencia al notar que durante el siglo XX se presentó el colapso de 123 *grandes presas*, la mitad de las cuales fallaron en las últimas cinco décadas. De

ese total, el 80% no superaban los 36 años de edad y la mitad no tenían más de 4 años de servicio (Comité Español de Grandes Presas, 1996).

Froehlich (1995) reporta 22 casos de rotura de presas en Estados Unidos, de los cuales 12 fallos se producen con posterioridad a 1960, y son ocasionados en su mayoría por el rebosamiento del embalse y la erosión interna del cuerpo de la presa. Un estudio de naturaleza similar (Wahl, 1998a) presenta un catálogo de 108 roturas de presas, y aunque la mayoría de ellas tienen lugar en Estados Unidos, también se incluyen casos de

otros países como Inglaterra, Argentina, Canadá, India, Brasil o Alemania. En esta misma línea de estudio, Graham (1998) analiza el colapso de 8 presas en Estados Unidos, haciendo énfasis en las afecciones ocasionadas a las vidas humanas, las cuales se traducen en un total de 3300 muertos, 3800 heridos y 4750 damnificados.

Casi todos los trabajos antes citados plantean la necesidad de profundizar en el estudio de los procesos de formación de la rotura, con el fin de establecer medidas que reduzcan el riesgo de la misma e implantar estrategias que minimicen los efectos catastróficos del colapso de la presa. De hecho, algunos autores destacan la importancia de conocer las zonas potencialmente inundables por la rotura, para adoptar tiempos de alerta a la población basados en la estimación del avance de la onda de flujo. Es así como Costa (1985) anota que cuando se dispone de tiempos de alerta temprana para aviso a la población, el número de víctimas mortales puede ser 19 veces inferior al que se tendría cuando no hay aviso. Brown y Graham (1988) señalan, a partir de un estudio basado en eventos reales de rotura, que la pérdida de vidas humanas puede pasar de un 0.02% de la población bajo riesgo, cuando los tiempos de alerta son de 90 minutos, hasta un 50%, cuando dichos tiempos son inferiores a 15 minutos.

Dichos análisis de sensibilidad se corresponden con resultados de estudios análogos, como el realizado por Dekay y McClelland (1991), quienes también destacan la eficacia en la reducción de víctimas humanas que se obtiene al implementar sistemas de alerta temprana a la población, con umbrales temporales suficientemente holgados.

Conscientes de la necesidad de proteger a la población localizada en zonas de riesgo de rotura de presas, varios países han desarrollado programas de acción, normas y marcos legislativos, que tienen como fin el diseño e implantación de planes de emergencia. En particular, España aprobó en 1995 la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones (MIR, 1995), y un año más tarde, el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses (MMA, 1996a), normas que obligan a los titulares de presas a elaborar estudios de

seguridad enfocados al diseño e implantación de planes de emergencia.

Partiendo de la experiencia española, en este artículo se presenta una metodología para la elaboración de planes de emergencia de presas ante su riesgo de rotura. Para ello, inicialmente se define el concepto de Plan de Emergencia y su objetivo, luego se presenta la estructura básica del Plan, después se describen los estudios de delimitación de la zona inundable, a continuación se expone el Plan de Emergencia de una presa localizada en el sureste de España, y por último se anotan algunas conclusiones a modo de síntesis.

1. CONCEPTO Y OBJETIVO DE UN PLAN DE EMERGENCIA

Un Plan de Emergencia es una herramienta con la cual se establecen las medidas, organización y recursos necesarios para proteger a la población, bienes materiales y elementos ambientales ante el riesgo de rotura o avería grave de una presa. La premisa que en última instancia justifica la existencia del Plan es la situación hipotética que consiste en la inundación de los terrenos aledaños al embalse y las zonas localizadas aguas abajo de la presa, debido a la rotura potencial de ésta.

Si bien el seguimiento y monitoreo continuo de las condiciones de seguridad de la presa constituyen un medio de control de posibles contingencias y forman parte esencial del Plan, éste debe estar concebido para enfrentar satisfactoriamente los efectos de la contingencia máxima de la presa: su rotura.

En consecuencia, el objetivo fundamental del Plan es minimizar las pérdidas que pueda ocasionar el colapso de la presa, siendo la preservación de las vidas humanas el elemento primordial. En esa dirección se deben enmarcar las dos fases en las que normalmente se divide un Plan: 1) elaboración de estudios técnicos y redacción de la memoria; 2) implantación física del Plan.

El presente artículo se centra en la primera de las dos fases antes citadas, con especial énfasis en los estudios técnicos de rotura y estimación de

afecciones potenciales, ya que estos dos aspectos son los que determinan la esencia del Plan.

2. ESTRUCTURA BÁSICA DEL PLAN

El contenido básico del Plan de Emergencia se puede desglosar en los siguientes capítulos:

- Análisis de la seguridad de la presa.
- Normas de actuación.
- Recursos humanos y materiales.
- Organización del Plan.
- Área inundable y afecciones.

El último capítulo se describe de forma más detallada en el Apartado 3, dada su importancia dentro del Plan de Emergencia.

2.1 ANÁLISIS DE LA SEGURIDAD DE LA PRESA

Este capítulo del Plan se estructura a partir de los siguientes aspectos: 1) definición de escenarios de emergencia; 2) fenómenos que pueden significar la declaración de un escenario de emergencia; 3) establecimiento de indicadores de esos fenómenos y definición de valores umbrales para los indicadores.

2.1.1 Escenarios de emergencia. La definición de distintos escenarios de emergencia permite llevar a cabo un control gradual de la evolución del estado de seguridad de la presa, con el fin de adoptar en cada momento las actuaciones más apropiadas para la preservación de la misma. Además del *estado de normalidad*, en el cual no hay señales de ningún riesgo significativo en la presa, se definen cuatro escenarios, de la siguiente forma (MIR, 1995):

- *Escenario de control de la seguridad o Escenario 0.* Las condiciones existentes y las previsiones aconsejan una intensificación de la vigilancia y el control de la presa, no requiriéndose la puesta en práctica de medidas de intervención para la reducción del riesgo.
- *Escenario de aplicación de medidas correctoras o Escenario 1.* Se han producido acontecimientos que, de no aplicarse medidas de corrección (medidas técnicas, medidas de explotación, desembalses, etc.), podrían ocasionar peligro de avería grave o de rotura de la presa, si bien la

situación puede solucionarse con seguridad mediante la aplicación de las medidas previstas y los medios disponibles.

- *Escenario excepcional o Escenario 2.* Existe peligro de rotura o avería grave de la presa y no es posible asegurar con certeza que pueda ser controlado mediante la aplicación de las medidas y medios disponibles.
- *Escenario límite o Escenario 3.* La probabilidad de rotura de la presa es elevada o dicha rotura ya ha comenzado, resultando prácticamente inevitable la formación de la onda de flujo.

En la operación diaria de la presa siempre se ha de saber si ésta se encuentra en estado de normalidad o dentro de algún escenario de emergencia. Éste se declarará cuando se detecte algún fenómeno que ponga en riesgo la integridad de la presa.

2.1.2 Fenómenos desencadenantes de situaciones de emergencia. Los *fenómenos desencadenantes* son procesos que pueden originar una disminución tangible de las condiciones normales de seguridad de la presa. Aunque la casuística a este respecto es muy amplia y depende en gran medida del tipo de presa, de su configuración física, y de las condiciones de su entorno, hay algunos fenómenos desencadenantes de carácter general (MMA, 2001):

- Deformaciones del cuerpo de la presa.
- Asentamientos de la cimentación.
- Humedades, filtraciones, fugas de agua.
- Fisuras, erosión interna, fracturación.
- Erosión y cavitación hidráulica.
- Fallas en equipos mecánicos y eléctricos.
- Crecidas, sismos, deslizamientos.
- Rotura de presas situadas aguas arriba.
- Actos de vandalismo y sabotaje.

Es recomendable que la presa disponga de un listado de todos los posibles fenómenos desencadenantes de situaciones de emergencia, así como de sus *indicadores*.

2.1.3 Indicadores de los fenómenos desencadenantes y sus umbrales. Los *indicadores* son parámetros relacionados directamente con el

fenómeno desencadenante, que sirven para conocer la intensidad o magnitud del mismo. Por ello es recomendable que los indicadores sean – en lo posible– cuantificables, ya que de su valor dependerá la existencia o no de un estado de emergencia y la gravedad de ésta. Por ejemplo, para un fenómeno desencadenante como las crecidas, un indicador podría ser el caudal de entrada al embalse; para los asentamientos del suelo de cimentación, dos posibles indicadores serían el giro y el desplazamiento de las juntas del cuerpo de la presa.

A cada indicador se le deben definir unos *umbrales*, es decir, valores críticos dentro del rango de variación del indicador. Los umbrales sirven para declarar el estado de normalidad y la entrada en cada escenario de emergencia. Dado que existe un estado de normalidad y cuatro escenarios de emergencia, habrá para cada indicador un conjunto de cuatro umbrales: un valor inferior, dos valores intermedios y un valor superior, tomados del intervalo de posibles valores del indicador.

Después de tener definidos todos fenómenos desencadenantes de la presa y sus respectivos indicadores, se establecen los umbrales de éstos. Para ello se correlaciona el comportamiento histórico de la presa con los correspondientes valores históricos y/o probables del indicador. De esta forma, cuando se detecte la presencia de un fenómeno desencadenante, se toma nota del valor de su indicador asociado, dicho valor se refiere a los respectivos umbrales, y consecuentemente se declara el escenario de emergencia que corresponda o el estado de normalidad.

2.2 NORMAS DE ACTUACIÓN

La declaración de un escenario de emergencia o del estado de normalidad se hace con el fin de saber qué tipo de acciones han de aplicarse sobre la presa para mantener o recuperar sus condiciones de seguridad o para minimizar los posibles daños que ocasione su rotura o avería. Dichas acciones, denominadas *normas de actuación*, son de distinto tipo según la presa se encuentre en estado de normalidad o en un escenario de emergencia:

- *Normas de vigilancia y control.* Son actuaciones rutinarias dentro de la operación normal de la presa. También se aplican en el Escenario 0, pero con mayor intensidad y acompañadas de la inspección detallada de los indicadores.
- *Normas de prevención y corrección.* Se adoptan generalmente dentro del Escenario 1, con el fin de solucionar las anomalías asociadas a los indicadores y eliminar cualquier riesgo de rotura o avería de la presa.
- *Normas de información y comunicación.* Se refieren a los contactos que se deben establecer entre el personal encargado de la explotación de la presa y los organismos que pueden llegar involucrarse en la gestión de una emergencia (gobierno, policía, Cruz Roja, Defensa Civil, etc.).

Las normas de actuación de la presa deben quedar claramente definidas en función de los fenómenos desencadenantes y de los valores de sus indicadores asociados. Para llevarlas a cabo debe disponerse de un conjunto de recursos, cuya descripción, disponibilidad y localización han de especificarse en el Plan de Emergencia.

2.3 RECURSOS HUMANOS Y MATERIALES

Los recursos humanos y materiales constituyen la base logística para la ejecución de las distintas normas de actuación. En términos generales, los siguientes son los recursos básicos con los que debe contar la presa para poner en marcha el Plan de Emergencia:

- *Equipo humano.* Personal técnicamente idóneo para realizar y supervisar la ejecución de los distintos tipos de actuaciones. Este equipo debe estar conformado, como mínimo, por un Director del Plan de Emergencia, dos o tres Miembros Adjuntos al Director para labores de coordinación y supervisión, tres Áreas Técnicas (obra civil, equipo mecánico y sistemas eléctricos) para trabajos en campo, y Asesores Expertos, que intervengan ocasionalmente en situaciones críticas de alto nivel técnico.
- *Materiales y herramientas.* Son todos aquellos elementos necesarios para aplicar las actuaciones de vigilancia, control, inspección, prevención y corrección: instrumentos de medida y auscultación, maquinaria liviana y pesada, herramienta manual y automática, medios de

transporte y movilización de materiales y personal, etc.

– *Sistema de comunicaciones.* Es el medio que posibilita el contacto con los organismos y el personal implicado en la gestión de la emergencia. Debe cumplir las siguientes condiciones: 1) ser totalmente fiable; 2) ser redundante, lo que implica disponer, como mínimo, de un sistema principal y otro de reserva; 3) estar permanentemente disponible.

– *Sistema de alerta a la población.* Su finalidad exclusiva es la de facilitar la autoprotección a la población que habita la zona de riesgo de inundación por rotura de la presa. Debe cumplir las siguientes condiciones: 1) disponer de señal luminosa y acústica; 2) ser autointerpretable por la población; 3) ser claramente diferenciable de cualquier otro tipo de señal; 4) estar constantemente preparado para funcionar.

– *Sala de emergencia.* Es la edificación desde la cual se gestiona la emergencia. Ha de cumplir las siguientes condiciones: 1) estar cerca de la presa fuera de la zona de riesgo de inundación; 2) disponer de los sistemas de comunicación necesarios; 3) disponer del mecanismo de activación del sistema de alerta a la población; 4) el acceso a ella debe estar garantizado en cualquier instante; 5) contar con el espacio suficiente para albergar los recursos humanos y materiales que se precisen durante la gestión de la emergencia.

2.4 ORGANIZACIÓN DEL PLAN

Los recursos y medios disponibles para el Plan deben modularse dentro de un esquema organizacional específico, definido con el fin de que la ejecución del Plan sea óptima. Los criterios generales que deben regir la organización son los siguientes:

– *Unidad de mando.* La estructura organizativa debe estar encabezada por un Director del Plan que ha de coordinar toda la aplicación del mismo. Las relaciones de dependencia entre los miembros del equipo deben obedecer a una cadena de mando unívoca.

– *Definición de funciones.* Cada miembro del equipo del Plan ha de tener claras sus funciones, y conocer su grado de interrelación y dependencia con los demás miembros.

– *Esquemas de actuación.* Es conveniente que exista un diagrama general con las actuaciones

que deben acometerse en función de los fenómenos desencadenantes y sus indicadores asociados, para los distintos escenarios de emergencia.

– *Procedimientos de comunicación.* Debe existir un registro de los medios y procedimientos que han de aplicarse para llevar a cabo las comunicaciones entre los miembros del equipo del Plan y entre éstos y los organismos externos (gobierno, Cruz Roja, policía, Defensa Civil, etc.). Es conveniente que: 1) se definan los instrumentos de transmisión y recepción; 2) se estandaricen los textos de las comunicaciones; y 3) se indiquen las personas y organismos a contactar según cada situación de emergencia.

– *Ubicación de recursos.* Debe existir una relación clara de todos los recursos materiales propios y ajenos disponibles para la aplicación del Plan, con indicación de su localización específica. Igualmente es necesario que haya un listado con los nombres de todos los miembros del equipo del Plan, sus direcciones y teléfonos.

– *Formación y entrenamiento.* Una condición necesaria para alcanzar el éxito del Plan cuando éste se ponga en marcha, es el conocimiento del mismo por parte del personal. Ello sólo se logra mediante cursos y reuniones de formación dirigidos a los miembros del personal, para que éstos lo estudien hasta dominarlo íntegramente. Parte de esa formación consiste también en la realización de simulacros, que han de tener como finalidad: 1) registrar y analizar tiempos de reacción y actuación; 2) detectar problemas en la organización y los procedimientos.

– *Actualización del Plan.* El Plan debe modificarse como corresponda cuando se den cambios significativos en la conformación física de la presa y su entorno, en sus usos, en la normativa que rige los Planes, etc., con el fin de que el Plan se mantenga actualizado y acorde con la realidad.

3. ÁREA INUNDABLE Y AFECCIONES

La finalidad esencial del Plan de Emergencia es minimizar la pérdida de vidas humanas y bienes materiales. Para cumplir a cabalidad dicho objetivo es necesario implementar las normas de actuación del Escenario 3 (rotura inminente de la presa) con la máxima agilidad y precisión posibles, dado que es éste el escenario en el que las pérdidas son más probables.

Las normas de actuación del Escenario 3 están constituidas por el aviso a la población y su evacuación de la zona bajo riesgo, razón por la cual el Plan debe disponer de mapas de inundabilidad. En éstos se ha de plasmar la envolvente de los niveles máximos de la inundación ocasionada por la rotura de la presa, con los valores máximos estimados de los principales parámetros hidráulicos de la onda de flujo (caudales, profundidades, velocidades, anchos superficiales), y sus tiempos de avance. En dichos mapas también deben demarcarse los sitios potenciales de afección, presentando sus correspondientes valores de profundidad y velocidad de flujo. Todo ello implica llevar a cabo la modelación hidráulica de la rotura de la presa y del tránsito de la consecuente onda de flujo, para lo cual resulta necesario analizar distintas situaciones hipotéticas de rotura. Dentro de este proceso, un punto esencial es la estimación de las dimensiones y el tiempo de desarrollo de la *brecha*, cavidad cuyo origen y evolución da lugar a la rotura.

3.1 SITUACIONES HIPOTÉTICAS DE ROTURA

En general, puede ser suficiente considerar las siguientes tres situaciones como posibles escenarios de rotura de la presa, siendo necesario realizar la modelación hidráulica completa para cada una de ellas (MMA, 2001):

- *Rotura sin crecida.* Se asume que el embalse se encuentra en su *nivel máximo normal*, siendo las condiciones de desagüe las correspondientes a dicho nivel.
- *Rotura con crecida.* Se asume que la rotura se produce cuando llega una crecida al embalse y el nivel de éste coincide con la cota de coronación de la presa. La crecida que se selecciona para el análisis es la mayor de las dos siguientes: 1) la crecida que se ha empleado en el diseño del vertedero; 2) si existe una presa aguas arriba, la onda de flujo procedente de la rotura de dicha presa.
- *Rotura de compuertas.* Éste es un caso que sólo ha de considerarse cuando se tenga un vertedero con compuertas, para analizar la inundación y afecciones debidas a su avería. Se asume que el embalse se encuentra en el nivel máximo normal y que las compuertas fallan de forma

secuencial en un tiempo total inferior a 10 minutos.

Para cada situación hipotética se realiza la modelación hidráulica completa, ya que, en general, los resultados suelen diferir significativamente, de tal forma que el Plan de Emergencia contendrá el mapa de inundación y la estimación de afecciones para cada hipótesis de rotura.

3.2 MODELACIÓN HIDRÁULICA

La modelación hidráulica de la rotura de una presa consta de tres fases: 1) estimación de los parámetros de la brecha de rotura (dimensiones y tiempo de formación); 2) cálculo de la onda de flujo o hidrograma resultante de la rotura; y 3) tránsito de la onda de flujo aguas abajo de la presa.

Existen más de 25 modelos con algún tipo de capacidad para modelar el proceso rotura – tránsito de la onda (ICOLD, 1998), los cuales pueden agruparse en las siguientes categorías:

- *Modelos físicamente basados.* Estiman el desarrollo de la brecha y el hidrograma resultante de la rotura mediante ecuaciones de erosión basadas en principios de la Hidráulica, el transporte de sedimentos y la Mecánica de Suelos.
- *Modelos paramétricos.* Predicen la geometría de la brecha y su tiempo de formación con ecuaciones empíricas desarrolladas a partir de datos de casos reales de rotura. La evolución de la brecha se simula como proceso linealmente dependiente del tiempo, y el hidrograma de rotura se obtiene mediante ecuaciones de la Hidráulica.
- *Modelos empíricos.* Predicen directamente el caudal pico de la rotura, en función de datos como el volumen del embalse, la altura de la presa, etc., asumiendo una determinada forma para el hidrograma de rotura.

El modelo tradicionalmente más empleado ha sido el DAMBRK (Fread, 1977), que es un modelo al cual se le especifican las características geométricas de la brecha y su tiempo de desarrollo, así como la curva cota–área del embalse, la altura de la presa, y la morfometría del cauce aguas abajo. El modelo calcula el hidrograma resultante de la rotura y hace el tránsito del mis-

mo a lo largo del cauce, aplicando ecuaciones de régimen de flujo transitorio. Dicho modelo ha tenido sucesivas mejoras (Fread, 1984), y de él se ha derivado una versión reducida denominada SMPDBK (Wetmore y Fread, 1983). Este último modelo realiza los cálculos de forma más simplificada basándose en un conjunto de curvas tipificadas, que han sido deducidas a partir de múltiples simulaciones con el modelo DAMBRK. El modelo SMPDBK sólo es apto para casos en los que sea aceptable trabajar con poca precisión, dada la mayor incertidumbre de sus resultados (Westphal y Thompson, 1987). BREACH (Fread, 1988) es otro de los modelos de uso extensivo y que pertenece a la categoría de modelos físicamente basados; calcula la evolución de la brecha en presas de materiales sueltos mediante ecuaciones de sedimentos y de Hidráulica, aplicando leyes de Mecánica de Suelos.

En los últimos años ha empezado a abrirse camino el modelo FLDWAV (Fread y Lewis, 1998), siendo actualmente el de mayores prestaciones (Wahl, 1998b), ya que constituye una nueva versión ampliada de su predecesor, el modelo DAMBRK, en la que se han incorporado nuevas opciones de modelación, además de la utilidad FLDGRF para la visualización gráfica de resultados.

3.2.1 Modelo FLDWAV. FLDWAV (*Flood Wave Routing Model*) se basa en la resolución numérica de la ecuación de flujo unidimensional de Saint-Venant, acoplada a un sistema de ecuaciones que en conjunto hacen posible la simulación matemática de flujos rápidamente variados en cauces naturales. El sistema completo de ecuaciones se resuelve de forma iterativa a partir de un método implícito no-lineal de diferencias finitas. El modelo simula la rotura de una presa en función de su cota de coronación, curva cota-área de embalse, hidrograma de entrada al mismo, y caudales normales servidos por la presa. El modelador establece las características geométricas de la brecha (forma y dimensiones), su tiempo de desarrollo, el hidrograma de entrada al embalse y el nivel en éste al inicio de la rotura. Adicionalmente, al modelo se le debe especificar la geometría del cauce localizado aguas abajo de la presa, mediante secciones transversales.

FLDWAV dispone de opciones que permiten simular el comportamiento hidráulico de caudales de crecida en llanuras de inundación, estrechamientos, expansiones y sinuosidades del cauce. Tiene la capacidad de modelar regímenes de flujo enteramente subcrítico o supercrítico, así como la combinación de ambos, admitiendo la consideración de efectos de remanso debidos a estructuras de control hidráulico. Permite variar la rugosidad en función de la altura del flujo, del ancho de cada sección y de la longitud del cauce. Igualmente permite modelar redes dendríticas de ríos, caudales laterales en el cauce principal, pérdidas de volumen por infiltración o almacenamiento, zonas de flujo muerto por estancamiento, y diques laterales de confinamiento del flujo. Las principales limitaciones del modelo son: 1) la simulación del flujo es unidimensional; y 2) no se consideran procesos de socavación o degradación del cauce.

En lo concerniente a las condiciones de contorno, FLDWAV requiere una condición en el extremo de aguas arriba del cauce considerado, y otra en el extremo aguas abajo del mismo. La condición de contorno aguas arriba ha de ser un hidrograma de entrada expresado en términos de caudal o de nivel de flujo, mientras que la condición aguas abajo puede ser la curva de capacidad hidráulica de la sección transversal correspondiente, o un determinado nivel de flujo en dicha sección. La curva de capacidad hidráulica puede ser calculada por el propio modelo mediante alguna de las distintas opciones disponibles para tal efecto, o puede ser especificada como un dato más.

Los resultados que da FLDWAV están constituidos por el hidrograma correspondiente a la onda de flujo generada por la rotura, los niveles y caudales máximos de inundación durante el horizonte de simulación del evento, las velocidades de flujo, los tiempos de propagación de la cresta de la onda correspondientes tanto al caudal pico como al nivel máximo, los hidrogramas laminados a lo largo del cauce, y los parámetros hidráulicos en cada sección transversal del cauce: velocidad, área de flujo, perímetro mojado, radio hidráulico, nivel de flujo, número de Froude, ancho superficial de flujo. Adicionalmente, el modelo da un informe relativo a la evolución

geométrica de la brecha, los caudales que salen por ésta, y sus niveles de flujo, todo ello para cada uno de los intervalos de tiempo del horizonte de simulación.

El modelo dispone de varios métodos para simular el tránsito de hidrogramas de crecida, siendo el más robusto el *tránsito dinámico* (*dynamic routing*), el cual se basa en la solución de la ecuación de momentum completa, es decir, considerando los términos de inercia (Fread y Lewis, 1998). Dicho método es apto para analizar el tránsito de crecidas –tanto en embalses como en canales– caracterizadas por hidrogramas de crecimiento súbito o gradual. Otra de las técnicas disponibles es el *método de los descensos constantes de nivel* (*level-pool*), aplicable exclusivamente al tránsito de crecidas caracterizadas por hidrogramas de crecimiento gradual en embalses pequeños; dicho método no es útil para el análisis de la propagación de ondas de flujo en canales.

3.2.2 Datos genéricos para la modelación.

Los datos básicos que en general exige cualquier modelo de rotura de presas, que trabaje en régimen de flujo variable, son los correspondientes a cada una de las tres fases en la que se puede caracterizar el problema de la rotura: brecha – hidrograma de rotura – tránsito del hidrograma. Los datos de la primera de estas tres fases se analizan de forma aislada, en el Apartado 3.3, dada su significativa influencia en los resultados. Los datos de las otras dos fases pueden agruparse de la siguiente forma:

- *Datos relativos al embalse.* Nivel al inicio de la rotura, curva cota–área, hidrograma de entrada, caudales de salida. Algunos modelos requieren las curvas de calibración de las estructuras de evacuación de caudal (vertederos, desfuegos, tomas, etc.).
- *Datos relativos a la presa.* Altura o cotas de coronación, longitud de coronación, coeficiente de vertimiento, geometría de la sección transversal del cauce en la que se sitúa la presa.
- *Datos relativos al cauce.* Geometría (secciones transversales), factores de rugosidad, coeficientes de expansión y contracción, factores de sinuosidad, geometría y ubicación de estructuras de cruce (puentes, *box-culverts*, etc.), condición de contorno en el extremo de aguas abajo (curva

caudal–nivel, nivel de flujo preestablecido). La longitud total de cauce a considerar en el estudio estará determinada por el punto a partir del cual la onda de flujo de rotura no cause afecciones o éstas sean asumibles por quienes corresponda.

3.3 PARÁMETROS DE LA BRECHA

Una de las fases de mayor incertidumbre dentro del análisis de la rotura de una presa la constituye la estimación de los parámetros geométricos y temporales de la brecha. Si bien este tema ha sido objeto de investigación y estudio durante las últimas décadas, aún se encuentra en un estado muy incipiente de desarrollo, debido a la complejidad física del fenómeno y a la escasez de registros históricos fiables de los parámetros que lo gobiernan: *forma geométrica* de la brecha, sus *dimensiones* y el *tiempo de formación*.

Los parámetros de la brecha dependen significativamente del tipo de presa según sus materiales, y es por ello que la literatura de rotura de presas separa el análisis en dos grupos: presas de materiales sueltos (tierra y tierra–enrocado) y presas rígidas (hormigón y mampostería). Hasta ahora, las más estudiadas han sido las presas de materiales sueltos, debido esencialmente a que han sido presas de esta tipología las que más han colapsado (Comité Español de Grandes Presas, 1996). Es por ello que la mayor parte de los métodos que existen para determinar los parámetros de la brecha se refiere a presas de materiales sueltos.

Para estimar los parámetros de la brecha suele recurrirse a expresiones empíricas disponibles en la literatura, y que en general han sido deducidas a partir de análisis de regresión sobre datos de formas, dimensiones y tiempos de desarrollo de brechas correspondientes a casos históricos de presas colapsadas. Por ejemplo, MacDonald y Langridge-Monopolis (1984) proponen fórmulas para calcular el volumen de la brecha y el tiempo de formación de ésta, en función del volumen de agua en el embalse y de su correspondiente nivel; Singh y Scarlatos (1988) deducen, a partir de datos de 52 casos reales de rotura, relaciones entre los anchos superior e inferior de la brecha, y dan rangos de tiempos de formación de la misma; el U. S. Bureau of Reclamation (1988)

propone una expresión para evaluar el ancho de la brecha en función de la profundidad del agua en el embalse, y otra para estimar el tiempo de desarrollo de la brecha en términos del ancho previamente calculado; Dewey y Gillette (1993) proponen expresiones para la estimación del ancho medio de la brecha y de su tiempo de desarrollo, en términos de la profundidad de agua en el embalse y de un coeficiente que es función del volumen del mismo; Froehlich (1995) presenta dos fórmulas para calcular el ancho medio de la brecha y su tiempo de formación, en función de la profundidad final de la brecha y del volumen de agua por encima del fondo de la misma, empleando un coeficiente distinto, según la rotura se haya producido por rebosamiento (*overtopping*) o por tubificación (*pipping*); el Ministerio de Medio Ambiente de España (MMA, 1996b) sugiere, para estudios de riesgo de rotura de presas, expresiones y rangos de valores para estimar la forma, las dimensiones y el tiempo de formación de la brecha, en función del tipo constructivo de presa (materiales sueltos, hormigón-gravedad, bóveda), y del volumen y nivel del embalse.

Una vez se tengan definidos los parámetros de la brecha, junto con los demás datos de la modelación, ésta se lleva a cabo para obtener una serie de resultados que han de plasmarse en mapas de inundación.

Dichos mapas son, en última instancia, la principal herramienta para aplicar las actuaciones del Plan de Emergencia propias del Escenario 3 o escenario de rotura (aviso a la población y evacuación de las zonas de riesgo).

3.4 MAPAS DE INUNDACIÓN

En el caso de un Plan de Emergencia, los mapas de inundación constituyen el producto final de los análisis de rotura de presas y son la información de mayor valor que se les pasa a los organismos encargados de gestionar la emergencia en campo. Es por ello que resulta necesario darle la máxima precisión posible a la información plasmada en ellos. El Proyecto de Acción Concertada sobre Modelación de Rotura de Presas de la Unión Europea (Morris y Galland, 2000) sugiere tener en cuenta los siguientes criterios en la elaboración de dichos mapas.

- *Escala*. En planes de emergencia, los principales usuarios de los mapas serán los organismos encargados de la protección de la población (por ejemplo, Defensa Civil), por tanto, los mapas deben estar elaborados sobre cartografía oficial actualizada, mostrando claramente los sitios potenciales de afección y el acceso a ellos. Para zonas urbanas se recomienda una escala de al menos 1:10.000, aunque para fines de esquematización del área global de inundación, la escala puede ser de menos detalle (1:25.000, 1:50.000), dependiendo de la extensión total inundada.

- *Esquema del área inundable*. La franja de inundación debe estar demarcada claramente, de tal forma que su extensión y límites se distingan a primera vista de los demás elementos marcados en el mapa. Es recomendable no incluir en un mismo mapa distintas franjas de inundación correspondientes a diferentes hipótesis de rotura, para no crear confusión.

- *Uso del color*. El color suele mejorar la apariencia de los mapas y su comprensión, pero es conveniente saber cuál será su aspecto después de ser fotocopiados. Téngase en cuenta que durante la gestión de emergencias los mapas se distribuyen entre varias personas y para ello se recurre normalmente a la fotocopia en blanco y negro.

- *Información proporcionada*. Los mapas deben contener toda la información relativa al área de inundación y las afecciones potenciales, demarcando las infraestructuras viales que quedarían fuera de servicio, para que los organismos de gestión de la emergencia sepan de su imposibilidad de uso.

En cuanto a los contenidos básicos de los mapas de inundación, es conveniente que se consideren los siguientes:

- *Área de inundación*. Corresponde a la envolvente de niveles máximos de inundación obtenidos del estudio hidráulico de rotura. Estos niveles suelen ser resultados que los modelos de rotura dan de forma explícita para las secciones transversales en las que se discretiza el cauce analizado.

- *Parámetros hidráulicos*. El mapa debe llevar una tabla en la que se especifiquen los valores máximos de los parámetros hidráulicos de la onda de flujo en las secciones transversales del cauce: caudal, nivel, velocidad, profundidad de

flujo, tiempo de llegada del caudal (máximo), tiempo de llegada del nivel (máximo), ancho superficial.

– *Afecciones potenciales*. Deben demarcarse los distintos tipos de afecciones a que daría lugar la rotura de la presa: núcleos urbanos, infraestructuras viales, presas aguas abajo de la analizada, obras de cruce del cauce (puentes, vados, *box-culverts*, etc.), edificaciones industriales (plantas hidroeléctricas, de tratamiento de aguas residuales, de potabilización de agua, industrias químicas, etc.), edificaciones comunitarias (escuelas, hospitales, asilos, cementerios, parques, zonas deportivas, etc.).

– *Parámetros de valoración de afecciones*. Dado que la gravedad de las afecciones normalmente se determina en función de los valores máximos de velocidad y profundidad de flujo, es conveniente presentar en los mapas de inundación un tabla con los valores de esos parámetros en cada sitio de afección. En ella debe aparecer también el tiempo en que comienza y termina la inundación en cada sitio y los tiempos en que se dan los valores máximos de caudal y nivel de flujo.

– *Tiempos de avance de la onda*. Conviene demarcar gráficamente (una línea, por ejemplo), sobre el área inundable, la posición de la cresta de la onda de flujo cada cierto tiempo (cada media hora, por ejemplo).

El Plan de Emergencia debe disponer de un mapa para cada hipótesis de rotura analizada, excepto cuando los resultados entre dos o más de esas hipótesis puedan considerarse iguales.

3.5 ESTIMACIÓN DE AFECCIONES

Uno de los aspectos esenciales para la implementación del Plan de Emergencia es la identificación de las distintas clases de afecciones a las que puede dar lugar la rotura de la presa, así como su localización y nivel de gravedad.

3.5.1 Clasificación y ubicación de afecciones. Es conveniente establecer distintos tipos o categorías de afecciones, con el fin de priorizar las actuaciones del Plan de Emergencia en materia de protección y evacuación, y para poder hacer estimaciones de la magnitud total de los daños ocasionados por la rotura potencial de la

presa. Una posible categorización de afecciones (MMA, 1996b) puede ser la siguiente:

– *Núcleos urbanos*. Grupos de más de diez edificaciones con calles, plazas y vías urbanas, que alberguen concentraciones de población.

– *Edificaciones dispersas*. Casas normalmente en campo abierto con habitabilidad permanente o temporal.

– *Servicios esenciales*. Son aquéllos necesarios en el ejercicio de las actividades básicas para el desarrollo y sostenimiento de la población: sistemas de abastecimiento de agua potable, tratamiento de aguas residuales, suministro de energía, sistema sanitario, sistemas de comunicaciones, sistemas de transporte.

– *Bienes materiales*. Hacen referencia a industrias, zonas y granjas agrícolas, infraestructuras.

– *Bienes ambientales*. En esta categoría se incluyen espacios naturales protegidos, parques nacionales, reservas ecológicas, y en general todos aquellos elementos y territorios que gocen de alguna figura legal de protección.

– *Otras afecciones*. En esta categoría se incluyen las afecciones que no sean clasificables en las categorías anteriores, por ejemplo, plantas químicas, centrales nucleares, presas aguas abajo de la presa analizada.

La localización y clasificación de las afecciones se deduce de los mapas de inundación y de visitas de campo. Después de que se demarque el área inundable sobre cartografía oficial a escala adecuada, se hace un inventario de todos los sitios o puntos clasificables en las categorías anteriores, que están total o parcialmente incluidos en dicha área. Después de tener inventariadas las afecciones, se leen para cada una de ellas los valores máximos de velocidad y profundidad de flujo, a partir de los resultados de la modelación hidráulica. Lo mismo se hace con los tiempos de: inicio de inundación, nivel de flujo máximo, caudal máximo, y fin de inundación.

3.5.2 Nivel de gravedad de las afecciones.

Aunque la evaluación del nivel de gravedad de las afecciones no deja de ser un proceso subjetivo, existen algunos criterios para hacer dicha estimación a partir de los valores máximos de velocidad y profundidad de flujo en el sitio de afección. A modo de ejemplo, dos de esos criterios son los siguientes (MMA, 2001):

– *Criterio 1.* Este criterio permite determinar el nivel de afección a vidas humanas en núcleos urbanos (NU) y en campo abierto (CA). Para cada caso (NU y CA) hay un gráfico que consiste en un cuadrante coordinado *velocidad – profundidad*, que está zonificado en tres áreas limitadas por dos curvas: el área bajo la curva inferior corresponde a afecciones leves; el área por encima de la curva superior corresponde a afecciones graves; y el área intermedia es una zona de indefinición.

– *Criterio 2.* Este criterio da una idea del nivel de inseguridad para personas y edificaciones, en términos del producto *velocidad – profundidad*: hay inseguridad para las vidas humanas cuando dicho producto supera el valor de $0.60 \text{ m}^2/\text{s}$, y existe inseguridad para las edificaciones cuando se supera el valor de $1.80 \text{ m}^2/\text{s}$.

4. CASO DE ESTUDIO

El objeto de este apartado es describir los aspectos más relevantes de los estudios y análisis efectuados para el diseño del Plan de Emergencia de una presa actualmente en funcionamiento, tratando de seguir el esquema metodológico presentado en los apartados anteriores.

El Plan corresponde a la presa de Bellús, localizada sobre el río Albaida en el sureste de España, la cual fue construida a mediados de la década de los noventa con dos propósitos: 1) amortiguación de crecidas; y 2) riego agrícola. La presa es de gravedad en hormigón, tiene una altura sobre cimientos de 43 m, con una longitud de coronación de 703 m, y dispone de dos vertederos, uno de los cuales está regulado mediante compuertas radiales. Además de estas dos estructuras, el cuerpo de presa también tiene dos conductos rectangulares de purga, y tres tomas circulares a dos niveles diferentes. El embalse, al que llega la escorrentía de una cuenca hidrográfica de 494 km^2 de extensión, alcanza un volumen de $69.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ en su nivel máximo normal, aunque en época de riesgo de crecidas el volumen se restringe a un valor máximo de $18.2 \times 10^6 \text{ m}^3$.

4.1 ANÁLISIS DE LA SEGURIDAD DE LA PRESA

Para redactar esta parte del Plan se llevaron a cabo tres pasos: 1) identificación de fenómenos desencadenantes de situaciones de emergencia y sus efectos; 2) establecimiento de indicadores y su control; y 3) definición de umbrales.

En el caso de la presa de Bellús se identificaron 54 fenómenos desencadenantes de posibles situaciones de emergencia, y se describieron para cada uno sus efectos potenciales. Entre esos fenómenos se encuentran, por ejemplo, las crecidas, los deslizamientos de laderas, los sismos, el fuego, el vandalismo, ciclos de hielo-deshielo, ataque por sulfatos, sedimentación de conductos, fallas en el suministro de energía. Para el caso de las crecidas, por ejemplo, se definieron como posibles efectos: rebosamiento del embalse, erosión del pie de presa, interrupción de accesos a las instalaciones, aumento de cargas sobre la presa, destrucción de pilas del vertedero, entre otros. Esta información se organizó en una tabla de dos columnas: fenómeno – efectos.

A continuación, para cada fenómeno desencadenante se definieron sus indicadores y la forma de monitorearlos. Por ejemplo, para las crecidas se establecieron dos indicadores: evolución del nivel del embalse, y caudal aguas arriba del embalse. A cada indicador se le definió su forma de medirlo cuantitativa o cualitativamente; por ejemplo, para los caudales aguas arriba del embalse se estableció la lectura telemétrica de aforos, en una estación limnigráfica que forma parte de una de las redes de toma de datos de un Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) instalado en la cuenca. La información se especificó en una tabla de dos columnas: indicadores – tipo de control.

El tercer paso consistió en la definición de los umbrales de los distintos indicadores, con el fin de definir cuándo hay que declarar un determinado escenario de emergencia. Por ejemplo, para el indicador *nivel en el embalse*, correspondiente al fenómeno desencadenante *crecidas*, se definieron los umbrales de la siguiente forma: el umbral 0 es el nivel máximo normal; el umbral 1 es la curva de niveles de embalse correspondien-

te al tránsito de la crecida de diseño de la presa (1000 años de periodo de retorno); el umbral 2 es la curva de niveles de embalse correspondiente al tránsito de la crecida máxima probable (CMP de la presa); y el umbral 3 es la cota de coronación de la presa. La información relativa a la definición de umbrales se presentó en una tabla de cinco columnas: indicador – umbral 0 – umbral 1 – umbral 2 – umbral 3; adicionalmente, en el caso del indicador *nivel en el embalse* se presentaron gráficos de definición de umbrales, en función de la evolución temporal del indicador.

La presa dispone de un conjunto de instrumentos de auscultación (péndulos, extensómetros, clinómetros, mojones de nivelación, etc.), los cuales miden variables que corresponden a indicadores asociados a diferentes fenómenos desencadenantes. A esos indicadores se les determinaron cuantitativamente sus correspondientes umbrales, de acuerdo con correlaciones entre los valores históricos y el comportamiento de la presa.

En la memoria del Plan de la presa de Bellús se incluyó una tabla de cuatro columnas, en la que se sintetizaban los aspectos a considerar en el análisis de la seguridad de la presa: fenómeno desencadenante – indicadores asociados – escenario – umbrales.

4.2 NORMAS DE ACTUACIÓN

En el caso de la presa de Bellús, las normas de vigilancia y control, así como las de prevención y corrección se agruparon en cinco categorías: 1) actuaciones ante crecidas; 2) actuaciones ante eventos sísmicos; 3) actuaciones derivadas de la inspección; 4) actuaciones derivadas de la auscultación; y 5) actuaciones ante episodios de lluvias extremas. También se contemplaron normas de actuación en materia de comunicaciones, relacionadas esencialmente con la transmisión de información a organismos de gestión de emergencias, y alerta a la población.

Algunos ejemplos de actuaciones de vigilancia y control que se consideraron en el Plan son: vigilancia constante de los niveles de embalse, pruebas de funcionamiento de las compuertas del

vertedero, inspección general del estado de la presa, prueba de funcionamiento de los grupos electrógenos, evaluación de la viabilidad de desembalses, análisis de lecturas de auscultación.

A cada actuación se le describe detalladamente su forma de llevarla a cabo y el objetivo de la misma, el escenario de emergencia que da lugar a la actuación, el fenómeno desencadenante que la genera, los recursos materiales y humanos a emplear, la persona encargada de dar la orden de su aplicación, y la justificación de los medios a emplear. Esta información se plasma dentro del Plan en fichas denominadas *procedimientos* y nombradas con códigos únicos.

4.3 RECURSOS Y SU ORGANIZACIÓN

Los siguientes son los recursos humanos contemplados en el Plan de Emergencia de la presa de Bellús para la puesta en marcha del mismo: un ingeniero civil Director del Plan, un tecnólogo en construcciones civiles, un tecnólogo en instalaciones mecánicas, y dos oficiales para las labores de inspección y vigilancia. A cada uno de estos miembros se le han definido los requisitos técnicos y profesionales que debe cumplir, así como sus responsabilidades y su ubicación dentro del esquema organizacional del Plan.

En situaciones de riesgo significativo (Escenarios de Emergencia 2 y 3) se definió como necesaria la intervención del Presidente, el Comisario de Aguas, el Director Técnico y el Jefe del Área de Explotación de la Confederación Hidrográfica del Júcar, organismo dependiente del Ministerio de Medio Ambiente que tiene la titularidad de la presa de Bellús.

Además del personal anterior, también se definió la conveniencia de disponer de un equipo de expertos en las diferentes áreas técnicas relacionadas con la operación de la presa. Este equipo ha de estar involucrado eventualmente en el Plan de Emergencia, cuando se requiera asesoría técnica de alto nivel.

Tabla 1. Características y parámetros de rotura de las hipótesis analizadas**Table 1.** Dam-failure parameters of the analyzed hypothesis

PARÁMETRO	H1	H2	A1
Caudal pico entrante (m ³ /s)	10	3065	10
Nivel inicial de embalse (msnm)	155.8	159.0	155.8
Caudal saliente al inicio (m ³ /s)	447	700	57
Cota de inicio de rotura (msnm)	155.8	159.0	155.8
Forma geométrica de la brecha	Rectangular	Rectangular	Rectangular
Ancho máximo de la brecha (m)	234	234	16
Cota de fondo de la brecha (msnm)	121.0	121.0	150.5
Tiempo de rotura (min)	12	12	6

En relación con los recursos materiales, el Plan de la presa de Bellús contiene una descripción de los distintos medios que deben estar disponibles. Los más importantes son: la oficina de la presa, la oficina del Servicio Técnico de Explotación, el archivo técnico de la presa, el sistema de comunicaciones, y el sistema de alarma y aviso a la población. Los demás medios, como herramientas y materiales de obra, se especificaron en los *procedimientos* de las normas de actuación.

4.4 ÁREA INUNDABLE Y AFECCIONES

Dentro del Plan de Emergencia de la presa de Bellús se consideraron tres hipótesis de rotura: rotura sin crecida (H1); rotura con crecida (H2); y avería de compuertas del vertedero (A1). Los códigos entre paréntesis responden a la nomenclatura oficial española (MMA, 2001) para designar dichas hipótesis. A cada una de éstas se le estimó el conjunto de parámetros de rotura, de acuerdo con las expresiones recomendadas por el Ministerio de Medio Ambiente de España (MMA, 1996b). En la Tabla 1 se indican las principales singularidades de las hipótesis estudiadas.

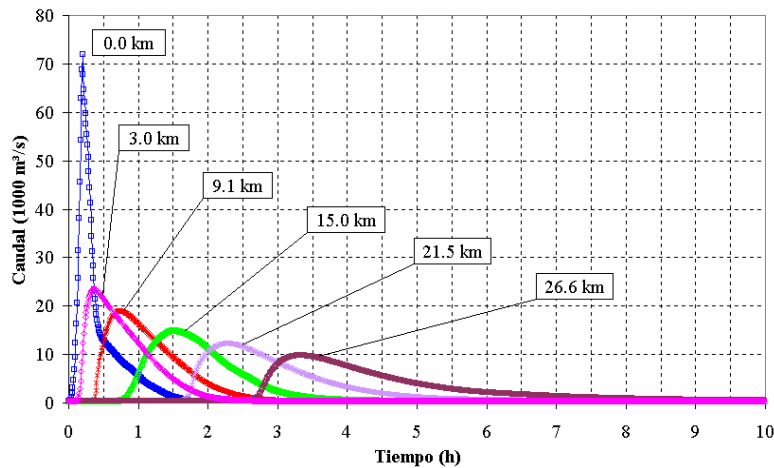
La simulación de la rotura y de la propagación de la onda de flujo se realizó mediante el modelo FLDWAV, para cada una de las tres hipótesis consideradas. El tramo del río (Albaida) analizado estuvo comprendido entre la presa de Bellús y su desembocadura en el río Júcar, lo cual equivale a una longitud de 27 km aproximadamente.

Los resultados obtenidos son los propios del modelo FLDWAV: el hidrograma correspondiente a la onda de flujo generada por la rotura, la evolución temporal de los niveles de flujo en la brecha, los niveles y caudales máximos de inundación durante el horizonte de simulación del evento, las velocidades de flujo, los tiempos de propagación de la onda correspondientes tanto al caudal pico como al nivel máximo, la evolución temporal del hidrograma de rotura a lo largo del cauce, y los parámetros hidráulicos en cada sección transversal del cauce: velocidad, área de flujo, perímetro mojado, radio hidráulico, nivel de flujo, número de Froude, ancho superficial de flujo. Estos resultados se utilizaron luego para la esquematización de los mapas de inundación y para la estimación de las afecciones potenciales. En la Tabla 2 se presenta un resumen de los principales resultados.

A modo de ilustración, la Figura 1 presenta la amortiguación que sufre la onda de flujo originada por la rotura de la presa, a lo largo del cauce del río. El primero de los hidrogramas que se indican en dicha figura (0.0 km) es el hidrograma de rotura, que representa la variación temporal de caudales durante todo el periodo de formación de la brecha y vaciado del embalse. El gráfico de la Figura 1 corresponde a la hipótesis H1. Un gráfico similar se obtuvo para cada una de las otras dos hipótesis H2 y A1.

Tabla 2. Síntesis de los resultados de la simulación de la rotura de la presa de Bellús**Table 2.** Summary results of the Bellús dam-break modeling

PARÁMETRO	H1	H2	A1
Caudal pico de rotura en la presa (m ³ /s)	71900	87300	329
Caudal pico de rotura en extremo aguas abajo (m ³ /s)	9800	13400	283
Amortiguación hidráulica de la onda (%)	86	85	14
Tiempo base de la onda en la presa (h)	1.7	2.0	45
Tiempo de vaciado del embalse (h)	1.8	2.1	54
Tiempo de viaje de la cresta de la onda (h)	3.3	3.2	9.4
Mayor velocidad máxima de flujo (m/s)	11.7	10.1	2.2
Menor velocidad máxima de flujo (m/s)	0.6	0.7	0.4
Mayor calado máximo (m)	34.3	37.4	7.5
Menor calado máximo (m)	4.2	4.9	2.5

**Figura 1.** Evolución espacio-temporal de la onda de flujo (Hipótesis H1)**Figure 1.** Time-spatial development of the breach hydrograph (Hypothesis H1)

El gráfico de la Figura 1 es de gran relevancia en un Plan de Emergencia ya que proporciona de manera inmediata una idea acerca de la magnitud de los caudales que genera la rotura a lo largo del río, y también permite conocer los tiempos de avance de la onda (inicio, máximo y fin): en el caso de la presa de Bellús, su rotura en situación sin crecida (H1) generaría un caudal pico en las vecindades de la presa del orden de 71900 m³/s, que en 2h:45min estaría empezando a manifestarse a 26.6 km aguas abajo de la presa, y 30 minutos más tarde estaría alcanzando en este punto un valor de 9800 m³/s.

Con los resultados hidráulicos se procedió a la demarcación del área inundable sobre cartografía digital oficial del Instituto Cartográfico Valenciano a escala 1:10.000. Los terrenos inundados para la hipótesis de rotura H2 abarcan una extensión aproximada de 34 km², con un total de 36 afecciones potenciales principales, constituidas por 10 núcleos urbanos, un polígono industrial con más de 20 instalaciones, y 25 obras de infraestructura entre carreteras y líneas férreas.

La valoración de las afecciones se hizo de acuerdo con los *Criterios 1 y 2* (Apartado 3.5.2). A modo de ilustración, la Tabla 3 presenta la

valoración de afecciones a vidas humanas en núcleos urbanos para la hipótesis H2, según el *Criterio 1*, el cual se indica en la Figura 2. El documento del Plan de Emergencia de la presa de Bellús está formado por tres tomos (545 hojas más planos) que contienen la memoria de los estudios y sus anexos justificativos.

Ya se ha presentado a la Dirección General del Agua – Ministerio de Medio Ambiente (España), que es el organismo encargado de su revisión y aprobación final. Después de que ésta sea expedida, se dará comienzo a la fase de implantación del Plan de Emergencia, la cual consiste en materializar todo su contenido en lo referente a recursos, organización y actuaciones.

Tabla 3. Valoración de afecciones a vidas humanas en núcleos urbanos (Hipótesis H2)

Table 3. Assessment of population damage in urban areas (Hypothesis H2)

NRO.	AFECCIÓN		LOCALIZACIÓN		VEL. (m/s)	PROF. (m)	VALORACIÓN DE LA AFECCIÓN
	NOMBRE		DESDE	HASTA			
2	Bellús		0+790	1+650	1.6	14.3	Grave
9	Alboy Sur		5+300	5+720	3.5	20.0	Grave
10	Alboy Norte		6+020	6+540	3.4	17.0	Grave
11	Les Arcades (Xátiva)		6+200	6+440	3.0	8.2	Grave
14	Corona Estreta		9+120	9+400	3.4	18.0	Grave
15	El Pla		9+500	11+530	2.2	3.0	Grave
24	Torre Lloris		16+080	16+350	1.5	1.6	Moderada
27	Manuel		18+790	19+690	2.1	4.8	Grave
29	Senyera		21+770	22+240	1.5	19.9	Grave
33	Villanueva de Castellón		23+060	24+420	1.3	28.6	Grave

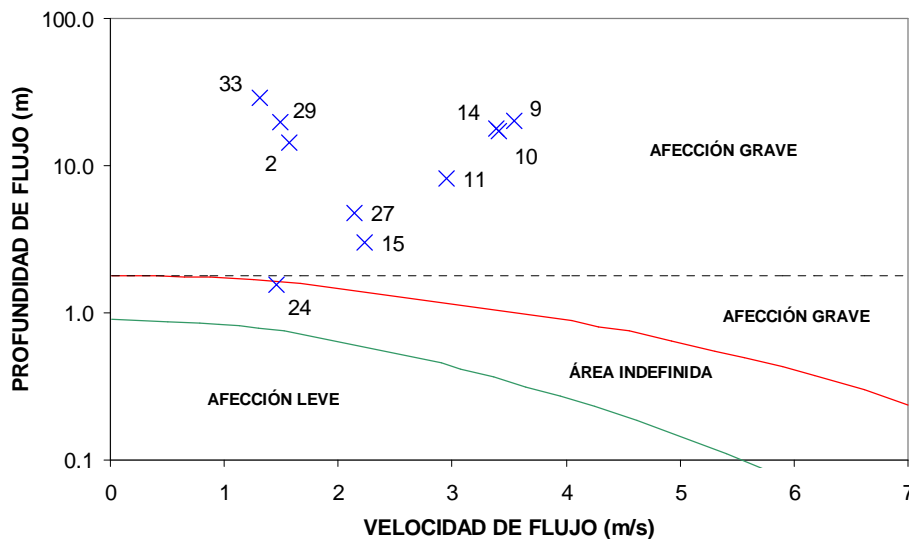


Figura 2. Valoración de afecciones a vidas humanas en núcleos urbanos – (Hipótesis H2)

Figure 2. Assessment of population damage in urban areas (Hypothesis H2)

5. CONCLUSIONES

Inicialmente, y a modo de introducción, se ha mostrado la relevancia de los estudios de rotura de presas, enfocados al diseño de estrategias que permitan minimizar las pérdidas en caso de colapso. A continuación se ha definido el concepto de Plan y sus objetivos: protección de la población y bienes, mediante la implementación de medidas efectivas para la reducción del riesgo y de los daños.

Se ha presentado un esquema metodológico para la elaboración del Plan de Emergencia a partir de la experiencia de países como España y Estados Unidos. Se han descrito las distintas partes que integran el Plan: análisis de la seguridad de la presa, normas de actuación, recursos humanos y materiales, organización del Plan, y delimitación del área inundable y estimación de afecciones.

Se ha puesto especial énfasis en el estudio y simulación de la rotura de la presa, ya que esta fase es el fundamento de la elaboración de los mapas de inundación. Éstos son la principal herramienta para la gestión de la emergencia ante la rotura inminente de la presa. Los análisis se realizaron considerando tres situaciones hipotéticas de colapso de la presa: rotura sin situación de crecida, rotura con crecida y avería de compuertas.

Se ha hecho una breve revisión de los modelos más empleados en los últimos años para la simulación de la rotura de presas, haciendo hincapié en el modelo FLDWAV. En éste, como en los demás, las características de la brecha determinan significativamente los resultados de la modelación hidráulica. Esto motivó una breve reseña de algunos estudios sobre expresiones empíricas usualmente aplicadas en la estimación de los parámetros de la brecha (forma, dimensiones y tiempo de desarrollo).

Se han expuesto algunos criterios comúnmente empleados en la elaboración de mapas de inundación, herramienta fundamental en la evaluación de las afecciones potenciales debidas a la rotura de una presa. A continuación

se han presentado algunas directrices para la identificación de las afecciones y criterios para la estimación de su nivel de gravedad.

Se ha hecho una descripción sucinta del Plan de Emergencia diseñado para la presa de Bellús, localizada en el sureste de España, y cuyo fin primordial es el control de inundaciones. Además del Plan de Bellús, el autor de este artículo ha diseñado y redactado Planes de Emergencia para otros tipos de obras hidráulicas en España: un canal de 60 km para el trasvase de agua entre las cuencas de los ríos Júcar y Turia (MS Ingenieros, 2004); una balsa de riego agrícola conformada por un dique perimetral en tierra (MS Ingenieros, 2005).

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Área de Explotación de la Confederación Hidrográfica del Júcar (Ministerio de Medio Ambiente – España) la autorización de la publicación en este artículo de la información técnica del Plan de Emergencia de la presa de Bellús.

REFERENCIAS

- [1] BROWN, C. A., y GRAHAM, W. J., Assessing the Threat to Life from Dam Failure, *Water Resources Bulletin*, 24(6), 1988.
- [2] COMITÉ ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS, *Rotura de Presas – Análisis Estadístico*, Madrid, 1996.
- [3] COSTA, J. E., *Floods from Dam Failures*, U.S. Geological Survey Open-File Report 85-560, Denver, Colorado, 1985.
- [4] DEKAY, M. L., y MCCLELLAND G. H., *Setting Decision Thresholds for Dam Failure Warnings: A Practical Theory-Based Approach*, CRJP Technical Report No. 328, Center for Research on Judgment and Policy, University of Colorado, Boulder, Colorado, 1991.
- [5] DEWEY, R. L. y GILLETTE, D. R., *Prediction of Embankment Dam Breaching for Hazard Assessment*, Proceedings, ASCE Specialty Conference on Geotechnical Practice in Dam Rehabilitation, Raleigh, North Carolina, abril 25-28, 1993.

- [6] FREAD, D. L., *BREACH: An Erosion Model for Earthen Dam Failures*, National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, Maryland, 1988.
- [7] FREAD, D. L., *DAMBRK: The NWS Dam-Break Flood Forecasting Model*, National Weather Service, Office of Hydrology, Silver Spring, Maryland, 1984.
- [8] FREAD, D. L., *The Development and Testing of a Dam-Break Flood Forecasting Model*, Proc. of Dam-Break Flood Modeling Workshop, U.S. Water Resources Council, Washington, D.C., 164-197, 1977.
- [9] FREAD, D. L. y LEWIS, J. M., *NWS FLDWAV Model*, Hydrology Research Laboratory – Office of Hydrology, National Weather Service (NWS), NOAA, Silver Spring, Maryland, 1998.
- [10] FROEHLICH, D. C., Peak Outflow from Breached Embankment Dam, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 121(1), 90-97, 1995.
- [11] GRAHAM, W., Integration with Risk Assessment Process, *Proceedings of the International Dam Breach Processes Workshop*, Agricultural Research Service – U. S. Department of the Interior, 10-11 March, Stillwater, Oklahoma, 1998.
- [12] ICOLD – International Committee on Large Dams, *Bulletin 111. Dam-Break Flood Analysis. Review and recommendations*, 306 pp., 1998.
- [13] MACDONALD, T. C. y Langridge-Monopolis, J., Breaching Characteristics of Dam Failures, *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(5), 567-586, 1984.
- [14] MIR, MINISTERIO DEL INTERIOR, *Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones*, Madrid, 1995.
- [15] MMA, MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, *Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses*, Madrid, 1996a.
- [16] MMA, MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, *Guía Técnica para la Clasificación de Presas en Función del Riesgo Potencial*, Madrid, 1996b.
- [17] MMA, MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, *Guía Técnica para la Elaboración de los Planes de Emergencia de Presas*, Madrid, 2001.
- [18] MORRIS, M. W. y Galland, J. C., *CADAM Concerted Action on Dam Break Modelling – Dambreak Modelling Guidelines & Best Practice*, EC contract number ENV4-CT97-0555 Environment and Climate Programme, European Union, 2000.
- [19] MS Ingenieros, *Plan Básico de Emergencia del Canal Júcar – Turia*, Estudio realizado para el Área de Explotación de la Confederación Hidrográfica del Júcar, Valencia, España, 2004.
- [20] MS Ingenieros, *Plan de Emergencia de la Balsa El Recholar – La Murta de Monseerrat*, Estudio realizado para la Comunidad de Regantes de La Murta, Valencia, España, 2005.
- [21] SINGH, V. P. y Scarlatos, P. D., Analysis of Gradual Earth-Dam Failure, *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(1), 21-42, 1988.
- [22] U.S. Bureau of Reclamation, *Downstream Hazard Classification Guidelines*, ACER Technical Memorandum No. 11, Assistant Commissioner-Engineering and Research, Denver, Colorado, 1988.
- [23] WAHL, T., *Prediction of Embankment Dam Breach Parameters – A Literature Review and Needs Assessment*, DSO-98-004, Dam Safety Research Report, Water Resources Research Laboratory, U. S. Department of the Interior, 1998a.
- [24] WAHL, T., *Breach Parameter Prediction Methods and the Need for and Potential Benefits of Improved Breach Models*, Proceedings of the International Dam Breach Processes Workshop, Agricultural Research Service – U. S. Department of the Interior, 10-11 March, Stillwater, Oklahoma, 1998b.
- [25] WESTPHAL, J. A. y Thompson, D. B., *NWS Dambreak or NWS Simplified Dam Breach?* Computational Hydrology '87, Proceedings of the First International Conference, Anaheim, California, p. H17-H23, julio 1987.
- [26] WETMORE, J. N. y Fread, D. L., *The NWS Simplified Dam-Break Model*, Executive Brief, National Weather Service, Office of Hydrology, Silver Spring, Maryland, 1983.