

Programa de seguridad basado en el riesgo en la C.H. del Duero

D. Sanz-Jiménez, P.J. Moreno-Sánchez, J.C. Bernabé-de la Iglesia &
N.E. Bueso-Suárez

Confederación Hidrográfica del Duero, España

Ó. Pérez-Arroyo

OFITECO, España

A. Serrano-Lombillo

iPresas S.L., España

ABSTRACT: La Confederación Hidrográfica del Duero ha puesto en marcha a principios de 2010 un programa de gestión de seguridad de presas basado en el riesgo. Dentro de sus objetivos, se encuentra la puesta en práctica de la metodología de análisis y evaluación de riesgos, con la intención última de priorizar las inversiones, las necesidades de investigación y planificar las actuaciones encaminadas a reducir los riesgos. A su vez, como resultado de la aplicación, se proporciona una información objetiva e inédita de cara a la toma de decisiones en materia de gestión de seguridad. Previamente, entre 2007 y 2009, para un grupo piloto de presas (Camporredondo, Compuerto, Requejada, Cervera y Aguilar de Campoo, en la provincia de Palencia), se realizó un análisis completo de los riesgos inherentes a la gestión de las mismas. Continuando este trabajo previo, la primera fase del programa de seguridad basado en riesgo se ha desarrollado a lo largo de 2010, en la cual se ha acometido la fase cualitativa de identificación de los modos de fallo, con el apoyo de los contratos de mantenimiento de presas. En primer lugar, se han llevado a cabo los trabajos para las presas de Arlanzón y Úzquiza (Burgos), junto con Cuerda del Pozo y Campillo de Buitrago (Soria), como casos piloto para el resto de presas, que se han realizado a continuación. Se han obtenido las necesidades de inspección visual, vigilancia y auscultación, así como las posibles necesidades de ensayos e investigación. Así pues, estos trabajos han constituido la base y punto de partida para la segunda fase, el análisis y evaluación de riesgos que, a nivel cuantitativo, se están llevando a la práctica a lo largo del presente año 2011 en la totalidad de presas gestionadas por la Confederación.

1 INTRODUCCIÓN

La Confederación Hidrográfica del Duero (CHD) impulsó, a finales del año 2006, un programa piloto para la gestión de la seguridad de sus presas basado en las técnicas de análisis de riesgos, similar a los impulsados por otros organismos internacionales como el United States Bureau of Reclamation (USBR) o el United States Army Corps of Engineers (USACE). Para ello, contó con la colaboración de la empresa Oficina Técnica de Estudios y Control de Obras, S.A. (OFITECO) y del Grupo iPresas de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

Los trabajos se iniciaron con un análisis de cribado para el conjunto de las presas explotadas por la CHD, adaptándose una metodología desarrollada en su día por el USBR. Posteriormente, entre los años 2007 y 2009, las tareas se ampliaron a las presas de los sistemas Carrión y Pisuerga (Ardiles et al., 2008), donde se aplicó una metodología propia del grupo iPresas de la UPV (Serrano et al., 2009, Serrano-Lombillo et al., 2011a). También se realizó un último caso piloto en una presa en construcción: Castrovido (Sanz et al., 2010). Este programa

resultó ser un éxito y, de hecho, sirvió como punto de partida para la continuación y extensión de los trabajos a la totalidad de las presas de la Confederación.

De esta forma, a principios de 2010 se iniciaron los trabajos para el desarrollo de un programa complementario de gestión de seguridad basado en el riesgo para las presas de la CHD, en el que se incluyen la definición, evaluación y priorización de actuaciones en materia de seguridad. Durante el primer año, se ha realizado una primera fase cualitativa de identificación de los modos de fallo, y en el presente año 2011, se está desarrollando la segunda fase, el análisis y evaluación de riesgos a nivel cuantitativo.

Como resumen, las actividades llevadas a cabo hasta la fecha o que se están realizando en la actualidad son:

- Actividad A: Casos piloto de análisis y evaluación de riesgos de los sistemas Carrión y Pisuegra y de la presa de Castrovido.
- Actividad B: Identificación de modos de fallo del resto de presas de la CHD, en el marco de los contratos de mantenimiento de presas.
- Actividad C: Desarrollo de los modelos de riesgo del resto de presas de la CHD e implantación del sistema de gestión de riesgo.

En la Figura 1 puede apreciarse el esquema general con las fases del programa completo de seguridad basado en análisis y evaluación de riesgos.

Como se puede ver en la figura 1, una vez confeccionados los modelos de riesgo y alcanzado el estado estacionario, la implantación del sistema de gestión de riesgo permitirá que todas las actividades de los mantenimientos, las mejoras en predicción conseguidas por el SAIH, la caracterización del comportamiento con la mejora de la auscultación, la forma de explotar las presas, la implementación de los planes de emergencia, las acciones de comunicación o las recomendaciones de los informes de seguridad, puedan ponerse en valor por su contribución a la mitigación del riesgo. En escenarios de restricción presupuestaria, esto facilitará la priorización en términos de eficiencia en dicha mitigación.

De esta manera, queda claro que este nuevo enfoque basado en análisis de riesgos no sustituye la actual gestión de la seguridad de presas, sino que la complementa aportándole un importante valor añadido. El objetivo final es decidir, por un lado, si los riesgos existentes son tolerables y, por otro, si las medidas de control resultan adecuadas. En este último caso, se podrá llegar a determinar si son justificables medidas de control alternativas y priorizarlas objetivamente.

En los siguientes apartados se describen con más detalle las actividades B y C definidas anteriormente.

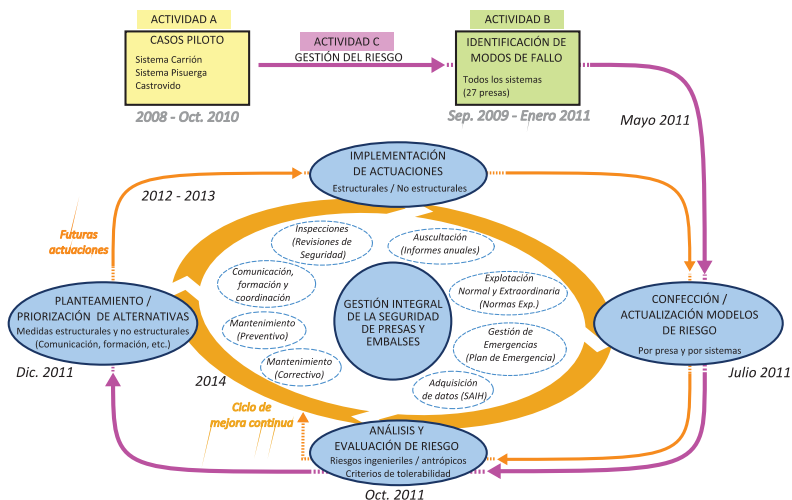


Figura 1. Diagrama de flujo del esquema de gestión.

2 IDENTIFICACIÓN DE MODOS DE FALLO

En el presente capítulo se describe, de forma resumida, la fase de identificación de modos de fallo (Actividad B) realizada para cada una de las presas de la CHD a lo largo del año 2010.

2.1 Concepto de modo de fallo

Un modo de fallo constituye una secuencia particular de eventos que puede dar lugar a un funcionamiento inadecuado del sistema presa-embalse o una parte del mismo. Esta serie de sucesos debe estar asociada a un determinado escenario de solicitación y tendrá una secuencia lógica; la cual constará de un evento inicial desencadenante, una serie de eventos de desarrollo o propagación y culminará por la rotura de la presa.

En principio, se analiza cualquier modo de fallo con potencial para producir un vertido incontrolado de caudales y, por tanto, con potencial para causar daños sobre la vida humana, o provocar una pérdida de servicio a los usuarios. Así mismo, el análisis de los modos de fallo no se ciñe exclusivamente a las estructuras de retención de un embalse, sino que tiene en cuenta cualquier infraestructura incluida en el sistema presa-embalse.

2.2 Descripción del proceso de identificación de modos de fallo

El proceso de identificación de modos de fallo es el mecanismo por el cual deben quedar al descubierto los caminos por los que el sistema presa-embalse puede generar real o potencialmente un riesgo. Por tanto, se deben identificar, evaluar y valorar estos caminos para, posteriormente, proceder a la decisión oportuna sobre los mismos. El mecanismo de identificación se lleva a cabo mediante un protocolo secuenciado en el que, partiendo de la información introducida por el facilitador, de la obtenida en las distintas visitas a la presa y de la propia experiencia del personal encargado de la explotación y el mantenimiento, se trata de poner de manifiesto aquellas secuencias de acontecimientos que pueden llevar acarreados los distintos modos de fallo en cada sistema presa-embalse en particular, que esquemáticamente podemos observar en la Figura 2 mostrada a continuación.

Las propuestas individuales de modos de fallo que cada participante presenta al resto se ponen en común con el fin de eliminar redundancias y obtener unos modos de fallo grupales. Se propone y discute, además, los factores existentes a favor y en contra de su ocurrencia.

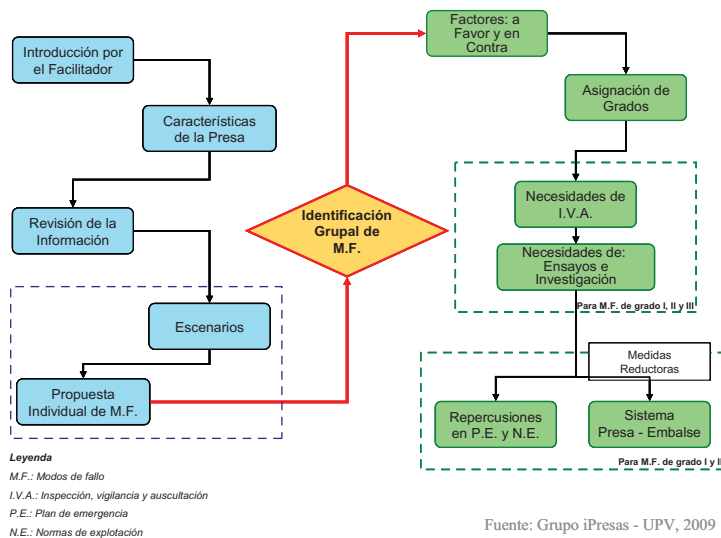


Figura 2. Secuencia para realizar un análisis de modos de fallo.

Se debe asignar una gradación a cada modo de fallo para discriminarlos entre sí en función de la posibilidad de que se produzcan, y sobre los cuales, posteriormente, se pueden definir:

- Necesidades de I.V.A. (inspección, vigilancia y auscultación), para la detección temprana de cualquier modo de fallo.
- Necesidades de ensayo e investigación, para disminuir las incertidumbres existentes y poder analizar con detalle los mecanismos y modos de fallo identificados.

Para obtener conclusiones basadas en la identificación de los modos de fallo hay que asignarles previamente una gradación, a fin de evaluar aquellos que cuentan potencialmente con mayor probabilidad de aparición. Para asignar los grados hay que tener en cuenta factores a favor y en contra de que se produzca el modo de fallo, la experiencia personal de cada participante y los antecedentes del sistema evaluado. La escala de grados contempla cuatro posibilidades, denominadas I, II, III y IV, que se definen a continuación:

- Grado I: Modos de fallo que claramente se consideren factibles al existir alguna condición o estado sintomático detectado, resultar la serie de eventos probables e implicar consecuencias potenciales importantes.
- Grado II: Modos de rotura considerados igualmente factibles, aunque con menores posibilidades de ocurrir o consecuencias reducidas.
- Grado III: Modos de fallo para los que la información disponible resulta, a todas luces, insuficiente aunque se estiman factibles y con consecuencias potenciales de magnitud elevada. Requieren una campaña de investigación urgente.
- Grado IV: Modos de rotura descartados y cuya aparición no se considera razonable.

Tras la gradación, cada uno de los asistentes dispone de unos minutos para exponer los motivos para sus asignaciones, especialmente los grados I y II, que implican mayor posibilidad de aparición. Tras esta primera serie, se repite la asignación, dando a cada asistente la posibilidad de cambiar o matizar sus valoraciones. Es esta segunda asignación la que emplea el *facilitador* para elaborar las gradaciones finales.

2.3 Conclusiones sobre la identificación de modos de fallo realizada en las presas de la CHD

Las principales conclusiones que se derivan, a nivel general, de las sesiones de modos de fallo llevadas a cabo para las presas gestionadas por la CHD son las siguientes:

- El alto número de asistentes que ha habido en todas las sesiones. Este hecho ha sido decisivo de cara a obtener un amplio rango de opiniones y de información.
- El alto grado de participación de todos los asistentes a cada sesión. Este aspecto ha sido clave para generar un debate abierto que, en muchos casos, ha permitido la detección y discusión de problemas en las distintas instalaciones. Es de destacar la utilidad de los diversos enfoques de los asistentes, procedente de la diversidad en sus roles y experiencias en la historia de la explotación de cada una de las presas.
- Por último, destacar que el hecho de que la mayor parte de los asistentes hayan gradado todos los modos de fallo identificados y hayan estado presentes hasta el final de las correspondientes sesiones ha sido fundamental para obtener, en cada presa, una asignación de grado final de cada modo de fallo acorde con lo propuesto por cada participante.

3 DESARROLLO DE MODELOS DE RIESGO CUANTITATIVOS

Una vez perfeccionada y validada la metodología mediante los casos piloto (Actividad A) e identificados los modos de fallo de todas y cada una de las presas (Actividad B), el siguiente paso consiste en el desarrollo de los modelos de riesgo, trabajo que se está desarrollando en la actualidad. Para ello, las actividades que hay que llevar a cabo son las siguientes:

- Modelación de las cargas
- Modelación de la respuesta del sistema

- Modelación de las consecuencias
- Arquitectura de los modelos de riesgo
- Cálculo y evaluación de riesgo para la situación actual
- Modelación y evaluación de medidas de reducción de riesgo.

En los siguientes subapartados se explica el estado de los trabajos para cada una de las anteriores fases.

3.1 *Modelación de las cargas*

El primer paso para la modelación de las cargas es la caracterización hidrológica (siendo una zona de baja sismicidad, no se encontraron riesgos sísmicos de entidad durante la Actividad B), que precisa obtener los hidrogramas de entrada al embalse para diferentes periodos de retorno. En la mayoría de los casos se ha podido emplear la hidrología proporcionada por los Informes de Seguridad; sin embargo, en dos de los sistemas estudiados se ha optado por realizar una nueva hidrología, aprovechándose para obtener resultados estacionales que permitirán realizar cálculos de riesgo más precisos y obtener conclusiones más útiles para la gestión de los embalses.

Para la modelación de las cargas también es conveniente conocer el registro de niveles históricos. Esta información estaba disponible en el Archivo Técnico de la mayoría de las presas. En los pocos casos en los que no se ha contado con esta información, se ha obtenido un registro sintético a partir de un modelo de simulación de recursos hídricos o, para las presas de menor entidad, se han supuesto niveles de partida a la cota del NMN.

El tercer apartado en la modelación de las cargas es la fiabilidad de compuertas. Esta estimación se ha realizado gracias a la información proveniente de diferentes fuentes: Informes de Seguridad, personal relacionado con la explotación de la presa, visitas a las instalaciones por parte de OFITECO e iPresas, etc.

Finalmente, el último punto en la modelación de las cargas es la laminación de las avenidas. Para llevarla a cabo, además de la información sobre el embalse y la presa, es necesario conocer las normas de gestión de avenidas que se apliquen en cada presa. Esta información se ha encontrado en la mayoría de los casos en el documento de Normas de Explotación y se ha complementado con la información aportada por los encargados de la explotación. Ver (Serrano-Lombillo et al., 2011b) para una explicación más detallada de la metodología empleada.

3.2 *Modelación de la respuesta del sistema*

Esta fase del trabajo ha consistido en trasladar aquello que se había capturado de forma cualitativa durante la Actividad B (Identificación de Modos de Fallo) a los modelos numéricos. Se han considerado los siguientes tipos de modos de fallo:

- Modos de fallo por sobreevertido. Se ha incluido un modo de fallo por sobreevertido en cada una de las presas. Para cuantificar la probabilidad se han empleado las curvas propuestas en (Escuder et al., 2011).
- Modos de fallo por deslizamiento. En todas las presas de gravedad se ha incluido un modo de fallo por deslizamiento. Para realizar la caracterización geotécnica necesaria para alimentar los modelos de Monte Carlo empleados ha sido de mucha ayuda la información recogida en los Informes de Modos de Fallo (Actividad B) y en los Informes de Seguridad.
- Modos de fallo por erosión interna. Para la estimación de probabilidades condicionales de fallo, se ha empleado una metodología propuesta por el USBR y el USACE (USBR 2011) que combina el uso de la información existente con el juicio de experto en sesiones de grupo.
- Resto de modos de fallo. El resto de modos de fallo que se identificaron durante la Actividad B para su inclusión en los modelos de riesgo y que no han sido cubiertos por los anteriores, han sido modelados en detalle y sus probabilidades se han estimado mediante juicio de experto.

3.3 Modelación de las consecuencias

El último paso antes de poder realizar los cálculos de riesgo es la modelación de consecuencias. Para ello es necesario seguir el siguiente proceso (para más detalle, ver (Serrano-Lombillo et al., 2011c)):

- Modelación de la rotura, estimación de los hidrogramas de rotura y estimación de las llanuras de inundación. En aproximadamente la mitad de las presas estudiadas se han podido conseguir y reutilizar los modelos hidráulicos para poder realizar un estudio paramétrico en detalle. En el resto de casos, se han empleado directamente las llanuras de inundación obtenidas en los Planes de Emergencia, interpolando a partir de los casos estudiados en ellos. En general, se han modelado casos distintos según la altura de agua en el embalse en el momento de rotura y según el modo de fallo. También se han modelado los casos de avenida sin rotura para poder realizar los cálculos de riesgo incremental.
- Estimación de pérdida de vidas y de daños económicos. A partir de las características de la inundación obtenidas en el punto anterior, para cada caso estudiado se ha realizado una estimación de la pérdida de vidas empleando la metodología SUFRI (Escuder-Bueno et al., 2011) y de los daños económicos empleando la metodología PATRICOVA (COPUT 2002).

3.4 Arquitectura y cálculo de los modelos de riesgo

Una vez calculados todos los inputs al modelo de riesgo sólo queda definir la arquitectura del mismo para poder realizar los cálculos. La Figura 3 muestra el modelo de riesgo de una de las presas modeladas, implementado mediante el software iPresas (Serrano et al., 2009). En el momento de escribir el presente artículo se están llevando a cabo los cálculos detallados para todas las presas del Duero, y ya se han obtenido algunos resultados preliminares que han ofrecido algunas primeras conclusiones.

3.5 Modelación de medidas de reducción de riesgo

Por último, para poder dar el paso deseado hacia la implantación de un sistema de gestión de la seguridad basado en riesgo, es necesario modelar el efecto que las posibles medidas de reducción de riesgo tendrán. Para ello, hay que estimar, por un lado, su efecto sobre las distintas variables del modelo (por ejemplo, unas inyecciones podrán reducir la probabilidad de fallo a deslizamiento, una renovación de los órganos de desagüe mejorará su fiabilidad, la instalación de unos nuevos piezómetros o un aumento en su frecuencia de lectura pueden

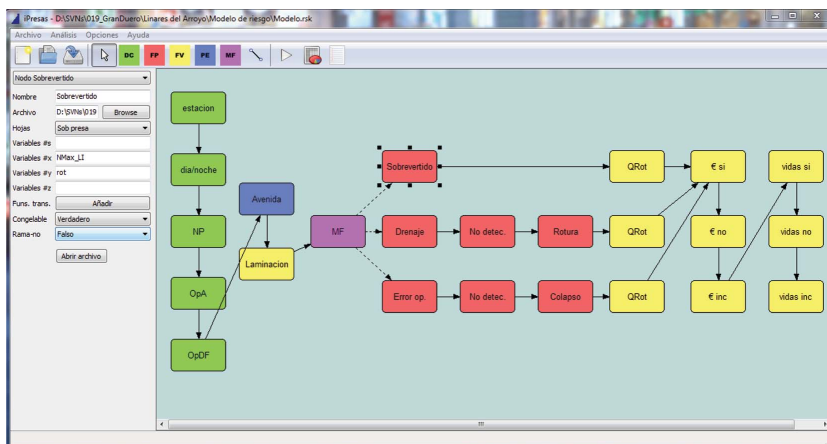


Figura 3. Modelo de riesgo de una presa mediante el software iPresas.

mejorar la capacidad de detección e intervención de algún modo de fallo, etc.), y por otro lado su coste. En este segundo punto, puede ser interesante consultar en (Solera-Solera et al., 2011), donde se detalla la metodología empleada para estimar el coste que supone la aplicación de resguardos de seguridad.

4 IMPLANTACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE RIESGO

Una vez desarrollados los modelos de riesgo de todas las presas de la CHD, el siguiente paso será integrarlos en el proceso de toma de decisiones. El objetivo será que las decisiones de inversión de seguridad puedan ser fácilmente evaluadas mediante los modelos de riesgo y comparadas entre sí. Además, según se vaya recibiendo nueva información, ésta podrá ser integrada para tener el perfil de riesgo de la cuenca caracterizado en todo momento.

Un sistema así implementado tendrá las siguientes ventajas:

- Poder defender de forma más objetiva la necesidad de financiación para cualquier inversión en seguridad de presas.
- Poder seleccionar, en un contexto de limitación presupuestaria, aquellas medidas que sean más eficientes en la reducción de riesgo.
- Poder detectar cuáles son las presas y los modos de fallo que más riesgo y/o probabilidad de rotura están aportando al conjunto.
- Poder defender de forma justificada y transparente el proceso de toma de decisiones.

5 CONCLUSIONES

Tras el arranque del programa de seguridad basado en riesgo en la CHD con la realización de varios casos piloto, en la actualidad se están extendiendo dichas actividades al conjunto de presas gestionadas por el organismo.

A lo largo de 2010 se llevó a cabo la identificación de modos de fallo en todas las presas de la CHD, siendo destacables tanto el alto número de asistentes que ha habido en todas las sesiones celebradas así como su grado de participación.

Partiendo de esta identificación de modos de fallo cualitativa se están desarrollando en la actualidad los modelos de riesgo cuantitativos, estando muy avanzados los trabajos. Una vez desarrollados los modelos de riesgo de todas las presas de la CHD, el siguiente paso será integrarlos en el proceso de toma de decisiones, buscando obtener ventajas en la justificación, eficiencia y transparencia de las decisiones en materia de seguridad.

REFERENCIAS

- Altarejos García, Luis Escuder, Bueno, Ignacio, G. de Membrillera Ortuño, Manuel & Serrano Lombillo, Armando. 2010. Estimación de la probabilidad de fallo de presas de hormigón en el contexto del análisis de riesgos. *IX Jornadas Españolas de Presas*. ISBN 978-84-92626-68-7.
- Ardiles, L., Jenaro, E., Moreno, P., Escuder, I., Membrillera, M., Pérez, O. & Serrano, A. 2008. Modelo de riesgo de las presas de Camporredondo y Compuerto (río Carrión). *VIII Jornadas Españolas de Presas*. Córdoba.
- COPUT (Conselleria D'Obres Públiques Urbanisme i Transports Generalitat Valenciana), 2002. Plan de Acción Territorial de Carácter Sectorial sobre Prevención de Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana (PATRICOVA).
- Escuder-Bueno, I., Castillo-Rodríguez, J.T., Perales-Momparler, S. & Morales-Torres, A. 2011. SUFRI Methodology for flood risk evaluation in urban areas. Decision guidance for decision maker. Report SUFRI project. WP3. September 2011.
- Escuder-Bueno, I., Serrano-Lombillo, A., Fluixá-San-Martín, J. & Morales-Torres, A. 2011. Evaluación de la seguridad hidrológica de presas mediante modelos de riesgo simplificados. *Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security, and Critical Infrastructure Management. Proceedings of the 3IWRDD-FORUM* (Valencia, Spain, 17–18 October 2011).

- Sanz, D., Bernabé, J.C. & Escuder, I. 2010. Confección de un modelo de riesgo para la presa de Castrovido. *IX Jornadas Españolas de Presas*. Valladolid.
- Serrano, A., Escuder, I.G., de Membrillera, M. & Altarejos, L. 2009. iPresas: software for risk analysis. *23rd ICOLD Congress*. Brasilia.
- Serrano-Lombillo, A., Escuder-Bueno, I., de Membrillera-Ortuño, M.G. & Altarejos-García, L. 2011a. Methodology for the Calculation of Annualized Incremental Risks in Systems of Dams. *Risk Analysis*, 31: 1000–1015. doi: 10.1111/j.1539-6924.2010.01547.x.
- Serrano-Lombillo, A., Fluixá-Sanmartín, J. & Espert-Canet, V.J. 2011b. Flood routing studies in risk analysis. *Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security, and Critical Infrastructure Management. Proceedings of the 3IWRDD-FORUM* (Valencia, Spain, 17–18 October 2011).
- Serrano-Lombillo, A., Morales-Torres, A. & García-Kabbabe, L.A. 2011c. Consequence estimation in risk analysis. *Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security, and Critical Infrastructure Management. Proceedings of the 3IWRDD-FORUM* (Valencia, Spain, 17–18 October 2011).
- Solera-Solera, A., Morales-Torres, A. & Serrano-Lombillo, A. 2011. Cost estimation of freeboard requirements in water resources management. *Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security, and Critical Infrastructure Management. Proceedings of the 3IWRDD-FORUM* (Valencia, Spain, 17–18 October 2011).
- USBR (United States Bureau of Reclamation) in cooperation with USACE (United States Army Corps of Engineers). 2011. Dam Safety Risk Analysis Best Practices Training Manual. Denver, Colorado.