

**Análisis y evaluación de riesgos de inundación: estimación del
impacto de medidas estructurales y no estructurales**

por

Ignacio Escuder
Universidad Politécnica de Valencia

Enrique Matheu
Department of Homeland Security, USA.

Jessica Castillo
Universidad Politécnica de Valencia

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. RIESGO DE INUNDACIÓN E IMPLICACIONES LEGISLATIVAS EN ESPAÑA	5
3. MEDIDAS FRENTE AL RIESGO DE INUNDACIÓN.....	7
4. HERRAMIENTAS EXISTENTES PARA LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN.....	8
5. CRITERIOS DE TOLERABILIDAD PARA EL RIESGO DE INUNDACIÓN.....	12
6. EVALUACIÓN Y GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN FLUVIAL Y PLUVIAL	15
7. EVALUACIÓN Y GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN POR ROTURA DE PRESAS.....	22
8. EVALUACIÓN Y GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN POR ACCIONES ANTRÓPICAS (SABOTAJE, VANDALISMO Y TERRORISMO)	29
8.1 Introducción.....	29
8.2 Metodología “DAMSE”.....	29
8.3 Hacia la integración de los riesgos antrópicos en la gestión de seguridad de presas y otras infraestructuras	34
9. CASO PRÁCTICO DE ESTIMACIÓN DEL IMPACTO DE MEDIDAS DE CONTROL DEL RIESGO DE INUNDACIÓN	35
10. CONCLUSIONES Y RETOS	39
AGRADECIMIENTOS.....	40
REFERENCIAS	40

1. INTRODUCCIÓN

La importancia que la gestión del riesgo de inundación tiene en un país moderno, así como sus implicaciones no sólo ingenieriles sino sociales, culturales, educacionales y de comunicación, entre las más importantes, son las razones que inspiran la redacción de esta ponencia en el contexto de la “Jornada Técnica sobre tipología, evaluación y gestión de riesgos de inundación” organizada por la Demarcación de Valencia del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

La Directiva 2007/60/EC de la Unión Europea define inundación como el cubrimiento temporal por agua de una tierra que normalmente no se encuentra cubierta. Por lo tanto, se incluyen las inundaciones producidas por ríos, torrentes, corrientes de agua efímeras mediterráneas e inundaciones marítimas en zonas costeras. En esta misma Directiva se define riesgo de inundación como la combinación de una probabilidad de presentación de un determinado evento, llamada amenaza, y las potenciales consecuencias adversas que tendría este evento para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural o las actividades económicas.

La publicación del Decreto 81/2010, de 7 de mayo, por el que aprueba el Plan Especial ante el Riesgo de Inundaciones en la Comunitat Valenciana así como del Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, son una muestra de las actividades que están acometiendo algunos de los principales organismos implicados en el control y gestión de riesgos de inundación en Valencia y en España.

Por otra parte, el entendimiento y el reconocimiento de los distintos factores de riesgo presentes en las actividades relacionadas con la seguridad de presas y embalses constituye la base conceptual para la confección de sistemas lógicos o modelos orientados a informar la toma de decisiones en seguridad de presas. El propio Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RD 16 de Enero de 2008) recoge la necesidad de contemplar la gestión del riesgo como un elemento fundamental de la Seguridad de las Presas, siguiendo el ejemplo de algunos de los países más desarrollados del mundo.

El contenido de esta ponencia parte del contexto legislativo y la evolución conceptual en el entendimiento del riesgo de inundación fluvial y pluvial, incluyendo la inundación por rotura de presas y por acciones antrópicas (sabotaje, vandalismo, terrorismo, etc.).

En cada uno de esos apartados se presentan distintas metodologías de análisis y evaluación de riesgos, y se incluye un caso práctico de estimación del impacto de medidas estructurales y no estructurales en la gestión de dichos riesgos.

La parte más metodológica del artículo (Apartados 6, 7, 8 y 9) es el resultado de una serie de Proyectos de Investigación, nacionales y europeos. Los más representativos son:

- SUFRI. Sustainable Strategies of Urban Flood Risk Management to Cope with Residual Risk. ERA-Net CRUE (2nd Call). Ministerio de Ciencia e Innovación (2009-2011).
- Aplicación del análisis de riesgos a los programas de conservación, mantenimiento, rehabilitación y gestión de la seguridad de presas y embalses. Ministerio de Ciencia y Tecnología, Plan Nacional de I+D+i (2006-2009).

- DAMSE. A European Methodology for the Security Assessment of Dams. European Commission. Directorate General Justice, Freedom and Security (2006-2008).

Este último proyecto, DAMSE, sentó las bases de la colaboración de los dos primeros autores de la presente ponencia, que han fructificado en una serie de actividades compartidas entre la Universidad Politécnica de Valencia y el Department of Homeland Security Norteamericano.

Por último, cabe mencionar que en la preparación de esta ponencia se han reproducido parcialmente textos de las siguientes publicaciones:

- “La gestión del riesgo en el ámbito de la seguridad de las presas de titularidad estatal de la Cuenca del Duero”. Ardiles, L.; Moreno, P.; Jenaro, E.; Fleitz, J.; Escuder, I. IX Jornadas Españolas de Presas. Valladolid. 2010 (Junio).
- “Modelos de riesgo para la ayuda a la toma de decisiones en gestión de seguridad de presas. Artículo. Serrano, A.; Escuder, I.; G. Membrillera, M.; Altarejos, L. IX Jornadas Españolas de Presas. Valladolid. 2010 (Junio).
- “Urban flood risk characterization as a tool for planning and managing”. Escuder, I.; Morales, A.; Perales, S. Workshop Alexandria March 2010. Exploration of Tolerable Risk Guidelines for Levee Systems
- “A european methodology for risk based security assessment of dams (damse): checking screening outcomes with DHS procedures”. USSD, Nashville, 2009. Escuder, I.; Meghella, M.; Membrillera, M.; Matheu, E.
- El proyecto "DAMSE" de la Unión Europea sobre seguridad física (frente acciones antrópicas) en presas y embalses. Artículo. Escuder, I.; Membrillera, M.; Meghella, M.; Serrano, A. VIII Jornadas Españolas de Presas. Córdoba (2008).

2. RIESGO DE INUNDACIÓN E IMPLICACIONES LEGISLATIVAS EN ESPAÑA

Comenzando por el “concepto” de riesgo de inundación, se entiende como tal la combinación de la probabilidad de ocurrencia de inundaciones con las consecuencias asociadas a dicha situación. En segundo lugar, el entendimiento de ambos factores (probabilidad de ocurrencia y consecuencias), explica de por sí cómo el riesgo es un concepto dinámico, dado que los factores que lo integran varían inexorablemente con el tiempo.

El reconocimiento efectivo de la doble componente del riesgo de inundación a nivel legislativo puede afirmarse que se produce en España en el año 1995, con la publicación de la “Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones” (BOE de 14 de Febrero de 1995).

La trascendencia de dicha norma legal consiste en el reconocimiento explícito de la componente de “consecuencias” como un factor determinante en el riesgo de inundación.

Además, la mencionada “Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones” adquiere una especial importancia al recoger la obligatoriedad de redactar Planes de Emergencia de Presas para aquellas que previamente hayan sido clasificadas como A o B en relación a su “riesgo potencial”.

La importancia que implícitamente se da a la componente de consecuencias pasa a ser de tal magnitud que el denominado “riesgo potencial” se establece exclusivamente en dicho texto legal en términos de consecuencias potenciales, correspondiendo las categorías A y B a aquellas presas de cuya rotura pudieran derivarse pérdidas de vidas humanas.

Más allá de esa importancia concedida a las consecuencias de inundación, la Directriz de 1995 impone a los propietarios de presas nuevas obligaciones derivadas del entendimiento completo del riesgo. Si hasta la década de los noventa los propietarios de presas se ocupaban fundamentalmente de gestionar la probabilidad de fallo de sus estructuras (mediante el cumplimiento de códigos como la Instrucción para el Proyecto Construcción y Explotación de Grandes Presas de 1967), a partir de 1995, con la obligación de redactar e implantar Planes de Emergencia, adquieren responsabilidades en la gestión de la componente de consecuencias.

Esta nueva realidad o “cambio de paradigma” constituye un fenómeno de carácter internacional y son numerosos los países que durante los años noventa incorporan legislación general de protección frente a inundaciones y específica de seguridad de presas donde se define la gestión de emergencias y se da un peso específico a tareas que, como la comunicación, sirven para disminuir notablemente el impacto de las inundaciones.

En España, el Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses de 1996, haciéndose eco de esta realidad, recoge todas las prescripciones que en materia de Planes de Emergencia de Presas habían sido promulgadas un año antes en la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones de 1995, dando un paso más allá al establecer que el criterio básico que debe guiar las actuaciones en seguridad de presas es el “riesgo potencial asumible”.

Si bien cabe discutir algunos aspectos de dicha definición, como lo redundante del carácter potencial del riesgo, o el término “asumible” (la comunidad internacional ha evolucionado muy rápidamente en este aspecto y hoy se entiende que el riesgo solo puede ser “tolerable”), constituye una profundización en dicho “cambio de paradigma”.

De hecho, los propios términos de “riesgo”, su “tolerabilidad”, la implicación de cómo se comunican dichos conceptos a la población e incluso el rol necesariamente distinto que adquieren los propietarios de presas respecto del resto de la sociedad por su nueva necesidad de comunicar y comunicar bien para llevar a cabo una gestión efectiva y eficiente del riesgo, constituyen un enorme reto.

La publicación en 2007 de la Directiva Europea de Inundaciones (2007/60/EC), incidiendo en el valor y la necesidad de disminución del riesgo mediante medidas estructurales y no estructurales, así como la publicación en 2008, en España, del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RD 16 de Enero de 2008), recogiendo la necesidad de contemplar la gestión del riesgo como un elemento fundamental de la Seguridad de las Presas (siguiendo el ejemplo de algunos de los países más desarrollados del mundo), corroboran la consolidación legislativa de esta evolución.

Por tanto, este cuerpo legislativo en España no solo se circunscribe al ámbito de presas sino que engloba todos los aspectos relacionados con las inundaciones, como se refleja por ejemplo en la publicación del Decreto 81/2010, de 7 de mayo, por el que aprueba el Plan Especial ante el Riesgo de Inundaciones en la Comunitat Valenciana, así como en el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, que constituye la transposición al ámbito español de la mencionada Directiva Europea de Inundaciones (2007/60/EC).

Establecido el contexto legislativo y la evolución conceptual en el entendimiento del riesgo de inundación en general y de inundación por rotura de presas en particular, aceptada técnica y científicamente la doble componente del riesgo de inundación, reconocida de forma explícita la variación en el tiempo de ambas, y asumido el nuevo papel de los distintos organismos competentes en la gestión de las consecuencias de inundación, queda en evidencia la necesidad de llevar a cabo acciones no estructurales, de forma sostenida en el tiempo, como una manera efectiva de disminuir el riesgo así como de impedir un sustancial incremento del mismo con el paso del tiempo.

3. MEDIDAS FRENTE AL RIESGO DE INUNDACIÓN

Existe una gran variedad en las medidas que pueden tomarse para reducir el riesgo de inundación. En general, estas medidas para reducir el riesgo se pueden dividir en dos grandes grupos: medidas estructurales y medidas no estructurales.

Comenzando por las segundas, las medidas no estructurales comprenden las políticas, advertencias, medidas para desarrollo del conocimiento, procesos legislativos y de participación pública y recopilación de información que permiten la reducción del riesgo (United Nations, 2009). Por ejemplo, en el caso de inundaciones estas medidas comprenden desde medidas de planeamiento urbano en zonas inundables hasta Sistemas Automáticos de Información Hidrológica (SAIHs). Las medidas estructurales proporcionan protección hasta un determinado evento, llamado evento de diseño, a partir del cual se produce la inundación. La aplicación de medidas no estructurales puede ayudar a reducir sus consecuencias, especialmente la pérdida de vidas. En cualquier caso, el riesgo no puede ser totalmente eliminado, por lo que siempre existe un riesgo residual.

Por su parte, las medidas estructurales consisten en cualquier construcción para reducir o evitar posibles impactos de inundaciones, lo que incluye medidas ingenieriles y construcción de estructuras resistentes a las amenazas y de protección. En el caso de las inundaciones, un ejemplo son las presas y los diques.

Para entender el papel de las presas en el contexto del riesgo total de inundación, éstas tienen una gran importancia en la reducción del mismo, ya que evitan la mayor parte de las inundaciones. Al mismo tiempo podrían llegar a suponer también un incremento del riesgo total de inundación, ya que su hipotético colapso estructural introduce una nueva fuente de riesgo. En general, este incremento es mucho menor que la reducción que producen estas estructuras en el riesgo de inundación total, ya que su fallo está ligado a probabilidades muy bajas de ocurrencia, aunque con altas consecuencias.

De hecho, solo en algunos casos pudiera llegarse al extremo de que una estructura aumente el riesgo de inundación total. Entre ellos:

- Si el estado de la estructura es muy pobre, lo que produce una probabilidad de fallo alta.
- Si existen áreas con muy alta vulnerabilidad que solo pueden ser inundadas por un colapso estructural.
- Si debido a la disminución de la percepción del riesgo de inundación por la existencia de la estructura, se planean nuevos asentamientos en áreas inundables.
- Si resulta verosímil que se produzcan acciones de sabotaje, vandalismo o terrorismo en la presa.

4. HERRAMIENTAS EXISTENTES PARA LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN

Existe una gran variedad de herramientas para la estimación del riesgo de inundación o de alguna de sus componentes. Como se muestra a continuación, estas herramientas pueden ser divididas en completas o parciales según caractericen las dos componentes del riesgo o solamente una de ellas. También pueden ser divididas en cuantitativas o cualitativas, según si obtienen o no un valor numérico para el riesgo.

- Herramientas parciales y cualitativas

Estas herramientas solo calculan una de las dos componentes del riesgo y de una forma cualitativa. En general, se suele tratar de mapas en los que se hace una estimación de la probabilidad de la amenaza, basada en la ocurrencia de eventos históricos de inundación (Figura 1) o en cálculos hidráulicos e hidrológicos simplificados.

Cuando estas herramientas se centran en la estimación de la vulnerabilidad, suelen definir zonas donde puede haber una gran vulnerabilidad o donde las inundaciones pueden producir importantes pérdidas humanas.

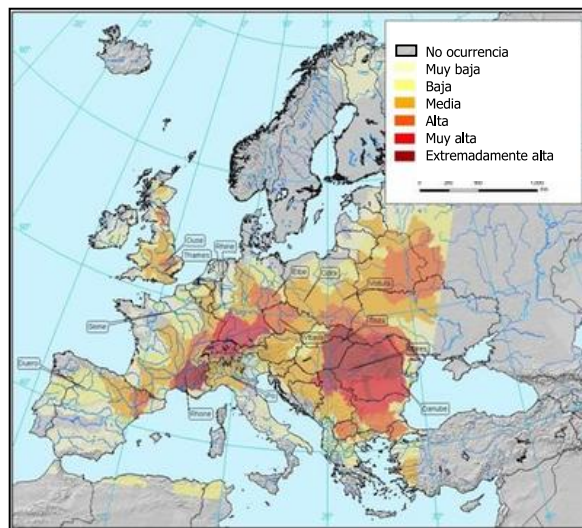


Figura 1. Mapa de los niveles de ocurrencia de inundación en Europa basado en los eventos históricos de inundación en el período 1998-2005 (EEA, 2006).

- Herramientas completas y cualitativas

Estas herramientas calculan ambas componentes del riesgo, aunque al menos una de ellas de forma cualitativa, por lo que se obtiene un resultado del riesgo cualitativo.

Estas herramientas pueden ser muy útiles para el planeamiento y la gestión, ya que identifican áreas donde el riesgo de inundación debe ser reducido, si bien su grado de detalle es menor que el de las herramientas cuantitativas.

Este tipo de herramientas también pueden ser muy útiles para estimar el riesgo asociado a consecuencias que difícilmente pueden ser cuantificadas, como las consecuencias medioambientales y culturales o el trauma social (ANCOLD, 2003).

Dentro de este tipo de herramientas, la más común son los mapas de riesgo obtenidos por una combinación de la estimación cuantitativa de la probabilidad de ocurrencia de una inundación con una estimación cualitativa de las consecuencias (Figura 2). Estas consecuencias se encuentran normalmente divididas en niveles según la profundidad de la inundación estimada.

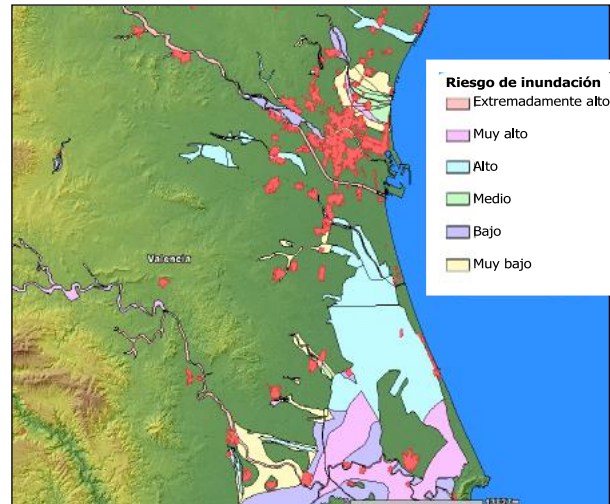


Figura 2. Mapa de riesgo de inundación en Valencia (COPUT, 2002).

- Parciales y cuantitativas

Este tipo de herramientas solo define una parte del riesgo, aunque de forma cuantitativa. Por lo tanto, se pueden dividir entre las herramientas que estiman la probabilidad de la amenaza y las que estiman la vulnerabilidad.

Dentro de las herramientas que definen la amenaza, las más comunes son los mapas de inundación, que muestran el área inundada para diferentes eventos asociados a unas probabilidades anuales de ocurrencia (Figura 3). El proceso que debe seguirse para desarrollar estos mapas consiste en un análisis histórico de las inundaciones, un análisis geomorfológico, un estudio hidrológico, una modelización hidráulica y por último, una calibración y comparación de los resultados (Sánchez, 2010).

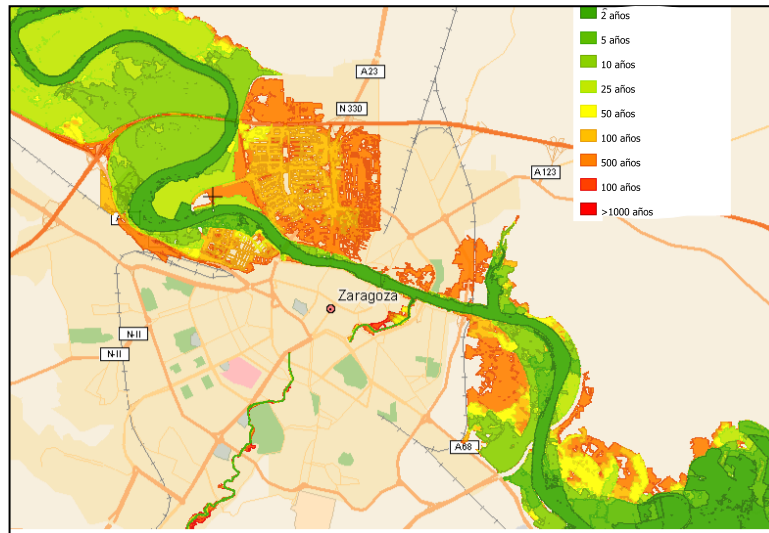


Figura 3. Mapas de inundación para diferentes períodos de retorno en Zaragoza (MMA, 2010).

Respecto a los métodos para analizar la vulnerabilidad, se basan en la cuantificación de las consecuencias de la inundación. Estas consecuencias suelen estar expresadas en pérdida de vidas o en consecuencias económicas. Respecto a la pérdida de vidas, la mayoría de las metodologías para su estimación están basadas en tasas de mortalidad fijas según el tipo de inundación y otros aspectos como el tiempo de aviso y la severidad de la inundación, ya que el estudio de los datos históricos de inundaciones revela que estas tasas suelen ser bastante constantes (Jonkman and Vrijling, 2008). Actualmente, otros métodos más sofisticados han sido desarrollados, simulando los diferentes procesos que tienen lugar durante una inundación, como los propuestos por Jonkman (Jonkman, 2007) y el modelo LifeSIM (Bowles and Aboleata, 2007), desarrollado en GIS.

Respecto a la estimación de consecuencias económicas, la mayoría de las estimaciones están basadas en los trabajos originales de Kates (Kates, 1965). Estas metodologías usan la profundidad del agua como parámetro base y se utilizan curvas calado-daños para estimar las pérdidas económicas dependiendo del valor del suelo (COPUT, 2002). Los métodos más recientes se pueden combinar con GIS y utilizan curvas calado-daños calibradas según el uso del suelo. En general, los costes indirectos se calculan como una fracción de los costes directos, aunque esta aproximación puede producir errores importantes.

- Completas y cuantitativas

Este tipo de herramientas permite cuantificar el riesgo tras cuantificar cada una de sus componentes. Un ejemplo de este tipo de herramientas podrían ser mapas de riesgo, en los que se dividiera el área de estudio en pequeñas celdas y se cuantificara el riesgo en cada una de ellas, obteniendo la distribución de riesgo. Sin embargo, actualmente la mayoría de mapas de riesgo no llegan a cuantificar el riesgo, aunque sí sus componentes, ya que suelen ser una combinación de mapas de inundación con una lista de afecciones y las consecuencias en cada una de ellas.

Otros tipos de herramientas cuantitativas y completas son las curvas F-N (Figura 4). Estas curvas representan la relación entre la probabilidad de ocurrencia de una amenaza y el número de víctimas que produce en una determinada área de estudio.

De esta forma, el área debajo de la curva es el riesgo social total en el área estudiada. Estas curvas muestran la distribución de la probabilidad de ocurrencia de un número de víctimas de una forma clara y sencilla, aunque no permiten un análisis directo de la distribución espacial del riesgo de inundación, como los mapas de riesgo.

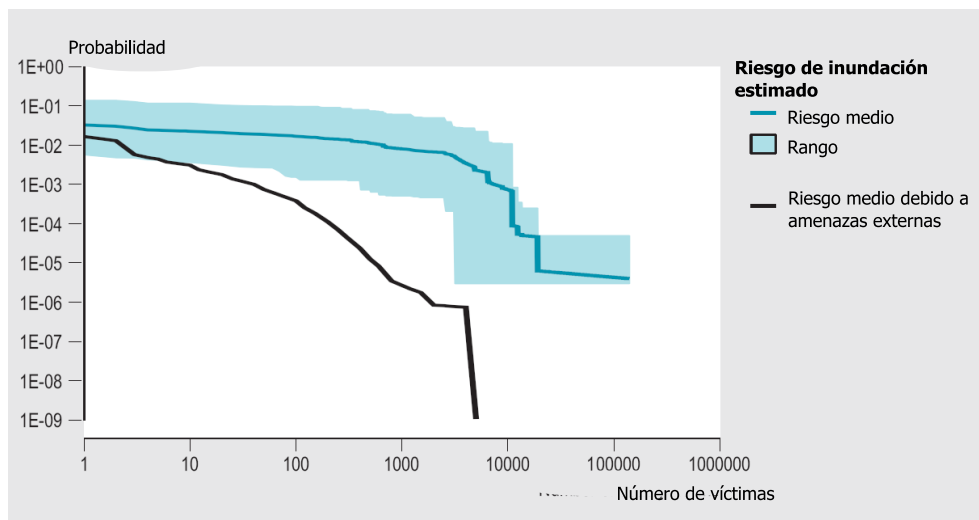


Figura 4. Curva F-N del riesgo de inundación en Holanda comparada con el riesgo de otras amenazas externas (NEAA, 2004).

Este tipo de curvas también pueden ser trazadas con consecuencias económicas, en lugar de pérdida de vidas.

5. CRITERIOS DE TOLERABILIDAD PARA EL RIESGO DE INUNDACIÓN

La definición de criterios de tolerabilidad para el riesgo de inundación es la base para la gestión del riesgo de inundación, ya que el concepto de riesgo tolerable es fundamental para la toma de decisiones (Munger et al, 2009).

En general, se pueden definir tres rangos generales de tolerabilidad. La primera región es la región de no aceptación, donde el riesgo existente solo puede ser justificado en circunstancias extraordinarias. La segunda región es el rango de tolerabilidad, donde el riesgo se encuentra bajo el límite de tolerabilidad. En esta región el riesgo debe ser analizado ya que solo es aceptado por la sociedad si cumple el principio ALARP (tan bajo como sea razonablemente posible). Por lo tanto, el riesgo solo es tolerable si su reducción es impracticable o si los costes de su reducción son desproporcionados. Por último, la región de amplia aceptación comprende el riesgo que puede ser considerado insignificante, ya que puede ser controlado adecuadamente.

La Figura 5 muestra esquemáticamente los rangos descritos anteriormente.

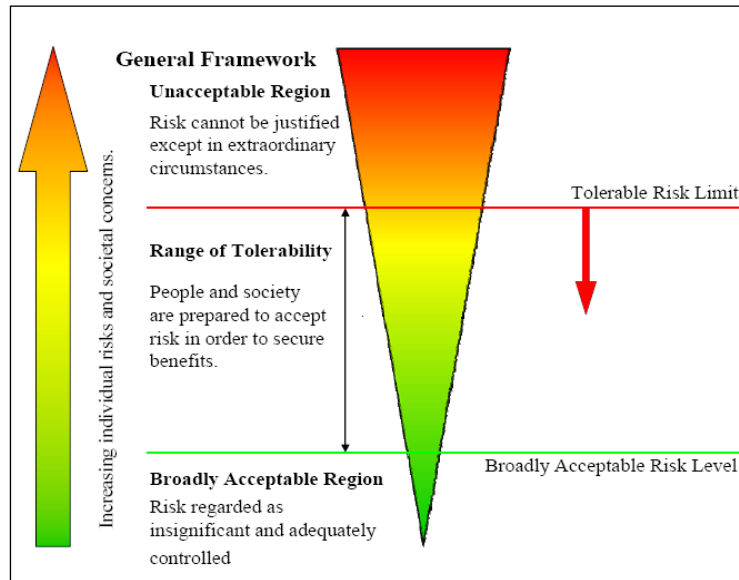


Figura 5. Representación conceptual de los rangos de tolerabilidad de riesgos (HSE, 2001).

Sin embargo, en la mayoría de países no se han desarrollado criterios legales para la tolerabilidad de los riesgos de inundación. En general, los pocos criterios desarrollados se pueden dividir en los que hacen referencia a la tolerabilidad del riesgo individual (riesgo que asume la persona más expuesta) y los que la hacen a la tolerabilidad del riesgo social.

Respecto a la tolerabilidad del riesgo individual, Holanda es el país con una legislación más avanzada, limitando este riesgo según un factor que depende de la voluntariedad para asumir el riesgo (Vrijling, 2001). Otras normas de este tipo, aunque menos desarrolladas, son las que limitan la probabilidad anual de ocurrencia de una inundación en zonas urbanas.

Respecto a los criterios para limitar el riesgo social, el más conocido es el desarrollado por Vrijling en 2001. Este criterio introduce unas rectas en las curvas F-N que permiten

delimitar el límite de tolerabilidad en estas curvas. Para ello utiliza diversos parámetros en función de la aceptación del riesgo y de las características de la población. El resultado de la aplicación de estos criterios en la provincia de South Holland para diversos valores de los parámetros se muestra en la Figura 6.

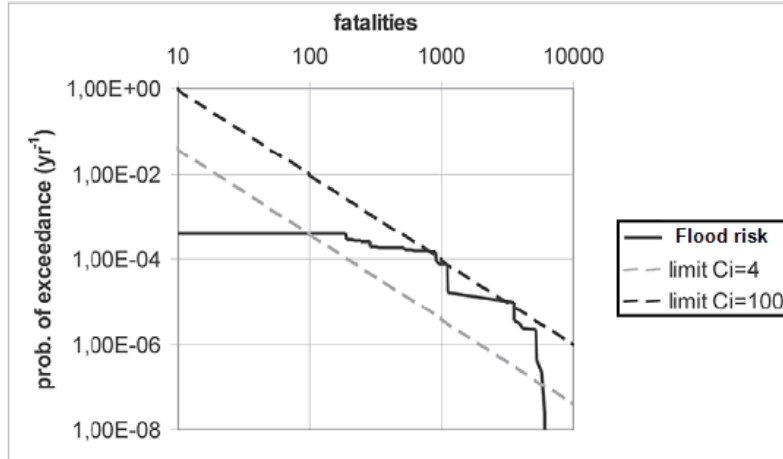


Figura 6. Ejemplo de aplicación de distintos criterios de tolerabilidad en South Holland sobre curvas F-N (Jonkman, 2007).

Introducidos los conceptos de riesgo individual, riesgo social y criterio ALARP cabe mencionar que cualquier criterio de tolerabilidad implica un equilibrio entre dos términos hasta cierto punto contradictorios entre sí como son los de “equidad” y “eficiencia”. Así, la equidad está relacionada con garantizar un nivel máximo razonablemente bajo de riesgo independientemente de lo eficiente que sea conseguirlo.

Profundizando en algunos aspectos metodológicos, si bien resulta muy ilustrativo caracterizar el riesgo global de inundación entendiendo las presas como una componente más integrada en un sistema, a la hora de definir criterios de tolerabilidad de riesgos asociados a presas, éstos se definen en términos incrementales, computando exclusivamente la diferencia entre los daños causados por la rotura de la presa y los que se habrían producido sin que dicha rotura aconteciera.

Como ejemplo de criterios de tolerabilidad existentes para el caso de riesgo incremental por rotura de presas, cabe destacar el esfuerzo conjunto de las tres principales agencias federales norteamericanas (Munger et al, 2009).

En particular, distinguen entre riesgo individual, que es equivalente a la probabilidad anual de fallo, y riesgo social, que requiere de contrastar con qué probabilidad anual se produciría un cierto número de víctimas. Además se distingue entre criterios de tolerabilidad para presas existentes y para presas nuevas o modificaciones significativas de las existentes. La Figura 7 muestra los mencionados criterios de tolerabilidad para el caso de presas existentes.

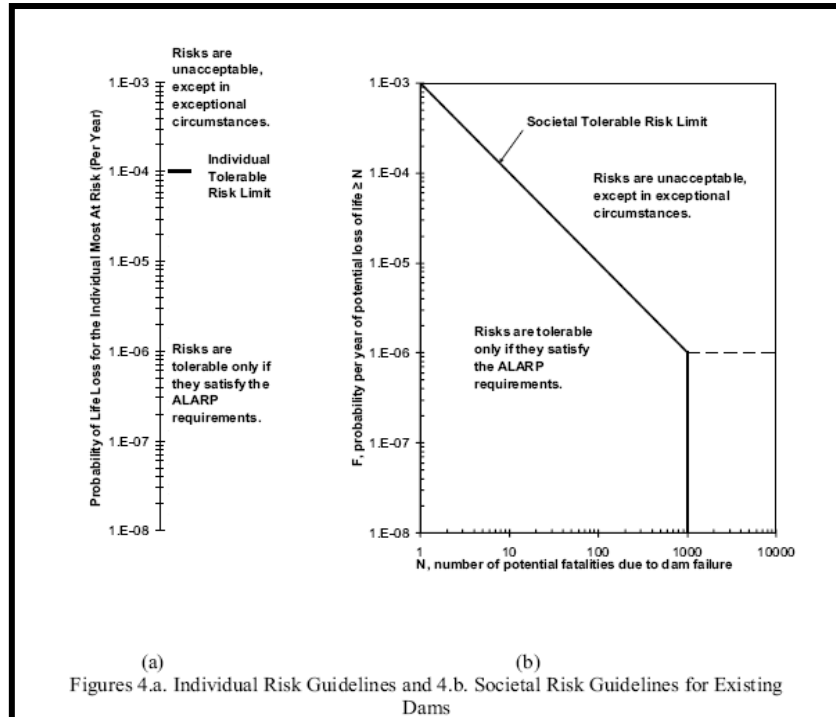


Figura 7. Criterios de tolerabilidad USACE para presas existentes (Munger et al., 2009).

Por último, la Figura 8 muestra los criterios de tolerabilidad que el USACE está estudiando adoptar para el caso de diques longitudinales en cauces.

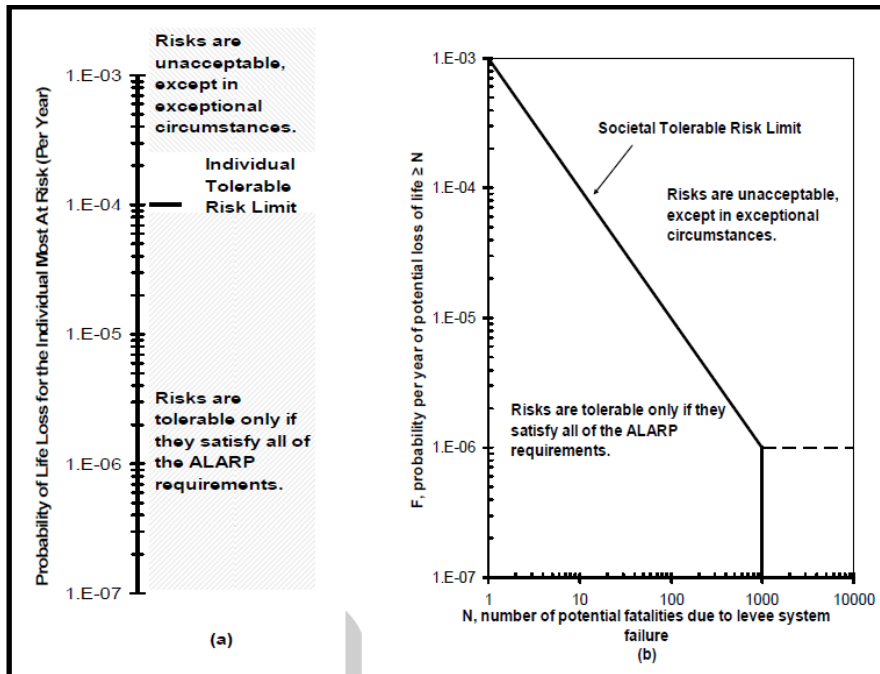


Figura 8. Criterios de tolerabilidad propuestos para diques (USACE, 2010).

6. EVALUACIÓN Y GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN FLUVIAL Y PLUVIAL

SUFRI (Sustainable Strategies of Urban Flood Risk Management with non-structural measures to cope with the residual risk) es un proyecto europeo cuyo principal objetivo es mejorar la gestión de riesgos de inundación mediante la utilización de medidas no estructurales. De esta forma, este proyecto pretende definir estrategias sostenibles de gestión del riesgo, incluyendo sistemas de advertencia, análisis de vulnerabilidad y comunicación del riesgo para optimizar el control de los desastres. Seis diferentes instituciones de cuatro países (Austria, Alemania, Italia y España) están trabajando dentro de la iniciativa ERA-Net CRUE en el período 2009-2011.

Los autores de esta ponencia están encargados del análisis del riesgo residual y de la vulnerabilidad. Para ello, se ha tenido que desarrollar una herramienta que permita caracterizar el riesgo residual y estudiar como las medidas no estructurales ayudan a reducir las consecuencias y consecuentemente el riesgo de inundación.

Tras estudiar las herramientas existentes para caracterizar el riesgo y la aplicación de criterios de tolerabilidad, se ha decidido desarrollar una curva del tipo F-N para cada entorno urbano, ya que este tipo de curvas permiten caracterizar el riesgo de una forma completa y cuantitativa y aplicar criterios de tolerabilidad del riesgo existentes.

La forma genérica de esta curva se muestra en la Figura 9, donde aparecen algunos valores numéricos típicos que deben ser particularizados para cada caso. Además también se puede utilizar una curva del mismo tipo que refleje las consecuencias económicas (Figura 10), ya que pueden ser muy útiles para gestionar el riesgo de inundaciones más frecuentes.

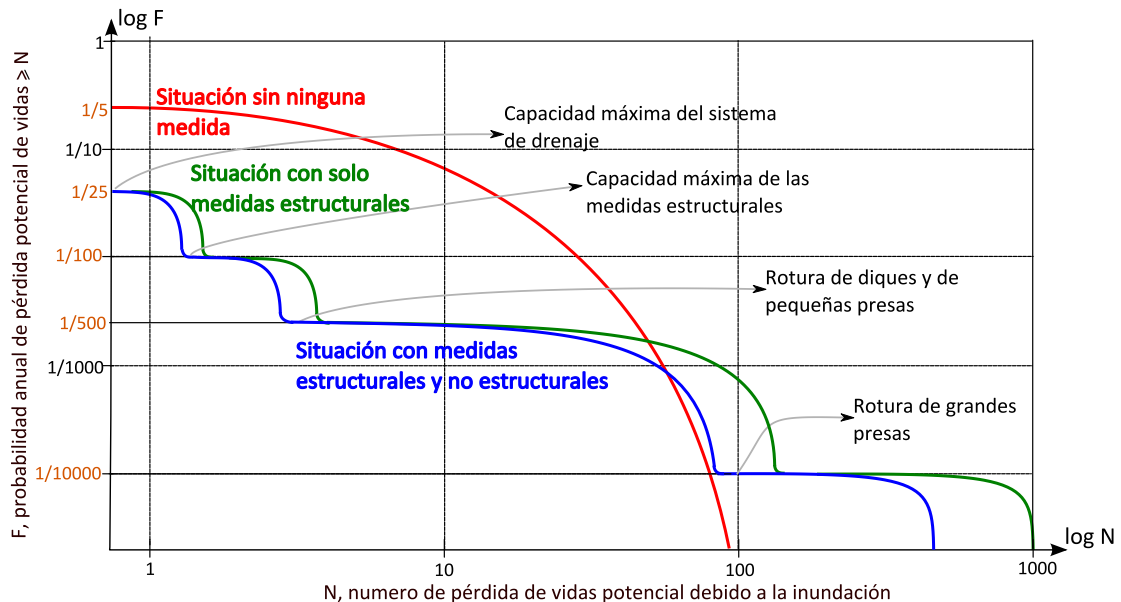


Figura 9. Efecto de las medidas estructurales y no estructurales en una curva F-N sobre el riesgo social de inundación.

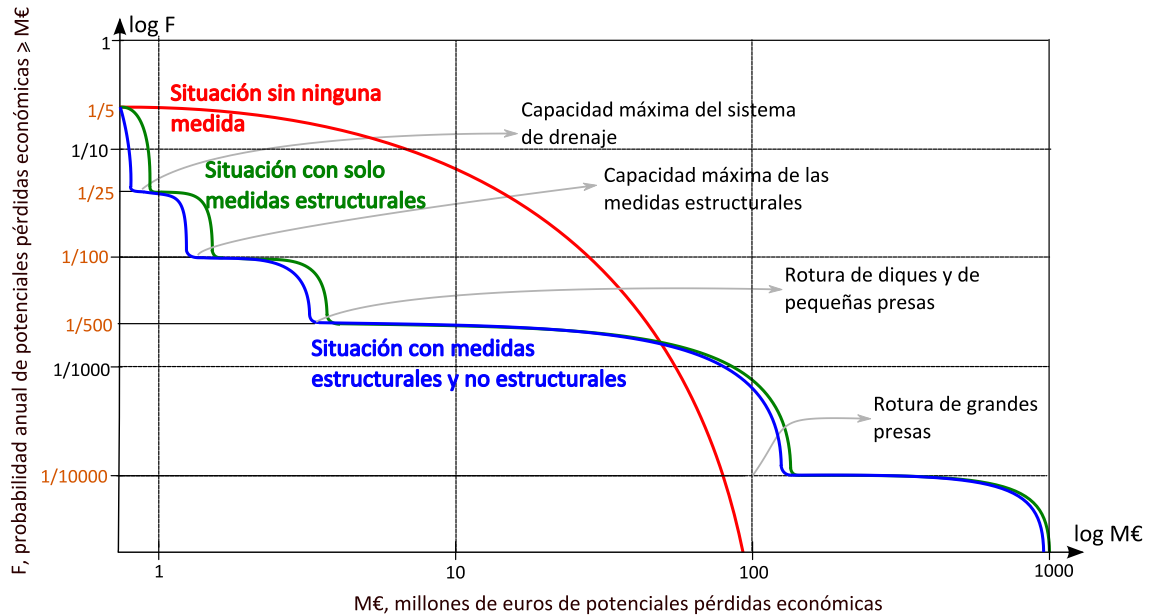


Figura 10. Efecto de las medidas estructurales y no estructurales en una curva F-M€ para riesgo de inundación.

La metodología, que estará en breve disponible en la dirección web www.ipresas.upv.es, detalla los procesos de trabajo necesarios para elaborar los modelos de riesgo en caso de inundación pluvial y fluvial, así como los procedimientos de análisis y preparación de datos para alimentar dichos modelos.

Los resultados obtenidos son directamente representables sobre gráficos F-N, pueden compararse con criterios de tolerabilidad y capturan el efecto de medidas estructurales y no estructurales en el “perfil de riesgo” de cualquier área urbana.

A continuación, se detallan algunos de los aspectos metodológicos desarrollados para la evaluación del riesgo de inundación pluvial y fluvial, dentro del Work Package 3 (análisis del riesgo residual y de la vulnerabilidad) del proyecto SUFRI.

La metodología desarrollada dentro del Work Package 3 del proyecto SUFRI se divide en diez fases, representadas en la Figura 11:

- Fase I. Definición del ámbito de estudio.
Establecimiento del ámbito de estudio, grado de detalle del estudio, información necesaria, adquisición de datos y nivel de recursos necesario.
- Fase II. Revisión de la información existente.
La información disponible tras la adquisición de datos y trabajos de campo condiciona el grado de detalle de los cálculos a realizar. Se estudia la variabilidad poblacional del caso de estudio y se definen zonas homogéneas según usos del suelo y tipología de edificación.

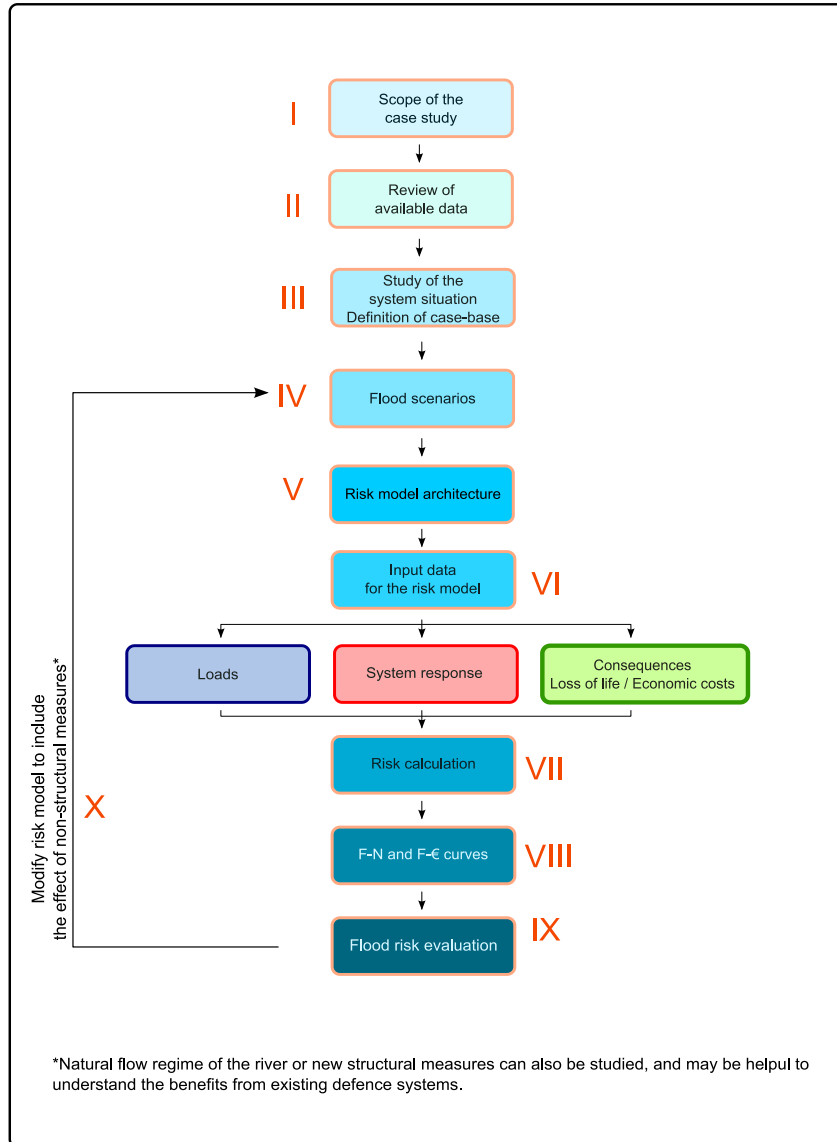


Figura 11. Fases de la metodología desarrollada en el proyecto SUFRI para la evaluación del riesgo de inundación en zonas urbanas.

- Fase III. Estudio de la situación actual. Definición del caso base.
Para evaluar la reducción del riesgo de inundación por aplicación de medidas no estructurales debe analizarse en primer lugar la situación actual, definiendo el caso base. El caso base representa la situación actual de la población frente al riesgo de inundación. Por tanto, se construye en primer lugar el modelo de riesgo del caso base.
- Fase IV. Definición de escenarios de inundación.
El modelo de riesgo incorpora la consideración de un rango de avenidas que debe ser representativo de todos los potenciales eventos de inundación que puedan presentarse en la población. Dentro de dicho

rango, se selecciona un número de posibles eventos de inundación (escenarios) para la estimación de consecuencias.

- Fase V. Arquitectura del modelo de riesgo.
Para la construcción del modelo de riesgo se propone en el proyecto SUFRI la utilización del software iPresas, desarrollado en la Universidad Politécnica de Valencia (Serrano et al, 2009). El software permite la representación de la situación correspondiente al caso base, distinguiendo generalmente tres partes en el diagrama de influencia para la arquitectura del modelo de riesgo: solicitudes, respuesta del sistema y consecuencias.
- Fase VI. Datos de entrada al modelo de riesgo.
El modelo requiere de datos de entrada en cada uno de los nodos que conforman la arquitectura del modelo del caso base. La metodología describe cómo obtener información para cada una de las tres partes identificadas anteriormente, especialmente en lo concerniente a consecuencias por inundación (distinguiendo pérdida de vidas humanas y pérdidas económicas).
- Fase VII. Cálculo del riesgo.
Una vez incorporados los datos de entrada, el software ejecuta el modelo y se obtienen los resultados en riesgo asociados a la situación actual (caso base).
- Fase VIII. Representación de curvas F-N.
Los resultados procedentes del modelo pueden representarse en curvas F-N (o bien, F-€, si se representan pérdidas económicas potenciales), permitiendo el estudio del caso base.
- Fase IX. Evaluación del riesgo.
Las curvas obtenidas pueden compararse con criterios de tolerabilidad existentes para evaluar el riesgo existente.
- Fase X. Incorporación y análisis del efecto de medidas no estructurales.
Una vez analizado el caso base, se desarrolla el modelo de riesgo para la situación con medidas no estructurales a partir del modelo generado para el caso base. En general, dado que las medidas no estructurales no afectan a las características de la inundación, su análisis sólo requiere de la modificación de datos de entrada al modelo en la parte de consecuencias. Por tanto, se reevalúa la fase VI para estimar las consecuencias asociadas a la situación con medidas no estructurales, para posteriormente ejecutar de nuevo el modelo y obtener las curvas F-N y F-€. De este modo, el caso base puede compararse con los resultados de la situación con medidas no estructurales y analizar el efecto en reducción del riesgo de dichas medidas.

La metodología SUFRI se desarrolla tanto para el análisis del riesgo de inundación fluvial como pluvial. En ambos casos, además de la descripción detallada de las fases anteriores, se incorporan diagramas de flujo (Figura 12) para asistir en todo el proceso y secuenciar los pasos a seguir para la construcción del modelo y la estimación de datos de entrada.

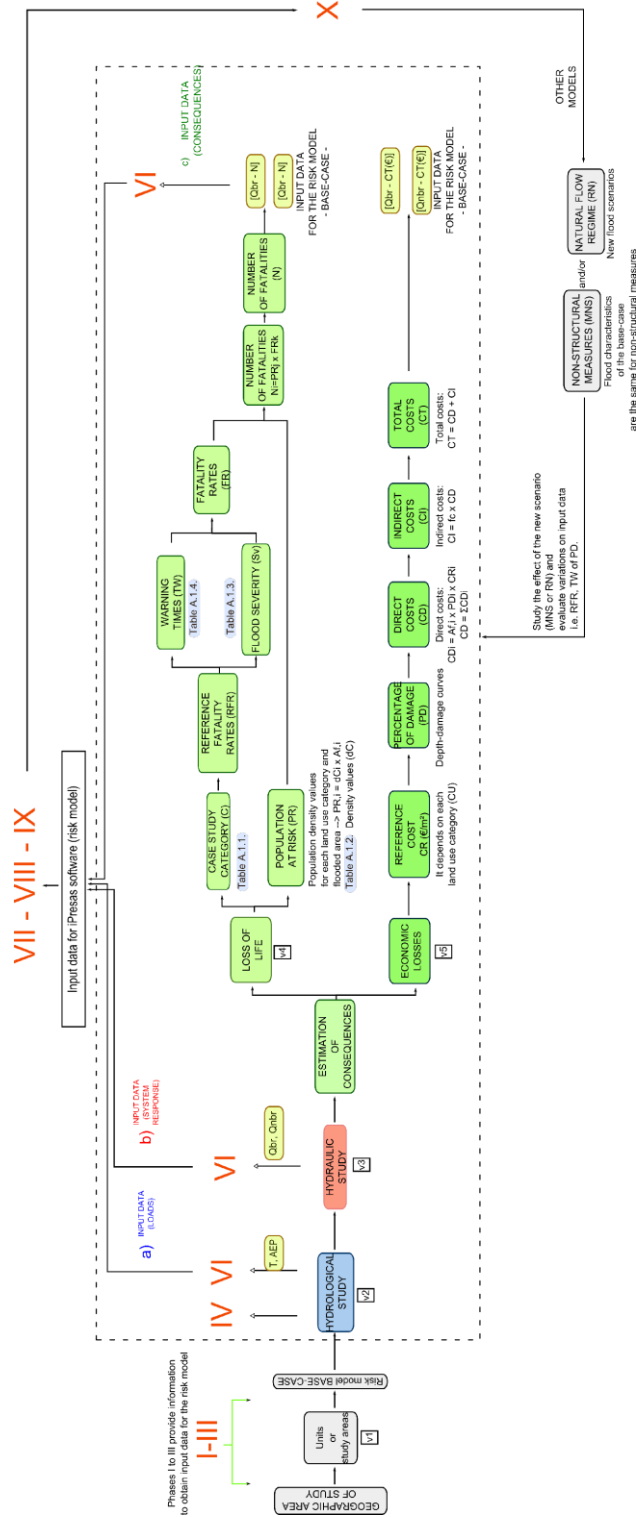


Figura 12. Diagrama de flujo general para el análisis de inundación fluvial (desarrollado específicamente para el proyecto SUFRI).

Se desarrolla, principalmente, la fase de estimación de datos de entrada al modelo en los nodos correspondientes al cálculo de consecuencias, identificando la información necesaria y estableciendo las variables para la estimación del número potencial de víctimas y pérdidas económicas potenciales de cada escenario de inundación.

En este punto se resumen las principales diferencias metodológicas en el análisis del riesgo por inundación fluvial y pluvial. La parte concerniente a la estimación de pérdida potencial de vidas como dato de entrada al modelo de riesgo requiere del establecimiento tanto de la población en riesgo como de las tasas de mortalidad asociadas a cada evento de inundación.

En inundación fluvial, la metodología SUFRI propone una clasificación de diez categorías para la población de estudio, atendiendo a la existencia de sistemas de alerta, coordinación entre servicios de emergencia y autoridades locales, medios de comunicación, formación a la población, etc. Cada categoría se relaciona con unas tasas de mortalidad de referencia, dependientes del tiempo de aviso existente y el grado de severidad de la inundación (Graham, 1999). La población en riesgo se obtiene de la población existente en el área inundada, corregida en función de la tipología de edificación.

En inundación pluvial, la metodología SUFRI propone una clasificación de tres categorías en base a la existencia de sistemas de aviso a la población. Cada una de estas categorías se asocia a cinco valores de tasas de mortalidad (Penning-Rowell et al, 2005) en función del grado de severidad de la inundación. La definición de la severidad de la inundación se basa en una clasificación que atiende a cuatro variables: calado de inundación (y), velocidad del flujo (v), al producto $v \cdot y$ y al producto $v^2 \cdot y$ (Tabla 1).

El establecimiento de los cinco niveles se fundamenta en criterios existentes en relación a las condiciones de estabilidad de personas expuestas al flujo en términos de estabilidad a deslizamiento, arrastre y vuelco (Gómez y Russo, 2009). La Figura 13 muestra la distribución del nivel de severidad en inundación pluvial en función del calado y velocidad.

Nivel de severidad (S)	Calado $y(m)$	Velocidad $v(m/s)$	Parámetro Vuelco $v \cdot y (m^2/s)$	Parámetro Deslizamiento $v^2 \cdot y (m^3/s^2)$
S0 No se esperan víctimas	<0.45	<1.50	<0.50	<1.23
<i>Severidad leve.</i>				
S1 Peatones pueden sufrir pérdida de estabilidad y dificultades para caminar.	<0.80	<1.60	<1.00	<1.23
<i>Severidad media.</i>				
S2 Significativas pérdidas de estabilidad. Vehículos pierden adherencia.	<1.00	<1.88	<1.00	<1.23
<i>Severidad elevada.</i>				
S3 Alto riesgo para personas situadas en el exterior. Arrastre de vehículos.	>1.00	>1.88	>1.00	>1.23
<i>Severidad extrema.</i>				
S4 Daños estructurales a edificios.	>1.00	>1.88	>3.00	>1.23

Tabla 1. Niveles de severidad en inundación pluvial (clasificación desarrollada específicamente para el proyecto SUFRI).

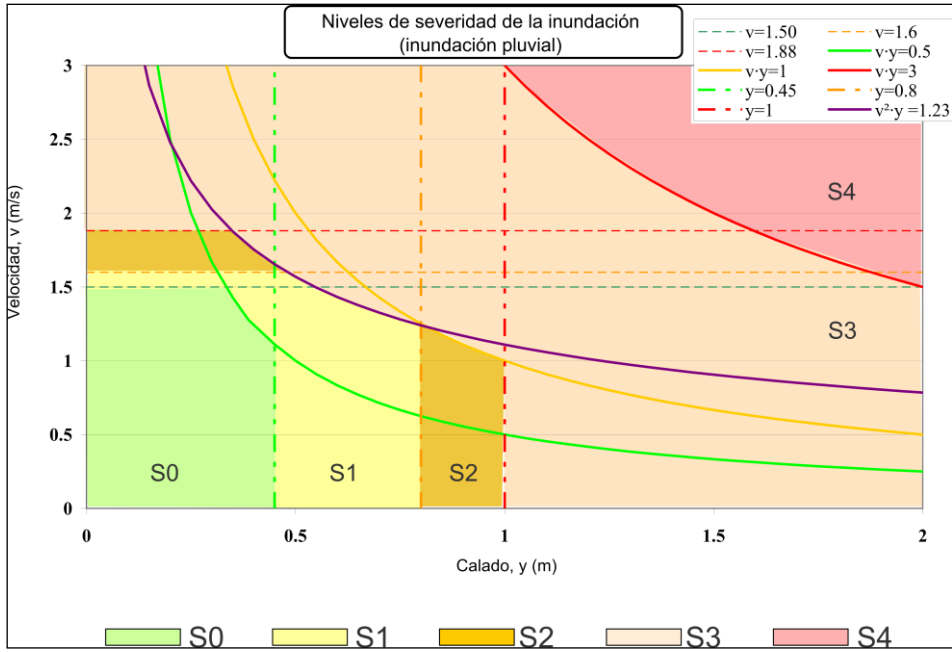


Figura 13. Gráfico para la obtención de niveles de severidad en inundación pluvial (desarrollado específicamente para el proyecto SUFRI).

En el Capítulo 9 de la presente ponencia se presenta un caso práctico de aplicación.

7. EVALUACIÓN Y GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN POR ROTURA DE PRESAS

Hasta la fecha, por razones históricas y técnicas, la seguridad de presas y embalses había estado encomendada a un enfoque meramente ingenieril, consistente en controlar los riesgos mediante el seguimiento de reglas y procedimientos sancionados por la práctica así como verificar coeficientes de seguridad, entendidos como una medida conservadora y prudente.

En particular, la necesidad de desarrollar una técnica de análisis de riesgos a partir de la cual llevar a cabo una gestión moderna, eficiente y transparente surge a partir de una serie de condicionantes como los que se describen a continuación:

- El envejecimiento del parque de presas (la mayoría de las estructuras supera los treinta años de antigüedad y, un porcentaje muy amplio los cincuenta años en explotación), así como la diferencia entre el conocimiento ingenieril actual y el existente cuando éstas fueron diseñadas y construidas.
- La demanda de mayores niveles de seguridad para la población y los bienes ubicados aguas abajo de las presas.
- La creciente demanda respecto de una mejor justificación del uso de los fondos públicos, incluyendo los programas de seguridad de presas.
- La necesidad de priorizar acciones correctoras para conseguir la mayor y más rápida reducción de riesgos posible.
- La práctica imposibilidad de construcción de nuevas estructuras por aspectos fundamentalmente sociales y medioambientales.
- La necesidad de optimizar la gestión de sistemas de recursos hídricos así como de aumentar la capacidad de regulación de los mismos para dar respuesta a una demanda de abastecimiento creciente y en una situación de aparente incremento de eventos climatológicos extremos (avenidas y sequías).

En este contexto de necesidad de mantenimiento de las infraestructuras hidráulicas, mejora de la explotación y aumento de la capacidad de regulación, resulta de especial importancia la estimación de riesgos relativos a la propia seguridad de la estructura así como los referidos a la capacidad de satisfacción de las demandas. Aún más, resulta imprescindible identificar niveles de riesgo tolerables y establecer programas integrales de gestión de la seguridad, incorporando indicadores de eficiencia en las inversiones.

Todo ello implica, a día de hoy, una continua inversión en investigación y desarrollo (por ejemplo incorporación de factores antrópicos y medioambientales de riesgo, mejoras continuas en las estimaciones y análisis de incertidumbre, desarrollos de software, etc.). Por tanto, puede decirse que el análisis, evaluación y gestión de riesgo requiere también de una componente formativa e investigadora continua.

En cualquier caso, la convivencia entre los estándares (códigos) de seguridad y las técnicas de análisis de riesgo como apoyo a la toma de decisiones no solo es conveniente sino necesaria, y se encuentra en la propia génesis de la elaboración de los denominados modelos de riesgo.

De hecho, el entendimiento y el reconocimiento de los distintos factores de riesgo presentes en las actividades relacionadas con la seguridad de presas y embalses, constituye la base conceptual para la confección de sistemas lógicos o modelos orientados a informar la toma de decisiones.

Comenzando por labores propias de la explotación de presas, éstas incluyen actividades de vigilancia como las inspecciones visuales, el seguimiento de los registros de la instrumentación instalada o las pruebas de funcionamiento de los equipos óleo-electro hidráulicos. De hecho, en el caso de que un modo de fallo haya comenzado y se encuentre progresando, la capacidad de detección e intervención para evitar el fallo o la rotura de la presa descansa en la eficacia de estas actividades.

Una vez detectado ese comportamiento que puede comprometer la seguridad de la presa y su embalse, la intervención se dirige tanto a la subsanación de la deficiencia como a la gestión de la emergencia en términos de protección a la población. La primera de dichas acciones trataría de disminuir la probabilidad de fallo y la segunda de la mitigación de las potenciales consecuencias de dicho fallo, normalmente mediante la puesta en marcha de actuaciones previstas en los planes de emergencia.

Otra de las actividades centrales de cualquier programa de seguridad de presas consiste en las revisiones periódicas de la seguridad, estudios en los que se caracterizan y actualizan los escenarios de sollicitación de la presa así como la respuesta del sistema en términos de márgenes de seguridad estimados.

En resumen, el conjunto de las actividades, estudios y procedimientos de gestión de la seguridad de presas y embalses que, para el caso español, es obligatorio documentar en las Normas de Explotación, Planes de Emergencia e Informes de de Revisión y Análisis de la Seguridad, implican vinculaciones con las distintas componentes del riesgo: las sollicitaciones, la probabilidad de fallo y las consecuencias.

Consecuentemente, si todos los procesos involucrados en la gestión de la seguridad de presas se integran en sistemas lógicos o modelos de riesgo capaces de agregar todos los factores o componentes del riesgo intrínseco a estas infraestructuras, se genera una información de gran valor añadido como ayuda a la toma de decisiones.

Para ello, los insumos al sistema o modelo de gestión tienen que convertirse en información que permita el reconocimiento, caracterización y cuantificación del riesgo. El proceso que comienza con la recopilación de datos para llegar a cuantificar el riesgo implica la consolidación del conocimiento existente sobre el sistema así como procedimientos de conservación y actualización de dicho conocimiento para integrarlo en un proceso necesariamente dinámico en el tiempo.

La consistencia, robustez, eficacia y eficiencia de la confección de modelos de riesgo para permitir informar la toma de decisiones se refuerza de distintas maneras. Una de las principales consiste en el intercambio de información, puesta en común de procedimientos o celebración de jornadas y eventos nacionales e internacionales, normalmente orientadas a propietarios y profesionales en la materia. Esta debe complementarse con la necesaria formación de todo el personal dedicado a la seguridad de presas.

En cualquier caso, la capacidad y la propia forma de comunicación con la población (y particularmente con la población aguas abajo de las presas) así como la existencia de una legislación clara que permita una integración entre criterios de diseño, requerimientos de seguridad, gestión de riesgo y responsabilidades legales, constituyen dos de las bases fundamentales para un proceso moderno, defendible, eficiente y socialmente válido de toma de decisiones en seguridad de presas y embalses.

La Figura 14 trata de representar el papel de los modelos de riesgo como herramientas que permiten integrar toda la información existente proveniente de las prácticas actuales en seguridad de presas para después informar la toma de decisiones. La Figura 14 explicita a su vez los vínculos con los documentos legales españoles con las necesidades de conocimiento para configurar modelos de riesgo.

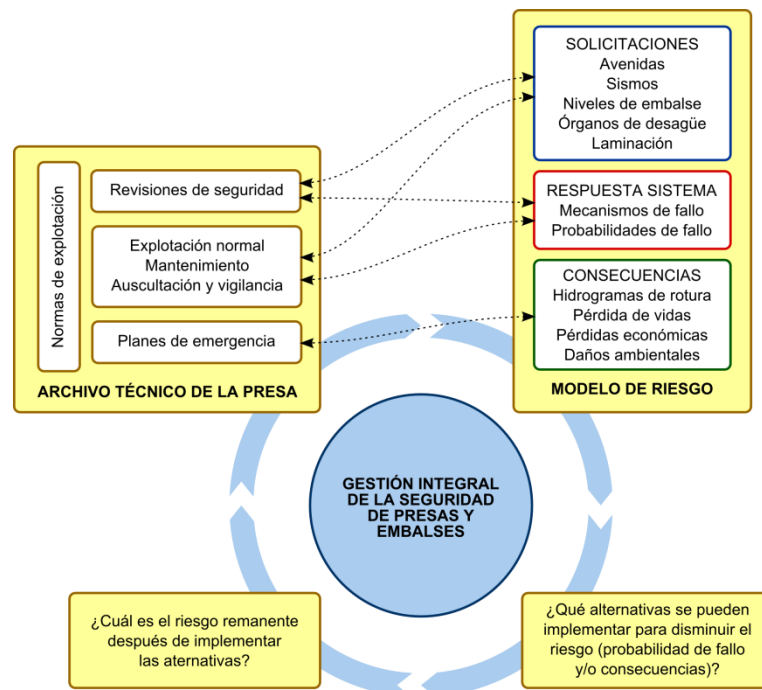


Figura 14. Vínculos entre los modelos de riesgo, documentos legales, áreas de conocimiento y la gestión integral de seguridad de presas (Serrano et al, 2010).

Como se observa en la Figura 14, el proceso de la gestión integral es esencialmente dinámico y conlleva una actualización continua de los modelos de riesgo y del Archivo Técnico.

Así, si bien cualquier “estándar” o código ingenieril tiene de por sí una limitación binaria (“cumple” vs. “no cumple”) y estática (cuando “se cumple” sería el final del proceso), los modelos de riesgo capturan el carácter continuado (“cumplir” sería un punto de partida y a partir de ahí hay que seguir trabajando para controlar el riesgo permanentemente) de las tareas de seguridad de presas.

Inciendo en este aspecto cabe remarcar que, incluso cumpliéndose estrictos estándares de seguridad, el hecho de no comunicar implicaría un aumento del nivel de riesgo, nivel de riesgo que es cuantificable y monitorizable mediante modelos de riesgo apropiados.

Resulta oportuno detallar los “procesos” involucrados en las tareas de análisis de riesgos así como los “procedimientos” existentes para elaborar modelos de riesgo. Igualmente, resulta de especial interés aclarar las relaciones entre aspectos de conocimiento (know-how), cálculo (software) y formación.

En primer lugar, los “procesos” vinculados al análisis de riesgos conllevan tareas de evaluación de la situación actual de las infraestructuras así como la posterior confección de modelos de riesgo, tal y como se muestra en la Figura 15.

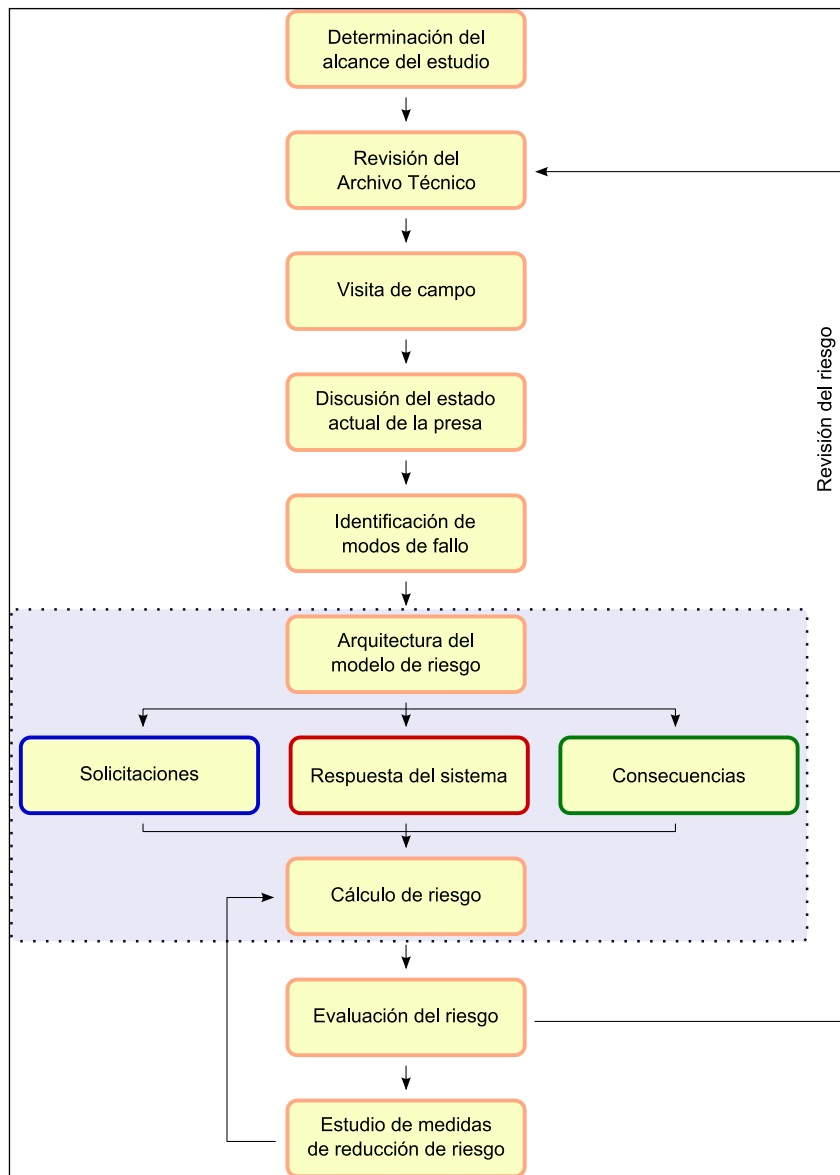


Figura 15. Procesos del análisis de riesgos.

En segundo lugar, los “procedimientos” vinculados a la estimación de riesgos requieren de un profundo “know-how” de cada componente del modelo, y de una herramienta integradora o “software de cálculo”.

La Figura 16 muestra los vínculos entre procedimientos (cajas verdes), know-how (texto externo a las cajas) y relaciones lógicas (flechas) para la computación de riesgos, tomando como ejemplo un modelo de riesgo apropiado en escenario hidrológico (situación de avenidas).

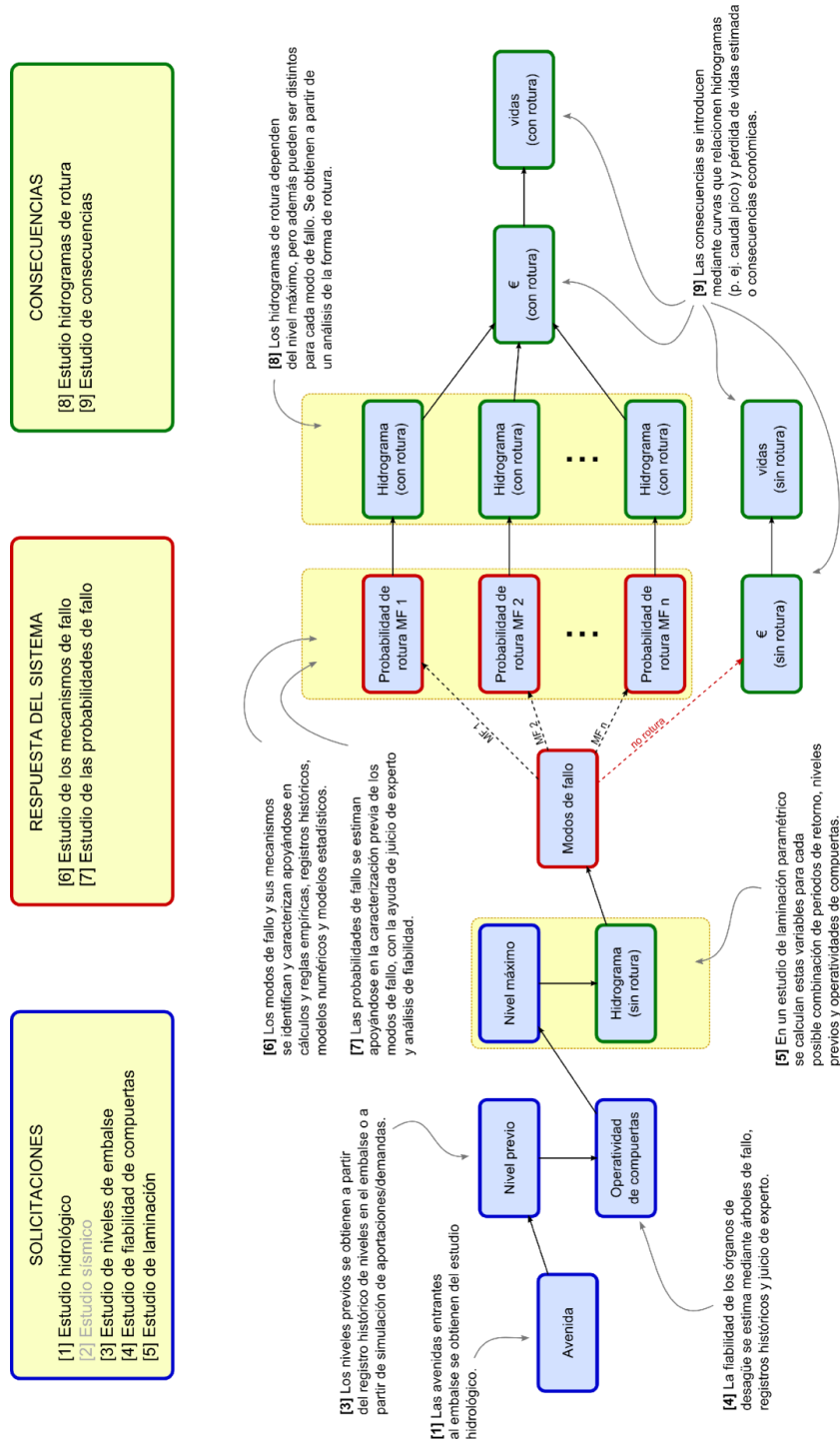


Figura 16. Procedimientos del análisis de riesgos.

Como ejemplo de elaboración de modelos de riesgo y su utilidad, puede citarse el trabajo realizado y actualmente en marcha para el conjunto de sistemas de presas explotados por la Confederación Hidrográfica del Duero (CHD).

Para ello se cuenta con la importante experiencia de haber desarrollado de forma completa el sistema Carrión (presas de Camporredondo y Compuerto) y de forma preliminar el sistema Pisuerga (presas de Cervera, Requejada y Aguilar de Campoo), experiencia que se completará con la adquirida durante el presente año con la presa de Castrovido.

Los trabajos mencionados han sido recogidos en diversos artículos (Ardiles *et ál*, 2009) y presentados en distintos foros: Valladolid en 2009, con ocasión de la celebración de la Jornada Técnica de Análisis y Evaluación de Riesgos organizada por la CHD, Brasilia en 2009, con ocasión de la 23 Edición del Congreso Internacional de Grandes Presas de ICOLD y más recientemente en Sacramento, en Abril de 2010, donde el Sistema Carrión fue seleccionado como uno de los seis casos de estudio de confección de modelos de riesgo por el Workshop internacional de "Case Histories in Dam Safety Risk Assessment", organizado por la Sociedad Norteamericana de Presas (USSD).

La Figura 17 muestra, como ejemplo, la arquitectura del modelo de riesgo del Carrión (presas de Camporredondo y Compuerto).

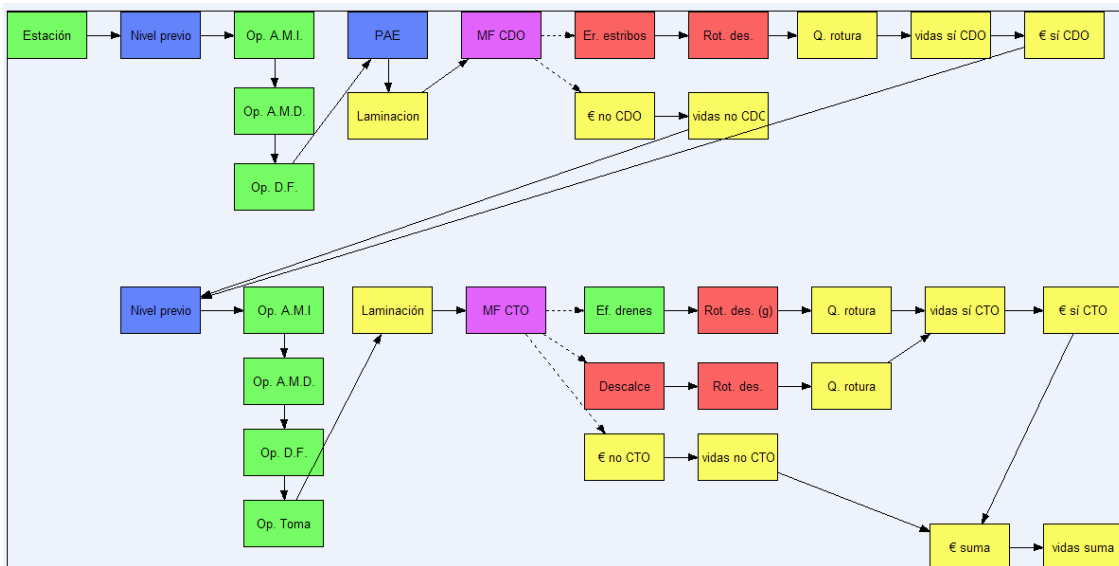


Figura 17. Arquitectura del modelo de riesgo del sistema Carrión.

A partir de los resultados del modelo pudieron establecerse una serie de consideraciones respecto a cuáles de las medidas recomendadas en los informes de seguridad eran más eficientes en cuanto a reducción de riesgo así como respecto de la propia explotación de las presas. En particular:

- Respecto de las medidas recomendadas en los Informes de Seguridad de las presas de Camporredondo y Compuerto, todas quedaron justificadas en términos de eficiencia, si bien, los resultados permitieron recomendar como priorizarlas: la más eficiente resultó la rehabilitación del sistema de drenaje en ambas presas, seguida de la implantación del Plan de Emergencia y de la rehabilitación de los equipos electro-óleo-hidráulicos.

- Por otra parte, como sistema, se observó que existe margen de transferencia de riesgo desde Compuerto hacia Camporredondo, presa esta última con un riesgo muy inferior a los estándares de tolerabilidad internacionales más exigentes.

Consecuentemente, este ejemplo permite visualizar algunos de los principales objetivos que se persiguen mediante la confección de modelos de riesgo para todos los restantes sistemas de explotación: disponer de una herramienta de gestión que ayude a tomar decisiones de inversión (fundamentalmente programar y priorizar actuaciones) así como permitir una continua monitorización y control del riesgo.

8. EVALUACIÓN Y GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN POR ACCIONES ANTRÓPICAS (SABOTAJE, VANDALISMO Y TERRORISMO)

8.1 Introducción

Particularmente desde el 11 de Septiembre de 2001, se ha incrementado la preocupación y conciencia sobre amenazas relacionadas con sabotaje, vandalismo y terrorismo que pudieran afectar a infraestructuras críticas por su potencial de producción de daños, con repercusiones prácticas de muy diversa índole.

En este contexto, proyectos como el DAMSE (A European Methodology for the Security Assessment of Dams. Grant Agreement No. JLS/2006/EPCIP/001 of the EPCIP-European Program for Critical Infrastructure Protection) han tenido como principal objetivo el desarrollo y verificación de una metodología basada en riesgo para la evaluación y gestión de aspectos de seguridad de presas frente a acciones de carácter antrópico.

El objetivo se consiguió a través de la beneficiosa interacción entre altamente cualificados usuarios finales de la metodología (propietarios de presas privados y públicos) y desarrolladores (especialistas en ingeniería de presas), formando un equipo europeo transnacional con profesionales de Austria, Italia y España.

Finalizados los catorce meses de trabajo, se celebró un Workshop Internacional en la ciudad de Valencia (España), los días 25 y 26 de Febrero de 2008. Durante el mismo, se expuso la metodología desarrollada, diversos casos de estudio (entre ellos un grupo de presas piloto de la Confederación Hidrográfica del Júcar) y la evaluación externa del proyecto realizada por los miembros del panel internacional.

A continuación se detalla la metodología DAMSE, así como algunas de las herramientas y tendencias actuales en la materia.

8.2 Metodología “DAMSE”

En los últimos años, distintas metodologías relacionadas con la evaluación y gestión de seguridad de presas frente a acciones antrópicas han sido desarrolladas en los Estados Unidos. Entre aquellas que más directamente se puede afirmar que han incidido en el proyecto DAMSE se encuentran las siguientes (Escuder et al, 2008):

- a) RAM-DSM y RAM-TSM metodologías desarrolladas por el Sandia National Laboratories for dams and transmission systems.
- b) DAMSVR desarrollada para FERC por William Foos & Associates.
- c) MATRIX Security Risk Analysis Program desarrollado para presas por el Bureau of Reclamation.
- d) CARVER, que consiste en una herramienta basada en listas de comprobación.
- e) RAMCAP, Risk Analysis and Management for Critical Asset Protection.

En cuanto al proyecto DAMSE propiamente dicho, los principales objetivos perseguidos se enumeran a continuación:

- a) Establecer un procedimiento de evaluación de amenazas que permita estimar la probabilidad de que un adversario perpetre un ataque a un elemento crítico para infringir unas determinadas consecuencias.
- b) Establecer un procedimiento para llevar a cabo una estimación de las consecuencias en caso de que un adversario sea capaz de interrumpir exitosamente, averiar o destruir una o todas las misiones de la presa y su embalse.
- c) Establecer un procedimiento sistemático para determinar la vulnerabilidad, es decir, la ineffectividad del sistema de protección frente a ataques antrópicos contra alguno de los elementos críticos de la presa.
- d) Desarrollar un procedimiento para completar una evaluación de riesgo que permita al gestor/propietario de presas evaluar el nivel de riesgo asociado a la amenaza, consecuencias e ineffectividad del sistema de protección, así como determinar las necesidades de implementar medidas de seguridad o de mitigación de consecuencias que sean más apropiadas para cada presa.
- e) Verificar y demostrar estos procedimientos para un grupo de presas, que previamente hayan sido identificadas mediante un procedimiento de cribado o "screening" entre un grupo proporcionado por los socios propietarios de presas del proyecto (usuarios finales).

Adicionalmente, resulta imprescindible aclarar que el riesgo es una función de diferentes factores: la probabilidad de ataque, la ineffectividad del sistema (complementario de la efectividad, si se prefiere) y las consecuencias. Por tanto, la metodología se basa en la consideración de los tres factores, tal y como se expresa a continuación:

$$R = R (P_A, (1-P_E), C)$$

donde:

P_A = Probabilidad de ataque de un adversario

C = Consecuencias del ataque de un adversario

$(1-P_E)$ = Probabilidad de que el ataque resulte exitoso (su complementario, P_E , representa la seguridad que aporta el sistema de que esto no vaya a suceder), y,

R = Riesgo asociado con el ataque del adversario.

Con respecto a los mencionados factores que componen el riesgo, resulta igualmente importante la consideración de cada uno de los actores principales en la gestión de este tipo de riesgos y sus diferentes papeles, tal y como se ilustra en la Figura 18. Los propietarios y en su caso co-propietarios son legalmente responsables de la seguridad integral de sus presas y deben decidir qué acciones implementar consistentemente con la evaluación del riesgo.

Las agencias de inteligencia o fuerzas de seguridad estatales como la policía y en su caso el ejército, son por otra parte los únicos que tienen acceso a información precisa sobre potenciales amenazas. Por último, las agencias encargadas de protección civil en emergencias son generalmente responsables de disponer de un sistema operativo

aprobado por el gobierno así como de los recursos necesarios para proteger a los civiles en caso de desastres naturales o tecnológicos.

En consecuencia, resulta relativamente sencillo establecer una serie de relaciones directas como Agencias de Inteligencia y la componente de amenaza en la ecuación del riesgo, los Propietarios de Presas y la eficiencia o ineficiencia del sistema, y las Agencias de Emergencias y las consecuencias. En cualquier caso, la necesidad de colaboración entre todos ellos es manifiesta y debe remarcarse en este punto.

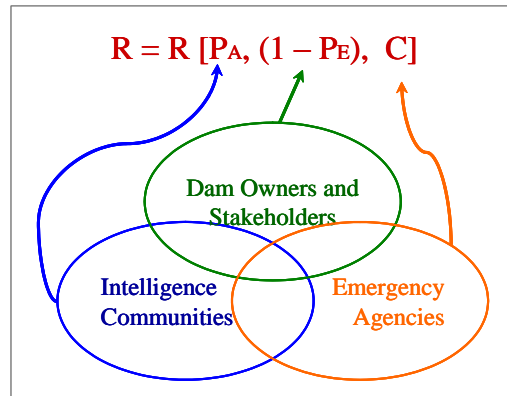


Figura 18. Actores implicados y riesgo antrópico

Por último, la evaluación y gestión de seguridad frente a acciones antrópicas de DAMSE se basa en el proceso descrito en la Figura 19.

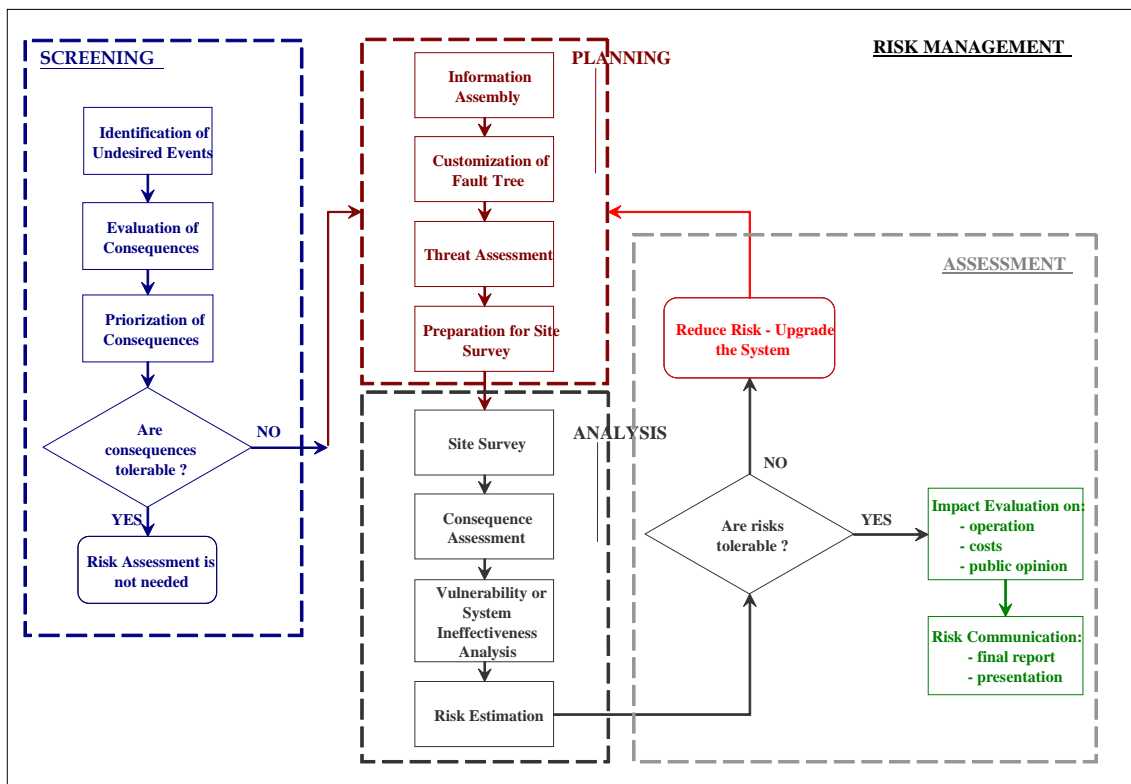


Figura 19. Diagrama de flujo de la Evaluación y Gestión de riesgos en DAMSE.

Como se observa, el proceso comienza con la elaboración de un cribado o “screening” que sería opcional (más indicado cuanto mayor sea el número de presas), basado en un proceso simplificado de evaluación de las consecuencias, y que permite la identificación de aquellas presas y misiones desempeñadas por ellas que necesariamente deben ser sometidas a un análisis completo.

El primer paso del análisis completo consiste en la recopilación y organización de toda la información disponible, incluyendo una descripción física completa.

La siguiente tarea implica determinar qué elementos específicos deben ser protegidos para evitar sucesos indeseados, pasando estos a denominarse elementos críticos (Critical Assessts). Para sistemas complejos, como es el caso de presas, esta identificación de elementos críticos no es obvia, y un diagrama lógico debe ser utilizado para visualizar las distintas maneras en que dichos sucesos indeseados pueden suceder. Este diagrama, particular para cada presa, es su árbol de fallos.

Otro hito en la aplicación de la metodología completa consiste en estimar el tipo de amenazas y la verosimilitud de distintos ataques en el sistema, evaluando de forma conjunta las consecuencias asociadas a cada ataque.

Complementariamente, se han establecido procedimientos de inspección y evaluación de la efectividad del sistema frente a estos ataques, es decir, qué verosimilitud tiene que, en caso de producirse, el ataque sea detectado y evitado de forma exitosa.

Establecidos todos estos factores de forma sistemática, tanto la situación actual como la influencia de cualquier medida de reducción de riesgos puede ser evaluada y comparada.

Cada una de estas medidas debe ser después evaluada económicamente, estableciendo relaciones entre el coste de cada una de ellas y su efectividad en la reducción de riesgos.

El último paso sería la presentación de todas estas evaluaciones a los propietarios/gestores de las instalaciones, de manera que estos puedan tomar decisiones basadas en riesgo y correctamente informadas.

Por otra parte, las inspecciones de campo han demostrado ser uno de los aspectos más importantes en la metodología desarrollada. La recopilación e integración de la información y experiencia tanto de consultores externos como de todo el personal vinculado a la explotación y el mantenimiento de la presa es una de las mayores ventajas de estas inspecciones que, correctamente preparadas y planificadas, pueden realizarse sin demasiado costo económico o temporal. A tal efecto, se prepararon cuestionarios tipo que deben ser rellenados con antelación para después verificarse y comentarse “in situ”:

- Cuestionario 1 (WS 1). Datos de la presa: nombre, localización, tipo, fecha de construcción, propósito, altura, longitud de coronación, almacenamiento, capacidad de alivio, resguardo, esquema de la presa, etc. incluyendo aquellas características más significativas aguas abajo y aguas arriba de la estructura.
- Cuestionario 2 (WS 2). Esquema de las características funcionales (línea de agua), de acceso y circulación a través de la presa.
- Cuestionario 3 (WS 3). Relación de las misiones de la presa y de los elementos críticos asociados a la misma.

- Cuestionario 4 (WS 4). Descripción detallada de los elementos críticos, incluyendo toda la información relevante.
- Cuestionario 5 (WS 5). Localización y descripción de todas las barreras físicas existentes.
- Cuestionario 6 (WS 6). Localización y descripción de todos los sistemas de seguridad instalados.
- Cuestionario 7 (WS 7). Información complementaria, incluyendo planes y procedimientos de emergencia, disponibilidad de fuerzas de respuesta frente al ataque, incidentes registrados en el pasado, etc.
- Cuestionario 8 (WS 8). Identificación de los caminos más vulnerables para alcanzar cada uno de los elementos críticos.

La evaluación de la ineffectividad del sistema debe poner en alerta al equipo de análisis ante la perspectiva de que las altas consecuencias del ataque potencial impliquen la recomendación directa de medidas de reducción de riesgo. Consecuentemente, resulta muy importante una correcta evaluación de dicha ineffectividad, cuyos principales componentes son:

- Detección, que comprende el aviso y entendimiento de la acción del atacante.
- Retraso, entendido como todas aquellas características que impiden al adversario avanzar en algún punto de los pasos o trayectoria necesaria para su acción.
- Respuesta, acción que implica la interrupción y neutralización de la acción del adversario por medio de medidas de seguridad físicas.
- Integración de los aspectos anteriores.

Resulta también apropiado remarcar la gran importancia del árbol de fallos del sistema en este contexto, dado que engloba toda la lógica del sistema y muestra implícitamente todas las posibles estrategias del atacante para conseguir su objetivo. En concreto, los árboles de fallo ayudan a determinar las trayectorias que debe tomar el adversario desde fuera de las instalaciones del “sistema” hasta alcanzar su objetivo. De hecho, las trayectorias forman parte de lo que con anterioridad se ha llamado “escenario”, que consiste en la secuencia de eventos a lo largo de una trayectoria particular a través de la cual el adversario planea alcanzar su objetivo.

Por último, las principales aportaciones, conclusiones y recomendaciones que derivaron del proyecto DAMSE se exponen a continuación:

- El valor del riesgo asociado a seguridad frente a acciones antrópicas obtenido con la metodología DAMSE es una estimación cualitativa que incluye en cualquier caso las tres componentes del riesgo: amenaza, vulnerabilidad y consecuencias.

- De la metodología, derivan implicaciones prácticas, al aportar una base sistemática para la toma de decisiones relacionadas con la seguridad física. En cualquier caso, esta seguridad debe ser re-evaluada periódicamente, al igual que se lleva a cabo con los aspectos de seguridad ingenieril.
- Las actuales medidas de seguridad existentes en la presas parecen no estar completamente justificadas ni basadas en una evaluación detallada y completa. En contraposición, la metodología desarrollada genera una documentación estructurada conducente a resultados reproducibles y registros defendibles para distintas actuaciones: nuevas medidas, denuncias por la falta de las mismas, etc.
- Se pueden conseguir incrementos significativos en seguridad frente a acciones antrópicas con costes considerablemente más bajos que las medidas típicas relacionadas con la seguridad ingenieril.
- La integración y coordinación entre propietarios, expertos en seguridad, sociólogos, policía, agencias de inteligencia y autoridades resulta de vital importancia.

La metodología completa puede descargarse de la página web www.ipresas.upv.es.

8.3 Hacia la integración de los riesgos antrópicos en la gestión de seguridad de presas y otras infraestructuras

Desde la perspectiva de la cuantificación de los riesgos antrópicos se han producido algunos avances a nivel mundial, destacando los trabajos auspiciados por el Department of Homeland Security (DHS) Norteamericano (“U.S. Department of Homeland Security (2006), National Infrastructure Protection Plan” y “SRA International, Inc. (2008), Risk Methodology Evaluation Project, Draft Report submitted to Dams Sector Branch, Sector-Specific Executive Management Office, Office of Infrastructure Protection. D.H.S”).

Desde la perspectiva de la integración de dichos riesgos a los sistemas de gestión integral de seguridad de presas y embalses cabe destacar los recientes trabajos del Department of Homeland Security (DHS) y el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (2009. Handbook of Science and Technology for Homeland Security: “Application of a conditional risk assessment methodology for prioritization of critical infrastructure”)

Cabe mencionar que la colaboración establecida entre el Department of Homeland Security Norteamericano, la Confederación Hidrográfica del Duero y la Universidad Politécnica de Valencia ha propiciado la participación de estas dos segundas entidades como observadores en el “screening” de seguridad de las presas del río Columbia en Estados Unidos (2008) y auspiciado la publicación conjunta del trabajo titulado “An european methodology for risk based security assessment of dams (damse): checking screening outcomes with DHS procedures” (USSD, 2009).

Por último, estos tres organismos junto con el RSE Italiano van a desarrollar en los próximos tres años dentro del Plan Nacional de I+D+i, el proyecto titulado “Incorporación de las componentes de riesgo antrópico a los sistemas de gestión integral de seguridad de presas y embalses”, que permitirá una aplicación completa de la evaluación de riesgos antrópicos para infraestructuras hidráulicas en España.

9. CASO PRÁCTICO DE ESTIMACIÓN DEL IMPACTO DE MEDIDAS DE CONTROL DEL RIESGO DE INUNDACIÓN

Dentro del proyecto SUFRI, como ejemplo de aplicación de la metodología desarrollada para el análisis del riesgo de inundación en zonas urbanas por inundación fluvial y pluvial, se describe todo el procedimiento metodológico de cálculo para un caso de estudio sintético.

La población, para este caso práctico, se encuentra situada 8 Km aguas abajo de una presa y el núcleo urbano es atravesado por el cauce del río, que a su vez ha sido encauzado a su paso por dicha población.

En primer lugar, el caso práctico se analiza en dos partes, correspondientes a inundación fluvial y pluvial. Posteriormente, se obtienen resultados de un modelo conjunto que incorpora el análisis del riesgo por inundación fluvial y pluvial simultáneamente.

Para el análisis del riesgo de inundación fluvial en el núcleo urbano, se definen tres escenarios:

- F1) Situación existente o caso base. Representa la situación actual frente al riesgo de inundación fluvial, incluyendo la existencia del encauzamiento y la presa y su posible fallo.
- F2) Situación con medidas no estructurales. Representa la situación futura en el caso de aplicar medidas no estructurales de formación a la población.
- F3) Situación sin ningún tipo de medidas. Representa la situación anterior a la existencia de medidas estructurales (régimen natural del río) y no estructurales.

La Figura 20 muestra el esquema del modelo de riesgo necesario para el análisis de los escenarios F1 y F2.

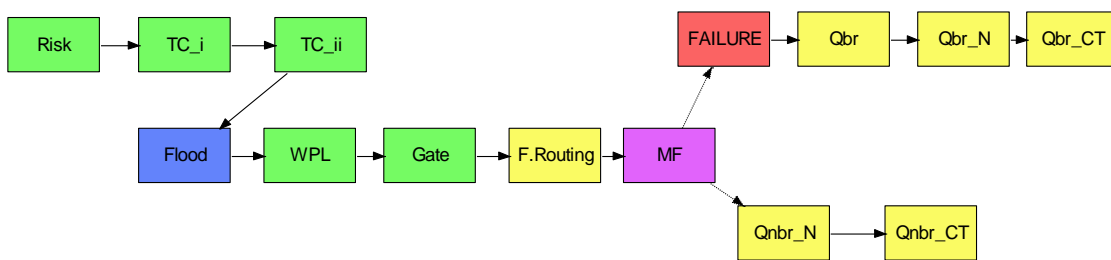


Figura 20. Esquema del modelo de riesgo del caso base en inundación fluvial.

La Figura 21 muestra el esquema del modelo de riesgo empleado para el análisis del escenario F3.



Figura 21. Esquema del modelo de riesgo del régimen natural del río en inundación fluvial.

Para el análisis del riesgo de inundación pluvial en el núcleo urbano, se definen análogamente tres escenarios:

- P1) Situación existente o caso base. Representa la situación actual frente al riesgo de inundación pluvial, incluyendo la existencia del sistema de drenaje (captación de aguas pluviales y saneamiento) de la población.
- P2) Situación con medidas no estructurales. Representa la situación futura en el caso de aplicar medidas no estructurales de formación a la población e implantación de sistemas de aviso en caso de fuertes precipitaciones.
- P3) Situación sin ningún tipo de medidas. Representa la situación sin la existencia del sistema de drenaje ni ninguna de las medidas no estructurales propuestas.

La Figura 22 muestra el esquema del modelo de riesgo empleado para el análisis del riesgo de inundación pluvial para los tres escenarios.

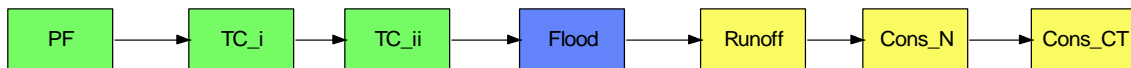


Figura 22. Esquema del modelo de riesgo del caso base en inundación pluvial.

Una vez analizado el riesgo de inundación fluvial y pluvial por separado, puede construirse el modelo de riesgo global (Figura 23) para la obtención de curvas F-N y F-€ que representen el riesgo por inundación fluvial y pluvial de forma conjunta.

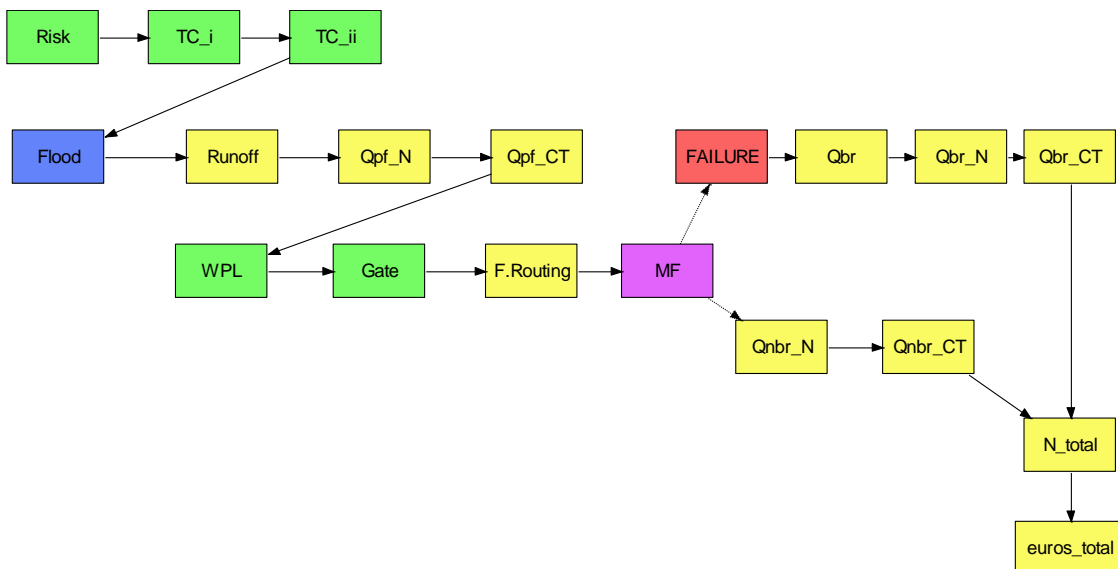


Figura 23. Esquema del modelo de riesgo conjunto.

A modo de resumen, se muestran a continuación las curvas obtenidas en el caso práctico tras la obtención de resultados mediante el modelo de riesgo conjunto.

Las Figuras 24 y 25 muestran la curvas F-N y F-€ de los tres escenarios estudiados: situación sin medidas (régimen natural del río y ausencia de sistema de drenaje), situación sólo con medidas estructurales (situación actual) y situación con medidas estructurales y no estructurales (resultante de la consideración de medidas no estructurales de formación a la población e implantación de sistemas de alerta en caso de fuertes precipitaciones).

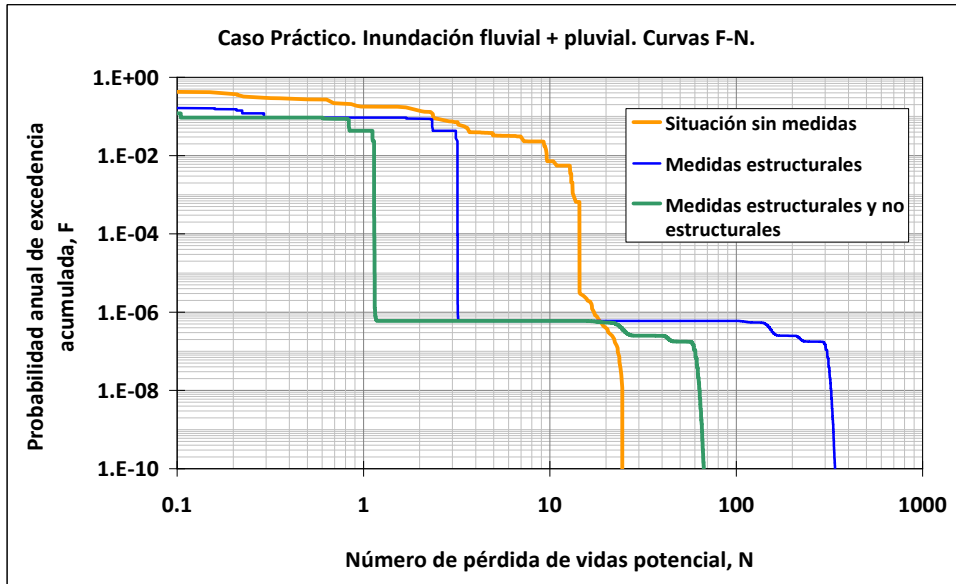


Figura 24. Curvas F-N conjuntas: inundación fluvial+pluvial.

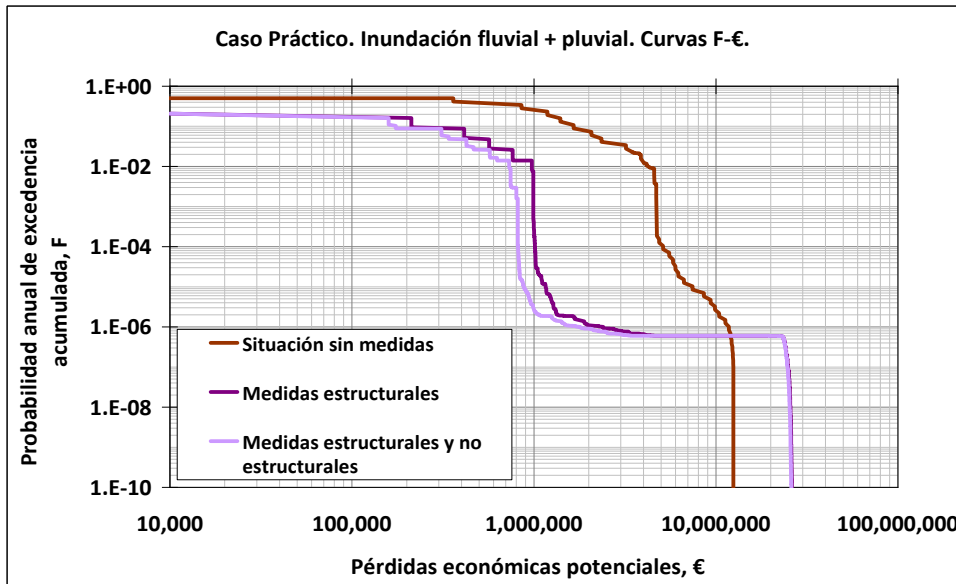


Figura 25. Curvas F-€ conjuntas: inundación fluvial+pluvial.

La información contenida o implícita en dichos gráficos puede así ser puesta a disposición de las personas y organismos encargados de la “toma de decisiones”, que pueden así estar informados en términos de disminución de riesgo, de eficiencia de las medidas (coste versus reducción de dicho riesgo) o de la equidad en términos de riesgo sumido en distintas zonas geográficas.

10. CONCLUSIONES Y RETOS

Cualquier metodología de análisis de riesgos debe entenderse como una herramienta para comunicar de manera abierta y transparente, robusta y defendible en un entorno de responsabilidades compartidas. Además, va más allá de cualquier lógica de decisión tipo binaria (cumple vs. no cumple) y debe equilibrar los conceptos de equidad y eficiencia al establecer criterios de tolerabilidad de riesgo.

En cualquier caso, el proceso en sí de estimación del riesgo y su contraste con criterios de tolerabilidad va más allá de cualquier metodología o procedimiento existente.

Comenzando por la parte de metodología, la parte de estimación de solicitaciones (vinculadas en general a fenómenos naturales como las avenidas) y la de probabilidades de fallo son esencialmente distintas a la de estimación de consecuencias, que deberían idealmente estimarse en combinación con otros organismos implicados como aquéllos que tienen las principales competencias en formación, avisos y potencial evacuación de personas en caso de emergencia.

En cualquier caso, el análisis de riesgo debe ser capaz de capturar el impacto también de las medidas no estructurales y debe ajustarse en su alcance a que este sea suficiente para proveer el necesario nivel de confianza para el tipo de decisiones que deban tomarse.

Así, los retos que asumiría un gestor de infraestructuras serían, a grandes rasgos, los siguientes:

- Proveer o adoptar procedimientos claros para llevar a cabo los análisis así como los criterios de tolerabilidad que van a inspirar la evaluación del riesgo y la posterior toma de decisiones.
- Incorporar a distintos actores en el proceso, fundamentalmente en las tareas de estimación de consecuencias (protección civil, administraciones, etc.) y en algunos casos de las solicitaciones (operadores de otras presas en el sistema, etc.), de manera que éstos se sientan comprometidos y en el proceso.
- Identificar las mejores y más justificadas medidas de mitigación de riesgo.
- Mantener este proceso como un proceso vivo y continuado en el tiempo.

Por último, las metodologías presentadas en esta ponencia, así cualquiera de las referenciadas en la misma u otras equivalentes, tienen como única finalidad poner a disposición de los encargados de la toma de decisiones en los distintos ámbitos que abarca la protección frente a inundaciones una información lo más objetiva y útil posible.

AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento a las instituciones públicas que han financiado la mayoría de las investigaciones incluidas en esta ponencia, en particular el Ministerio de Ciencia e Innovación español (MICINN) y la Comisión Europea.

Igualmente, aquellos organismos públicos que han colaborado y colaboran en el desarrollo y aplicación de estas técnicas, como la Confederación Hidrográfica del Duero, la Agencia Catalana del Agua y la Confederación Hidrográfica del Júcar, así como a OFITECO, "Ente Promotor Observador" según la propia terminología del MICINN y actualmente implicado en la aplicación de la mayoría de las herramientas presentadas.

REFERENCIAS

ANCOLD (Australian National Committee On Large Dams Inc.). Guidelines on Risk Assessment. Australian National Committee on Large Dams, October 2003.

Ardiles, L.; Jenaro, E.; Moreno, P.; Escuder, I.; Membrillera, M.; Pérez, O.; Serrano, A. Modelo de riesgo de las presas de Camporredondo y Compuerto (río Carrión). VIII Jornadas Españolas de Presas. Córdoba, 2008.

Ardiles, L.; Moreno, P.; Jenaro, E.; Fleitz, J.; Escuder, I. "La gestión del riesgo en el ámbito de la seguridad de las presas de titularidad estatal de la Cuenca del Duero". IX Jornadas Españolas de Presas. Valladolid. 2010 (Junio).

Bowles, D.S. and Aboelata, M. Evacuation and life-loss estimation model for natural and dam break floods. Extreme Hydrological Events: New Concepts for Security, pages 363–383, 2007.

COPUT (Conselleria D'Obres Públiques Urbanisme i Transports Generalitat Valenciana). Plan de Acción Territorial de Carácter Sectorial sobre Prevención de Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana (PATRICOVA), 2002.

EEA (European Environment Agency). Catastrophic floods cause human tragedy, endanger lives and bring heavy economic losses. 2006.

Escuder, I.; Meghella, M.; Membrillera, M.; Matheu, E. "A european methodology for risk based security assessment of dams (damse): checking screening outcomes with DHS procedures". USSD, Nashville, 2009.

Escuder, I.; Membrillera, M.; Meghella, M.; Serrano, A. El proyecto "DAMSE" de la Unión Europea sobre seguridad física (frente acciones antrópicas) en presas y embalses. Artículo VIII Jornadas Españolas de Presas. Córdoba (2008).

Escuder, I.; Morales, A.; Perales, S Urban flood risk characterization as a tool for planning and managing. Workshop Alexandria March 2010. Exploration of Tolerable Risk Guidelines for Levee Systems.

European Parliament. Directive 2007/60/EC on the assessment and management of flood risks. Official Journal of the European Union, October 2007.

Gómez, Manuel y Russo, Beniamino. Criterios de riesgo asociados a esorrentía urbana. Jornadas de Ingeniería del Agua, Octubre 2009.

Graham, Wayne J. A procedure for estimating loss of life caused by dam failure. U.S. Department of Interior. Bureau of Reclamation, DSO-99-06, 1999.

HSE (Health and Safety Executive). Reducing risks, protecting people - HSE's decision-making process, Health and Safety Executive, Gran Bretaña. Jonkman. 2001.

Jonkman, S.N.. Loss of life estimation in flood risk assessment. Theory and applications. PhD thesis, Civil Engineering Faculty, Technical University of Delft, 2007.

Kates. R. Industrial flood losses: Damages estimation in the Lehigh Valley. Department of Geography Res. University of Chicago, 98:37, 1965.

MMA (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino). Sistema nacional de cartografía de zonas inundables, 2010.

Munger, D., Bowles, D.S., Boyer, D., Davis D. Margo, D., Moser, D. and Regan, P.J. Interim tolerable risk guidelines for US Army Corps of Engineers Dams. USSD Conference, 2009.

NEAA (Netherlands Environmental Assessment Agency). Dutch dikes and risk hikes, a thematic policy evaluation of risks of flooding in the Netherlands. National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), May 2004.

Penning-Rowsell, E.; Floyd, D; Ramsbottom, P. and Surendran, S. Estimating injury and loss of life in floods: A deterministic framework. *Natural Hazards*, 36:43-64. 2005.

Sánchez, J. Guía para la aplicación del sistema nacional de cartografía de zonas inundables. In *Agència Catalana de l'Aigua*, editor, Jornada Retos y Oportunidades sobre evaluación y gestión de los riesgos de inundación. Dirección General del Agua. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010.

Serrano, A.; Escuder, I.; G. Membrillera, M.; Altarejos, L. "Modelos de riesgo para la ayuda a la toma de decisiones en gestión de seguridad de presas". Artículo. IX Jornadas Españolas de Presas. Valladolid. 2010 (Junio).

Serrano, A.; Escuder, I.; G. Membrillera, M.; Altarejos, L. "iPresas: Software for risk analysis". *23 International Congress on Large Dams*, 2009.

United Nations World Water Assessment Programme. *Global Trends in Water-Related Disasters an insight for policymakers*. United Nations, 2009.

USACE. *Levee Safety Program and Tolerable Risk Guidelines - A Discussion Paper for the Exploration of Tolerable Risk1 Guidelines for Levee Systems Workshop*. (Draft 09 Feb 2010)

Vrijling, J.K. Probabilistic design of water defense systems in The Netherlands. *Reliability engineering and system safety*, 74:337-344, 2001.