



Título del Trabajo Fin de Máster:

***DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA
DE ESTIMACIÓN DE PROBABILIDADES
DE SOBREVIVENCIA EN PRESAS EN EL
CONTEXTO DEL ANÁLISIS DE RIESGO***

Intensificación:

RECURSOS HÍDRICOS

Autor:

FLUIXÀ SANMARTÍN, JAVIER

Director/es:

DR. ESCUDER BUENO, IGNACIO

DR. ALTAREJOS GARCÍA, LUIS

Fecha: **SEPTIEMBRE, 2012**



Título del Trabajo Fin de Máster:

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE ESTIMACIÓN DE PROBABILIDADES DE SOBREVERTIDO EN PRESAS EN EL CONTEXTO DEL ANÁLISIS DE RIESGO

Autor: **FLUIXÀ SANMARTÍN, JAVIER**

Tipo	A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	IGNACIO ESCUDER BUENO	Fecha de Lectura	Sept, 2012
Codirector1	LUIS ALTAREJOS GARCÍA		
Codirector2			
Tutor			

Resumen:

En este trabajo se presenta una herramienta sencilla de estimación de probabilidades de sobrevertido en presas, basada en unas características hidrológico-hidráulicas básicas generalmente disponibles en la documentación de la presa. Dicha herramienta se ha fundamentado en los datos y resultados obtenidos para un conjunto de 30 presas españolas de distinta tipología.

Se ha estudiado asimismo la relación entre las probabilidades de sobrevertido y las probabilidades de rotura por sobrevertido obtenidas mediante modelos de riesgo completos y simplificados. Estos resultados han permitido plantear unas recomendaciones a la hora de considerar el modo de fallo por sobrevertido y de contemplar estudios de mayor detalle, en función de los rangos de probabilidades de sobrevertido estimados.

Una de las utilidades principales de esta herramienta en el campo del Análisis de Riesgo es la clasificación de conjuntos de presas en una fase previa de tipo screening, como ayuda para la organización, planificación y asignación de recursos a programas de seguridad mediante la identificación de aquellas presas con niveles de riesgo más elevados.

En este treball es presenta una ferramenta senzilla d'estimació de probabilitats de sobreabocament en preses, basada en unes característiques hidrològiques i hidràuliques bàsiques generalment disponibles en la documentació de la presa. Dicha ferramenta s'ha fonamentat en les dades i resultats obtinguts per a un conjunt de 30 preses espanyoles de distinta tipologia.

S'ha estudiat així mateix la relació entre les probabilitats de sobreabocament i les probabilitats de ruptura per sobreabocament obtingudes per mitjà de models de risc complets i simplificats. Estos resultats han permés plantejar unes recomanacions a l'hora de considerar el mode de fallada per sobreabocament i de contemplar estudis de major detall, en funció dels rangs de probabilitats de sobreabocament estimats.

Una de les utilitats principals d'esta ferramenta en el camp de l'Anàlisi de Risc és la classificació de conjunts de preses en una fase prèvia de tipus screening, com a ajuda per a l'organització, planificació i assignació de recursos a programes de seguretat per mitjà de la identificació d'aquelles preses amb nivells de risc més elevats.

In this document a simple tool for estimation of dam overtopping probabilities is introduced. It is based on basic hidrological and hydraulic characteristics generally available in the dam's safety file.

This tool is supported by the risk results of a portfolio of 30 Spanish dams.

A relation between overtopping probabilities and failure probabilities has been established as well using detailed and simplified risk models. The results lead to some recommendations to evaluate the importance of the overtopping failure mode. More detailed studies would be carried out depending on the estimated overtopping probabilities ranges.

The main usefulness of this tool in the context of Risk Analysis is the classification of portfolios of dams in screening analyses. These types of analyses are useful in the organization, planning and assignment of resources by identifying the dams with highest risk levels.

Palabras clave:

Análisis de Riesgo / Seguridad de presas / Herramienta de estimación / Probabilidades de sobrevertido / Gestión de la seguridad

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a los directores de mi tesina Iñaki Escuder y Luis Altarejos el haber contado con su apoyo y formar parte de este grupo de investigación. Es un honor aprender día a día de su profesionalidad y excelencia académica.

A mis compañeros y amigos del departamento Adrián, Armando y Jessica, por su valiosa colaboración y por estar ahí cuando se les necesita. También quiero mostrar mi agradecimiento a los colegas de OFITECO, S.A. con los que he tenido la suerte de compartir mi tiempo y mi camino: Luis G. Kabbabe, Luis Chaparro, Vicent Espert, y Óscar Pérez.

A mi familia y amigos, por aguantar todo este tiempo y entender el esfuerzo del trabajo conseguido.

Y en especial a María, por estar ahí siempre.

Pluralitas non est ponenda sine necessitate.
(La pluralidad no se debe postular sin necesidad).

- Guillermo de Ockham -

ÍNDICE DEL DOCUMENTO

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	3
2. EL MARCO DEL ANÁLISIS DE RIESGO EN PRESAS.....	7
2.1 La seguridad de presas	9
2.2 El Análisis de Riesgo en presas.....	11
2.3 La gestión de la seguridad basada en riesgo	16
2.4 El fallo de presas por sobrevertido.....	21
2.4.1 <i>Descripción.....</i>	<i>21</i>
2.4.2 <i>Factores determinantes.....</i>	<i>22</i>
2.4.3 <i>Casos de rotura de presas por sobrevertido</i>	<i>22</i>
3. HERRAMIENTA DE ESTIMACIÓN DE PROBABILIDADES DE SOBREVERTIDO	25
3.1 Fundamentos	27
3.2 Elaboración de la herramienta.....	28
3.2.1 <i>Elaboración de los modelos de sobrevertido</i>	<i>28</i>
3.2.2 <i>Probabilidades de sobrevertido</i>	<i>32</i>
3.2.3 <i>Planteamiento de la herramienta</i>	<i>33</i>
3.2.4 <i>Ajuste de los coeficientes de la ecuación.....</i>	<i>46</i>
3.3 Limitaciones.....	52
4. RELACIÓN ENTRE PROBABILIDADES DE SOBREVERTIDO Y PROBABILIDADES DE ROTURA.....	55
4.1 Objetivo	57
4.2 Modelos de riesgo por sobrevertido	58
4.2.1 <i>Consideraciones para los modelos de riesgo completos.....</i>	<i>59</i>

4.2.2	<i>Consideraciones para los modelos de riesgo simplificados</i>	64
4.3	Relación entre probabilidades de sobrevertido y de rotura por sobrevertido.....	68
4.3.1	<i>Utilización de modelos de riesgo completos</i>	68
4.3.2	<i>Utilización de modelos de riesgo simplificados</i>	72
5.	PROPUESTA DE CLASIFICACIÓN DE PRESAS PARA LA GESTIÓN DE LA SEGURIDAD	77
5.1	Probabilidades mediante modelos de riesgo completos	81
5.2	Probabilidades mediante modelos de riesgo simplificados	88
6.	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	93
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	101
	ANEJO: indicaciones para la elaboración de modelos de riesgo.	107
A.1.	Nodo de avenidas	111
A.2.	Nodo de nivel previo.....	113
A.3.	Nodo de operatividad de las compuertas	116
A.4.	Nodo de laminación	119
A.5.	Nodo de probabilidad de fallo	122

CAPÍTULO 1

Introducción y objetivos

En el campo de la seguridad de presas tiene cada vez más peso la utilización de técnicas de Análisis de Riesgo. Éstas integran toda la información referente a la seguridad de dichas infraestructuras y sirven de apoyo a la toma de decisiones. El primer paso de un Análisis de Riesgo es la definición del alcance del estudio, en tanto que no siempre es recomendable perseguir el máximo nivel de detalle. Éste depende del propósito del estudio así como del punto del proceso en el que se esté. De esta forma, puede ser conveniente realizar un cálculo aproximado o una estimación de ciertos valores como pueda ser la probabilidad de sobrevertido, que resulta útil en la fase de *screening*¹ cuando se realiza un Análisis de Riesgo sobre un conjunto de presas.

El principal objetivo de este trabajo es el desarrollo de una herramienta de estimación de probabilidades de sobrevertido de presas (es decir, la probabilidad de que se produzca en algún momento el sobrevertido de las mismas, sin importar su magnitud), de fácil aplicación, y basada en la hidrología de la cuenca, la capacidad de almacenamiento y la capacidad de desagüe. Es condición fundamental que esta herramienta sea aplicable en el contexto habitual de la ingeniería de presas y se base en información generalmente disponible en la documentación de las mismas. El trabajo se fundamenta en los modelos de riesgo y la información disponible de 30 presas españolas.

Además, se busca obtener una relación entre probabilidades de sobrevertido y de rotura por sobrevertido, estimadas éstas mediante utilización de modelos de riesgo. Es posible así que mediante la herramienta se pueda definir un rango razonable de probabilidades de sobrevertido que corresponda con una probabilidad de fallo determinada (por ejemplo, $p_{\text{fallo}} < 10^{-4}$ años⁻¹).

Este documento se ha organizado en 5 capítulos para su mejor comprensión. Éstos son los que siguen:

¹ Estudio cualitativo de la seguridad de un conjunto de presas, cuyo objetivo es clasificar y compararlas de forma simplificada y homogénea, en términos de su potencial riesgo. Con esto, se dispone de información objetiva para ayudar a la organización, planificación y asignación de recursos a programas de seguridad.

CAPÍTULO 1 – Introducción y objetivos

Se citan las necesidades de investigación en el ámbito de la ingeniería de seguridad de presas y se plantean los objetivos perseguidos, así como la organización del presente trabajo.

CAPÍTULO 2 – Marco del Análisis de Riesgo en presas

Se enmarcan los objetivos y el desarrollo del trabajo en el campo del Análisis de Riesgo en presas, y en especial su relación con la gestión del riesgo.

CAPÍTULO 3 – Herramienta de estimación de probabilidades de sobrevertido

Se desarrolla la herramienta, se plantea el procedimiento seguido y se muestran los campos de utilidad de la misma.

CAPÍTULO 4 – Utilización de la herramienta para determinar probabilidades de rotura por sobrevertido

Se busca establecer una relación entre las probabilidades de sobrevertido y las probabilidades de rotura de las presas por sobrevertido, calculadas mediante modelos de riesgo completos y simplificados.

CAPÍTULO 5 – Propuesta de clasificación de presas para la gestión de la seguridad

Se define una clasificación de la importancia del sobrevertido en el riesgo de la presa atendiendo exclusivamente a los resultados de la herramienta.

CAPÍTULO 6 – Conclusiones y futuras líneas de investigación

Se recogen las principales conclusiones y recomendaciones derivadas del trabajo realizado, apuntando posibles líneas futuras de investigación en este campo.

CAPÍTULO 2

El marco del Análisis de Riesgo en presas

2.1 La seguridad de presas

Es bien conocida la importancia del papel que juegan las presas en el abastecimiento de recursos hídricos, la generación de energía hidroeléctrica y la protección frente a eventos de avenidas, amén de otras funciones como los usos recreativos o la navegación interior.

De igual forma, dadas sus características estas infraestructuras suponen un riesgo notorio para las poblaciones y territorios situados aguas abajo. Pese a ser esporádicas, las roturas de presas pueden tener consecuencias devastadoras tanto para la economía de la región como para la población (véase el caso de la rotura de la presa de Teton en Estados Unidos en 1976), lo que les confiere el grado de infraestructuras críticas. Es pues imprescindible su correcta vigilancia y mantenimiento, desde la fase de proyecto, pasando por la explotación, hasta la puesta fuera de servicio.

Habitualmente, la evaluación de la seguridad de presas se ha realizado a partir de técnicas de análisis clásico, basadas en hipótesis de carga pseudo-probabilísticas y en verificaciones de coeficientes parciales de seguridad [1]. Ésta ha sido la base de la gestión de presas hasta la fecha. Para tal efecto, todos los aspectos relativos a la seguridad quedan cubiertos y recogidos en los distintos documentos del Archivo Técnico (Normas de Explotación, Planes de Emergencia, Revisiones de Seguridad...).

Este enfoque proporciona resultados satisfactorios y actualmente sigue constituyendo la base fundamental para la gestión, 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) [10]. Aunque las avenidas y los sismos incorporan aspectos probabilísticos asociados a su magnitud por medio del periodo de retorno, la probabilidad de ocurrencia de dicha situación de carga queda enmascarada al suponerse un nivel previo de embalse fijo (normalmente el máximo de la explotación normal). A su vez, los coeficientes parciales de seguridad difícilmente se correlacionan con probabilidades de fallo y sólo permiten de forma directa criterios de aceptación o rechazo.

De este modo, en un lado nos encontramos con la necesidad de realizar el mantenimiento de las presas, mejorar la explotación y aumentar la capacidad de regulación (para lo que resulta de especial importancia la estimación de riesgos relativos a la propia seguridad de la estructura, así como identificar los niveles de riesgo aceptables), y, por el otro, con métodos de análisis clásicos de seguridad de presas basados en coeficientes parciales de seguridad, insuficientes para dar respuesta a las necesidades planteadas [13].

2.2 El Análisis de Riesgo en presas

A pesar de los esfuerzos por mantener unos niveles de seguridad de las presas acotados, siempre existe un riesgo asociado a este tipo de infraestructuras. En el boletín E02 de la ICOLD del año 2001 [23] se menciona entre las conclusiones: “no importa lo bien que una presa haya sido proyectada, construida, conservada y explotada: siempre hay un riesgo asociado con el almacenamiento de agua en un embalse”.

Así, como ya se hiciera anteriormente en las industrias nuclear o aeronáutica [9], se empieza a aplicar a nivel internacional las metodologías basadas en riesgo en el caso de la ingeniería de presas. Con ellas se pretende integrar todos los procesos involucrados en la gestión de la seguridad de presas en sistemas lógicos o modelos de riesgo capaces de agregar todos los factores o componentes del riesgo intrínseco a estas infraestructuras. Se genera así una información de gran valor añadido como ayuda a la toma de decisiones.

Algunas de las razones por las que se requiere de herramientas de decisión basadas en técnicas de evaluación de riesgo son las que siguen:

- Envejecimiento del parque de presas (con la mayoría de presas que superan los 30 años y un alto porcentaje con más de 50 años en funcionamiento).
- Demanda creciente de mayores niveles de seguridad para las poblaciones y bienes situados aguas abajo.
- Requerimiento cada vez mayor de gestión informada sobre las infraestructuras críticas [2]. Transparencia en la toma de decisiones relacionadas con la seguridad y los niveles de riesgo asociados a las presas.
- Actuaciones de mejora de la seguridad y necesidad de priorizarlas para alcanzar el camino óptimo de reducción de riesgo.
- Dificultad para construir nuevas presas debido a factores sociales y medio ambientales.

- Necesidad de optimizar la gestión de sistemas de recursos hídricos así como de mejorar la capacidad de almacenamiento en respuesta a una demanda creciente de agua y a un aparente aumento de eventos meteorológicos extremos.

El riesgo es la combinación de tres conceptos: qué puede pasar, cómo de probable es que pase y cuáles son sus consecuencias [15]. Cuando se realiza un análisis de riesgo cuantitativo en seguridad de presas, esta terna se suele reducir a un único número: el producto de la probabilidad de fallo por sus consecuencias. Cuando se realiza el análisis de riesgo de una presa, normalmente no se desea calcular el riesgo total existente, sino que se desea calcular el riesgo incremental imputable a la rotura de la presa. Esto quiere decir que si durante un evento de avenida la presa rompe, sólo se puede imputar a la presa las consecuencias adicionales debidas a la rotura y no aquellas que se hubiesen producido igualmente si la presa no se hubiese roto [25]. Este enfoque que considera las consecuencias incrementales permite obtener el riesgo incremental.

En la Figura 2.1 se presenta un esquema en el que se especifican los pasos de que consta un análisis de riesgo:

- Determinación del alcance del estudio. En esta fase previa también se debe conformar el equipo de profesionales que formará parte del análisis. Además del equipo de análisis propiamente dicho, el gestor de la presa debe incluirse en el proceso. También conviene contar con algún revisor externo.
- Revisión del Archivo Técnico. Es especialmente relevante en un análisis de riesgo. No se trata únicamente de recopilar la información, sino que dicha información es discutida en una o varias sesiones de grupo. En este punto del análisis es posible que se identifiquen necesidades de estudios adicionales. La puesta en valor, estructuración y revisión de la información del Archivo Técnico es en sí mismo uno de los beneficios inmediatos de realizar un análisis de riesgo.

- Visita de campo. Una vez todo el grupo ha tenido la ocasión de consultar la información de la presa, se debe realizar una inspección de la presa, para comprobar su estado actual e identificar posibles problemas en ella.
- Discusión del estado actual de la presa.
- Identificación de los modos de fallo. Es un proceso que se realiza en grupo y que trata de identificar, describir y estructurar todas las posibles formas en que la presa puede fallar, sin restringirse a una lista predeterminada de comprobaciones.
- Los siguientes puntos del análisis de riesgo (definición de la arquitectura del modelo, análisis de las cargas, probabilidades de fallo y consecuencias y cálculo de riesgo) conforman la elaboración de un modelo de riesgo propiamente dicha.
- Evaluación del riesgo. Consiste en responder a la pregunta de si los riesgos existentes son tolerables, comparándolos con estándares internacionales de tolerabilidad.
- Estudio de medidas de reducción de riesgo. El cálculo y evaluación del riesgo se realiza sobre el estado actual de la presa, pero también sobre el estado futuro de la presa tras la posible aplicación de las medidas de reducción de riesgo que se estimen oportunas, para así poder determinar su eficacia y eficiencia.

Además, éste es un proceso que se debe actualizar y revisar en el tiempo al ir cambiando las condiciones de la presa.

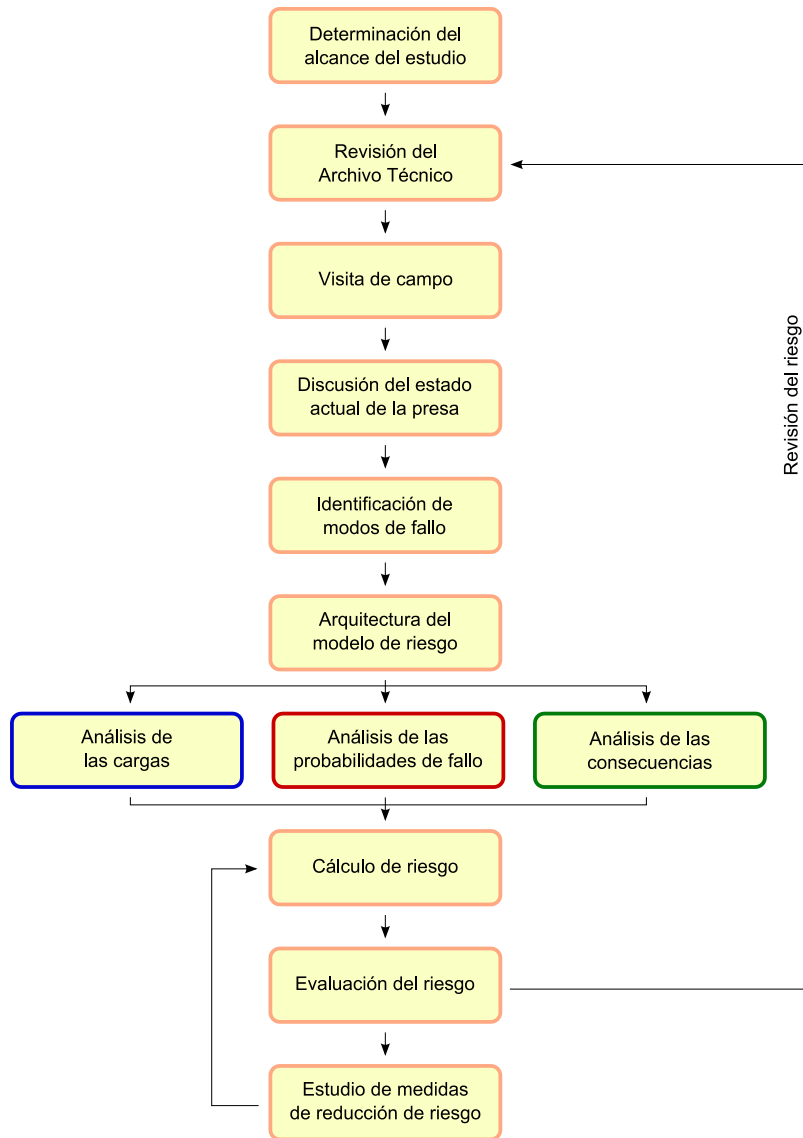


Figura 2.1: Esquema del proceso de análisis de riesgo [25].

La valoración cuantitativa del riesgo puede realizarse mediante modelos de riesgo [26]. Son herramientas de cálculo de riesgo para un cierto escenario, dadas unas sollicitaciones, una respuesta del sistema y unas consecuencias potenciales. En el ANEJO de *Indicaciones para la elaboración de modelos de riesgo* se recogen las indicaciones más importantes a la hora de elaborar un modelo de riesgo, y la información que requiere cada nodo.

Se ha de tener en cuenta que toda herramienta, metodología o modelo que se utilice en la determinación del riesgo en una presa conlleva ineludiblemente unas ciertas simplificaciones en el proceso de cálculo, así como una

incertidumbre asociada. Su conocimiento es fundamental para definir el campo de aplicación de los resultados obtenidos.

2.3 La gestión de la seguridad basada en riesgo

Las técnicas de análisis de riesgo no excluyen al enfoque tradicional de seguridad de presas, sino que lo complementan. Una se apoya en la otra, y existe un trasvase de información de forma cíclica e iterativa. El diagrama de la Figura 2.2 resume el proceso de la gestión de la seguridad de presas y embalses informado mediante modelos de riesgo.

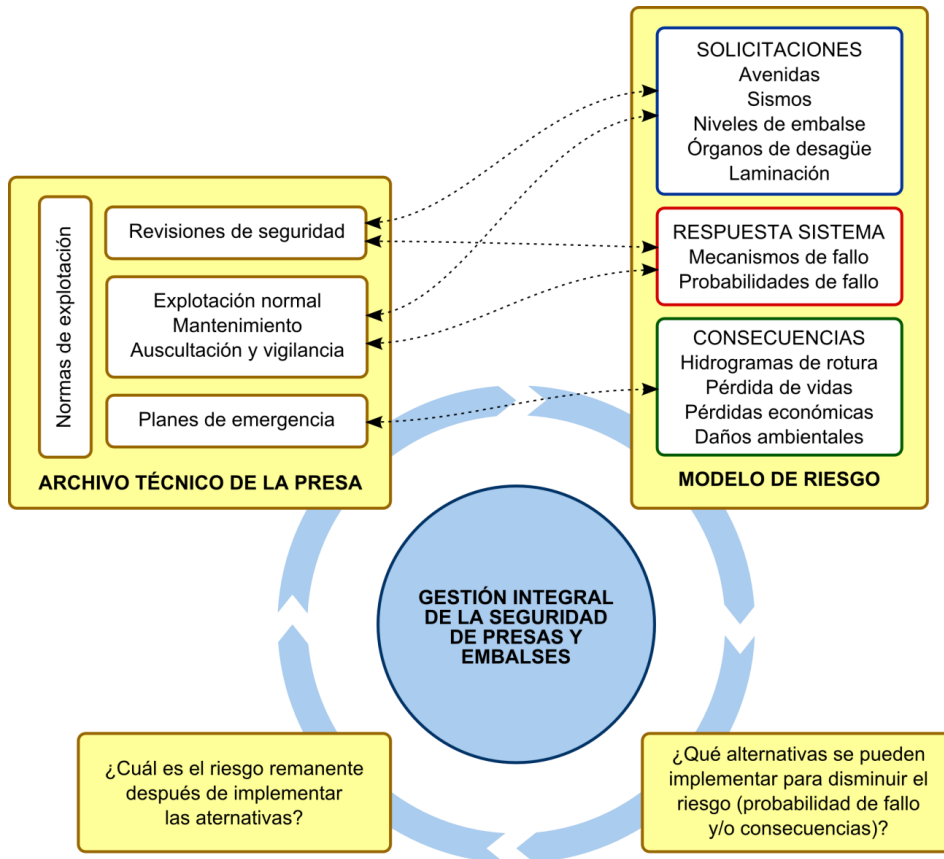


Figura 2.2: Gestión integral de la seguridad de presas y embalses y vínculos entre el modelo de riesgo y los documentos del Archivo Técnico (adaptado de [27]).

Como se puede ver, el modelo de riesgo está dividido en tres áreas: las solicitaciones, las probabilidades de fallo (también conocidas como respuesta del sistema) y las consecuencias. Cada una de estas tres áreas del modelo de riesgo se corresponde con uno o varios de los documentos del Archivo Técnico.

Por un lado los modelos de riesgo se nutren de todo aquello que se recoge en el Archivo Técnico: Normas de Explotación, Planes de Emergencia, Revisiones de Seguridad, Informes Anuales, etc. Por otro lado, dichos documentos pueden ser

ampliados o mejorados en función de los resultados y las conclusiones que se deriven del análisis de riesgo realizado. Si por ejemplo los resultados del modelo de riesgo revelan una gran influencia de la incertidumbre sobre los parámetros geotécnicos utilizados en la Revisión de Seguridad, podría ser conveniente realizar nuevas investigaciones que actualizasen la información usada. También podría ocurrir que se pusiera de manifiesto la importancia de un adecuado sistema de alertas aguas abajo de la presa, lo que podría conducir a una revisión y mejora de los Planes de Emergencia elaborados. El estudio de los criterios de gestión de avenidas podría asimismo influir en la elaboración de las Normas de Explotación de la presa.

Otro de los aspectos ventajosos que ofrecen las técnicas de análisis de riesgo es su contribución a la gestión de la infraestructura basada en la seguridad, aportando resultados útiles para la toma de decisiones. Con su desarrollo y aplicación es posible optimizar los recursos, planteando su uso de la forma más eficiente posible. Destacan las siguientes propiedades de un análisis de riesgo que le confieren esta cualidad:

- Integración de toda la información relativa a la seguridad, con lo que se alcanza una visión global del estado de la presa y de las medidas susceptibles de ser implementadas. Al realizar un análisis de riesgo, se confecciona un modelo global de la presa que incluye desde las solicitaciones (hidrológicas, sísmicas o cualquier otra) hasta las consecuencias, pasando por la respuesta del sistema. Una vez confeccionado el modelo e introducida toda la información propia de la presa, es posible evaluar la importancia que tiene cada una de estas cuestiones.
- Homogeneización de los resultados con criterios internacionales de tolerabilidad para el riesgo de inundación, con lo que se contextualiza el estado actual de la presa. Este proceso se denomina Evaluación de Riesgo y es la base para la gestión del riesgo de inundación, ya que el concepto de riesgo tolerable es fundamental para la toma de decisiones [19].
- Existencia de indicadores de eficiencia, que tienen un doble propósito: servir como guía cuantitativa para materializar el criterio ALARP (del

inglés *As Low As Reasonably Practicable*) y servir como variables de optimización para priorizar entre diferentes medidas de reducción de riesgo [10] (incluso entre diferentes presas). Como guía para materializar el criterio ALARP, de entre los indicadores existentes, el más habitualmente utilizado es el de “coste ajustado por vida estadística salvada”, normalmente conocido por sus siglas en inglés ACSLS (*Adjusted Cost per Statistical Life Saved*) [3].

- Además, se pueden realizar modelos conjuntos de sistemas de múltiples presas que permitan optimizar su gestión conjunta.

Otro aspecto importante a la hora de plantear un análisis de riesgo es el grado de detalle con el que se va a trabajar. Éste será función por un lado de la disponibilidad de información precisa sobre el sistema presa-embalse, y por otro del alcance previsto de los trabajos o de la fase del análisis en la que nos encontremos.

En la Tabla 2.1 se muestra una relación de la información previa utilizada en cada componente de un modelo de riesgo, en función del grado de precisión con que se desee trabajar (simplificado, intermedio o avanzado).

<i>Componente del modelo</i>	<i>Simplificado</i>	<i>Intermedio</i>	<i>Avanzado</i>
<i>Avenidas</i>	Hidrogramas disponibles y extrapolación en su caso	Análisis de incertidumbre sobre la hidrología existente	Hidrología estacional incorporando análisis de incertidumbre
<i>Nivel Previo</i>	Nivel Máximo Normal	Ajuste de niveles históricos	Simulación de aportaciones y demandas
<i>Fiabilidad de compuertas</i>	Valores genéricos recomendados	Árboles de fallo sencillos	Arboles de fallo complejos
<i>Laminación</i>	Caudal desaguado igual al entrante hasta máxima apertura	Normas de Explotación o procedimientos contrastados de actuación	Incorporación del "sistema" de explotación
<i>Modos de fallo</i>	Sobrevertido	Sobrevertido Erosión interna en PMS Deslizamiento en PHG	Todos los resultantes de sesiones de juicio experto
<i>Probabilidades de fallo</i>	Curvas de referencia existentes	Juicio experto	Modelos numéricos y simulaciones Montecarlo
<i>Hidrogramas de rotura</i>	A partir de los supuestos del Plan de Emergencia	Juicio experto distinguiendo para cada modo de fallo	Modelos numéricos y simulaciones de Montecarlo
<i>Consecuencias</i>	Métodos empíricos (daños) + interpolación de Planes de Emergencia	Métodos empíricos (daños) + simulación hidráulica de la respuesta del cauce	Métodos de simulación (daños) + simulación hidráulica de la respuesta del cauce
<i>Medidas correctoras</i>	Tomadas de catálogo de referencia	Memoria valorada	Definidas con nivel de Anteproyecto o Proyecto
<i>Incertidumbre en estimación de riesgo</i>	Sólo análisis de sensibilidad	Incertidumbre sobre las variables más relevantes	Análisis completo de incertidumbre natural y epistémica

Tabla 2.1: Tipificación de las componentes de los modelos de riesgo para llevar a cabo análisis de sensibilidad [10].

Por otro lado, el alcance de los trabajos (cuya definición es la primera fase de un análisis de riesgo [25]) y la parte del proceso en el que nos encontremos determina la precisión requerida en los resultados. No siempre es recomendable realizar un análisis de riesgo con el máximo grado de precisión. En ocasiones, un proceso iterativo en el que la primera vez que se realiza un análisis se hace con un menor grado de detalle puede ser más eficiente al permitir identificar aquellas presas con mayor riesgo y que por lo tanto deben ser estudiadas con mayor profundidad. Conforme avance el proceso, se puede investigar más a fondo cada componente del riesgo, allí donde se haya identificado una mayor necesidad.

Desde el punto de vista de un gestor, por ejemplo, al realizar análisis de riesgo a grandes conjuntos de presas no es práctico ni necesario en primera instancia

llegar a niveles de detalle muy altos. En general, los análisis se deben plantear aprovechando al máximo la información existente y complementándola con estudios nuevos sólo cuando dicha información no exista. Así, puede ser conveniente realizar un cálculo aproximado o una estimación de ciertos valores (como pueda ser la probabilidad de sobrevertido), lo cual resulta útil en la fase de *screening* en un análisis de riesgo de una presa o un conjunto de éstas.

2.4 El fallo de presas por sobrevertido

2.4.1 Descripción

Es importante indicar qué se entiende por modo de fallo en el contexto del análisis de riesgo en presas. Un modo de fallo es la 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 se asocia a un determinado escenario de sollicitación y tiene una secuencia lógica, la cual consta de un evento inicial desencadenante, una serie de eventos de desarrollo o propagación y culmina con el fallo 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 de cualquier tipo (económicos, sobre la vida humana...) aunque también se debe considerar cualquier mecanismo que provoque algún tipo de daño (incluso sin necesidad de que se produzca un vertido). En el presente trabajo se contempla únicamente la eventualidad del sobrevertido de presas, dadas unas sollicitaciones hidrológicas.

El fenómeno del sobrevertido se produce cuando la presa es incapaz de aliviar completamente las avenidas entrantes. De esta forma, el nivel del agua en el embalse aumenta hasta alcanzar la coronación y empezar a verter por encima de la presa. Esto pone en peligro la misma, ya que el flujo que discurre por su espaldón tiene un potencial erosivo que aumenta con la altura de la presa, la altura del sobrevertido y su duración. En el caso de las presas de materiales sueltos, el peligro reside principalmente en el arrastre del material del cuerpo de presa, que es llevado aguas abajo, y que puede inducir a un fenómeno retroalimentado de erosión de la presa y posterior rotura. Para presas de hormigón (gravedad, arco, bóveda...) la integridad del cuerpo queda generalmente asegurada, pero pueden producirse erosiones del material del cimientto, con un posible descalce y rotura.

Éste es un modo de fallo común y con una influencia muy notoria, y en muchos casos preferente, en la determinación del riesgo total de una presa. Se estima que es el responsable del 30% de los fallos en presas en Estados Unidos en los

últimos 75 años. Mientras que la mayoría de las presas de materiales sueltos son incapaces de soportar un sobrevertido continuado sin una probabilidad de rotura elevada, gran parte de las presas de hormigón presentan mayor resistencia debido a la solidez de sus cimientos, Sin embargo, en algunos casos pueden resultar vulnerables debido a la fracturación de la masa rocosa.

2.4.2 Factores determinantes

Para la determinación de los sobrevertidos (y en particular, la altura máxima de sobrevertido que se produce) se debe calcular previamente la laminación del embalse. Ésta es la respuesta de la infraestructura frente a unas sollicitaciones hidrológicas, en función de la magnitud de las mismas, de la situación de partida en el embalse, y de la disponibilidad de operación de los órganos de desagüe. El objetivo perseguido es obtener el régimen de caudales evacuados por la presa hacia aguas abajo en función del tiempo, así como los niveles alcanzados en el embalse.

Pueden enumerarse ciertos aspectos clave en relación al riesgo inherente al sobrevertido.

1. Capacidad de los aliviaderos.
2. Resguardos en el embalse.
3. Nivel previo.
4. Tipología de la presa.
5. Configuración de los aliviaderos y sus compuertas.
6. Frecuencia de las avenidas.
7. Altura y duración del sobrevertido.

2.4.3 Casos de rotura de presas por sobrevertido

A continuación se mencionan algunos casos de fallos de presas por sobrevertido descritos en la literatura.

- Presa South Fork, Pennsylvania, Estados Unidos, 1889

También conocida como la presa Johnston, contaba con una altura de 23 m de altura y era de materiales sueltos. El 31 de mayo de 1889, la presa falló debido al sobrevertido consecuente de una gran avenida; el número de víctimas alcanzado fue de 2200. Algunos de los factores que indujeron a su rotura fueron: 1) el descenso de la coronación durante una de las reformas de la presa redujo la capacidad de desagüe del aliviadero; 2) se produjo una acumulación de detritos interceptados por las vigas del puente de coronación, lo que redujo la capacidad del aliviadero; 3) el asentamiento de la presa produjo un descenso de la coronación en la sección central de aproximadamente 15 cm [31].

- Presa secundaria de Sella Zerbino, Italia, 1935

Esta presa completaba el cierre del embalse del río Orba, cerca de Liguria. Se trataba de una presa de hormigón de gravedad de 14 m de altura, mientras que la principal era una presa arco de 47 m de altura. En agosto de 1935, una tormenta dejó 363 mm de lluvia en menos de 8 horas (avenida estimada de 1,000 años de periodo de retorno), lo que llevó a la situación de sobrevertido con espesores máximos de lámina de 2 m, y finalmente al fallo de la presa secundaria.

- Gibson Dam, Estados Unidos, 1964

Se trata de una presa arco de 66 m de altura construida en 1929 por el Bureau of Reclamation, en Montana. Su aliviadero se modificó en 1938. La lluvia que se produjo en junio de 1964 dejó sobre la cuenca alturas de agua de entre 20 y 40 cm. El sobrevertido de la presa se produjo durante 20 horas, con una altura máxima de casi 1 m. Durante la avenida, la imposibilidad de acceder a las cámaras de operación de las compuertas llevó a que únicamente 2 de ellas pudieran quedar completamente abiertas, mientras que otras 2 sólo lo hicieron en parte y las 2 restantes

quedaran cerradas. Pese a ello, la presa no llegó a fallar, pero con ciertos daños en los estribos [4].

- Presa de Tous, España, 1982

La primera presa de Tous (Valencia), de materiales sueltos, contaba con una capacidad de 80 hm³. Debido a las lluvias torrenciales que se venían produciendo desde el día 19 de octubre (hasta 600 mm en algunas zonas de la cuenca) y dado que no se pudieron abrir las compuertas del aliviadero, la presa empezó a sobrevertir el 20 de octubre y acabó por colapsar, con caudales de rotura estimados en 16,000 m³/s.

De la importancia manifiesta del sobrevertido en el riesgo de presas surge el objetivo del presente trabajo: estimar las probabilidades de sobrevertido de forma sencilla y rápida e intentar correlacionarlas con las probabilidades de rotura.

CAPÍTULO 3

Herramienta de estimación de probabilidades de sobrevertido

3.1 Fundamentos

El objeto principal de esta herramienta es poder estimar de forma sencilla y rápida unos valores orientativos de probabilidades de sobrevertido, mediante una ecuación cuyas variables sean las características principales de capacidad de desagüe y almacenamiento de la presa, así como las cargas hidrológicas a las que está sometida. Se entiende aquí por probabilidad de sobrevertido aquella para la cual se produce un desbordamiento de la presa, sin importar la magnitud ni la duración del mismo; esto es, la probabilidad de que el nivel máximo alcanzado supere el nivel de coronación de la presa.

Es condición fundamental que esta herramienta sea aplicable en el contexto habitual de la ingeniería de presas y se base en información generalmente disponible en la documentación de las mismas.

La hipótesis de partida es que las variables de la ecuación capturan en gran medida la capacidad de laminación del embalse, y por consiguiente su respuesta frente a eventos de avenidas. A continuación se plantea la selección de estas variables y cómo se relacionan con la probabilidad de sobrevertido.

3.2 Elaboración de la herramienta

Para definir una ecuación que permita relacionar de forma estadísticamente significativa las características físicas e hidrológicas del sistema con las probabilidades de sobrevertido, se han utilizado datos de 30 presas españolas extraídos de los documentos contenidos en sus Archivos Técnicos (especialmente en las Revisiones de Seguridad, en los Documentos XYZT y en las Normas de Explotación). Mediante el uso de modelos, se han calculado dichas probabilidades.

Posteriormente, se han seleccionado las variables que mejor recojan la capacidad de laminación de la presa, para finalmente ajustar una curva que relacione estas variables con las probabilidades de sobrevertido calculadas.

En los siguientes puntos se presentan las consideraciones tenidas en cuenta a la hora de elaborar los modelos utilizados, así como los resultados obtenidos, la definición de la herramienta y sus variables y el ajuste realizado.

3.2.1 Elaboración de los modelos de sobrevertido

El primer paso es obtener las probabilidades de sobrevertido que posteriormente se intentarán aproximar mediante la herramienta de estimación. Para su cálculo, se utilizan modelos de sobrevertido a través del software iPresas [27], y que vendrán definidos por:

- La avenida entrante al embalse.
- El nivel en el embalse previo a la presentación de la avenida.
- La operatividad de los órganos de desagüe utilizados en la laminación.
- La estrategia y capacidad física de laminación de la avenida.

En el ANEJO de *Indicaciones para la elaboración de modelos de riesgo* se describe de forma genérica cómo se elabora un modelo de riesgo o de sobrevertido, repasando los nodos de que se compone y los datos necesarios. En el caso de los modelos de sobrevertido utilizados, se ha seguido la estructura presentada en la Figura 3.1. Éstos se componen de nodos que incluyen la información relativa a los hidrogramas de entrada al embalse (*Avenida*), del nivel previo en el mismo antes de producirse la avenida (*NMN*), de la operatividad de aliviaderos

considerados (*OpAliv*), la laminación del embalse (*Laminacion*), y finalmente a la probabilidad asociada de sobrevertido de la presa (*Sobrevertido*).

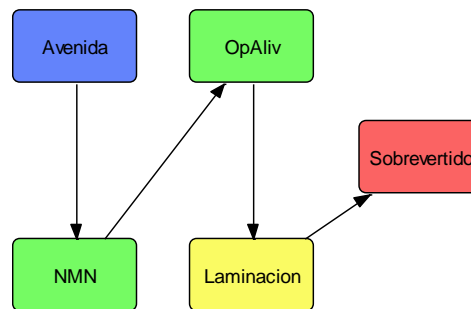


Figura 3.1: Estructura del modelo de sobrevertido utilizado.

Es de destacar que la herramienta desarrollada busca estimar de forma sencilla y simplificada las probabilidades de sobrevertido, mediante unas pocas variables físicas. Por ello, se deben considerar unas ciertas hipótesis simplificadoras a la hora de elaborar los modelos de sobrevertido. Con esto se consigue relacionar de forma consistente los fundamentos de cálculo de probabilidades mediante los modelos y mediante la herramienta. Siguiendo la estructura general de un modelo de sobrevertido (como se ve en el ANEJO de *Indicaciones para la elaboración de modelos de riesgo*), se plantean a continuación las consideraciones para cada uno de sus nodos.

1. Avenidas

El rango de periodos de retorno T considerados va de 1 hasta 100,000 años. Con ello se busca disponer de avenidas de suficiente entidad para que se produzca el sobrevertido de las presas: generalmente, cuanto mayor sea T (o menor sea la Probabilidad Anual de Excedencia PAE^2), mayor será la avenida y los niveles alcanzados en el embalse, y por lo tanto aumentará la probabilidad de sobrevertido.

² Inverso del periodo de retorno T , es la probabilidad de que el caudal pico de la mayor avenida en un año cualquiera supere un determinado caudal Q .

En aquellos casos en los que no se ha dispuesto de hidrogramas con tan alto T, se recurre a la extrapolación estadística mediante funciones de distribución [11] [7]. Como menciona Swain [29], no es conveniente utilizar PAEs inferiores a 10^{-5} ; éste sería el límite de aplicación para extrapolar de forma consistente avenidas extremas.

2. Nivel previo

En el ANEJO de *Indicaciones para la elaboración de modelos de riesgo* se describe la forma de introducir la información relativa al nivel previo en el embalse mediante curvas de distribución de niveles. Dicha distribución, así como el rango de niveles posibles depende de las dimensiones de la presa y de su función. Para azudes de derivación por ejemplo el nivel de agua será más o menos constante a lo largo del tiempo; por otro lado, para presas susceptibles de recibir importantes volúmenes de agua su nivel dependerá de las aportaciones recibidas en periodos anteriores, de la época del año en la que se encuentre y de los resguardos adoptados para tal efecto.

La diversidad de casos posibles hace difícil que una sola variable pueda recoger el efecto de los niveles previos en la probabilidad de sobrevertido (como es el objetivo de la herramienta). Además, la información que se necesita para introducir estas distribuciones de niveles no está generalmente al alcance de forma sencilla y requiere de un tratamiento previo. Por lo tanto se ha considerado que el nivel previo del que se parte en cada laminación corresponde con el Nivel Máximo Normal (NMN) del embalse.

Bajo esta hipótesis los resultados quedan del lado de la seguridad ya que se sobreestiman las probabilidades de sobrevertido; en una situación real los embalses se encuentran en general con el nivel de agua por debajo del NMN, con lo que es esperable que se alcancen niveles menores y que por lo tanto la probabilidad de sobrevertido sea menor. Teniendo en cuenta esta simplificación, los resultados de los modelos, y por lo tanto las probabilidades a las que se ajustará la herramienta, serán la cota superior

de las que se obtendrían mediante modelos completos con un nivel de detalle mayor.

3. Órganos de desagüe

Únicamente se han considerado los órganos de desagüe superficiales (es decir, aliviaderos), controlados mediante compuertas o no. Éstos se diseñan principalmente para el trasiego de los caudales excedentes en la laminación de avenidas. Por lo tanto su capacidad y su impacto en las probabilidades de sobrevertido son en general mucho mayores que para del resto de órganos (desagües de fondo, de medio fondo, tomas, etc.), que se suelen utilizar en la explotación ordinaria de las presas [30]. De esta forma en la herramienta sólo se incluirá la capacidad de los aliviaderos, simplificando así su expresión.

La fiabilidad individual de los órganos se ha obtenido a partir de los casos estándares para análisis de riesgo de presas mostrados en la Tabla 3.1, sin ser por lo tanto necesario recurrir a estudios de detalle como pudieran ser los árboles de fallo. Según esta tabla la fiabilidad depende del estado general de los órganos de desagüe, como ya se ha utilizado por ejemplo en [22]. Sirve además de apoyo a la hora de adjudicar de forma homogénea las fiabilidades que luego se incluirán en la ecuación de la herramienta.

Fiabilidad	Casos
100%	Aliviaderos y OD no controlados por compuertas
95%	Órgano de desagüe nuevo o muy bien mantenido
85%	Órgano de desagüe bien mantenido con algún problema menor
75%	Órgano de desagüe con algún problema menor
50%	El uso del órgano de desagüe para laminar es poco fiable
0%	Órgano de desagüe nada fiable o que nunca ha sido utilizado

Tabla 3.1: Fiabilidades individuales estándar de los órganos de desagüe.

4. Estrategias de laminación

La casuística de estrategias de laminación en caso de avenidas es muy diversa y depende en gran medida de la tipología de la presa, de su función principal e incluso de los resguardos estacionales planteados. No serán iguales los criterios para una presa dispuesta esencialmente para absorber avenidas en época de fuertes lluvias, que para un azud cuyo principal objetivo es el de mantener una cota de agua constante para su derivación.

Por ello, se ha considerado que el criterio de gestión para las laminaciones consiste en igualar en la medida de lo posible los vertidos Q_{salida} a las entradas de caudales E , evitando que Q_{salida} exceda a E . De este modo se consigue homogeneizar de forma sencilla las diferentes estrategias de gestión de avenidas de los casos estudiados.

5. Probabilidad de sobrevertido

Finalmente, el último nodo considerado determina la probabilidad de que se produzca el sobrevertido. Como ya se ha mencionado, no importa aquí la magnitud ni la duración del mismo. Por lo tanto en este nodo se adjudica una probabilidad de 1 a todas aquellas ramas del modelo en las que el nivel máximo alcanzado en el embalse haya superado el nivel de coronación.

Es de destacar que las simplificaciones relativas al nivel previo, a las fiabilidades de los órganos de desagüe y a los criterios de laminación son las mismas que las consideradas en los modelos de riesgo simplificados [10] (Apartado 4.2.2).

3.2.2 Probabilidades de sobrevertido

Una vez que se han elaborado los modelos de sobrevertido en base a los datos de las 30 presas, se procede al cálculo de sus probabilidades de sobrevertido. En la Tabla 3.2 siguiente se exponen los resultados, clasificados por su tipología: presas de hormigón de gravedad, arco y bóveda, azudes de hormigón, y presas de materiales sueltos. Estas probabilidades son las que se intentan aproximar mediante la herramienta de estimación.

Tipología	Presa	Probabilidad Sobrevertido	Tipología	Presa	Probabilidad Sobrevertido
HORMIGÓN DE GRAVEDAD	1	1.78E-01	ARCO Y BÓVEDA	18	3.16E-03
	2	3.26E-02		19	6.05E-04
	3	1.54E-02		20	3.16E-04
	4	6.96E-03		21	2.24E-04
	5	3.63E-03		22	4.51E-05
	6	2.86E-03		23	0.00E+00
	7	1.85E-04		AZUDES HORMIGÓN	24
	8	5.43E-04	25		4.29E-03
	9	2.80E-04	26		2.28E-04
	10	7.41E-03	27		1.61E-04
	11	7.28E-05	MATE- RIALES SUELTOS		28
	12	1.78E-05		29	0.00E+00
	13	1.13E-05		30	0.00E+00
	14	1.71E-05			
	15	1.35E-04			
	16	1.11E-04			
	17	3.48E-05			

Tabla 3.2: Probabilidades de sobrevertido de las presas estudiadas, por tipología.

Hay que destacar aquí que en 4 casos se han obtenido probabilidades de sobrevertido nulas: uno en presas arco y bóveda, y en los tres casos de presas de materiales sueltos. Sin embargo, este hecho no significa que de forma absoluta en dichas presas no se produzca el sobrevertido, sino que éste no se da para el rango de avenidas consideradas (con periodos de retorno T de hasta 100,000 años) y para ninguna de las combinaciones de los demás condicionantes.

3.2.3 Planteamiento de la herramienta

Como ya se ha planteado, el objetivo de la herramienta es utilizar variables características del sistema presa-embalse y de las cargas hidrológicas para estimar probabilidades de sobrevertido. Éstas se relacionan mediante una ecuación que incluya dichas variables y unos ciertos coeficientes que se deben ajustar a los datos obtenidos (Tabla 3.2) teniendo en cuenta que:

- Por un lado, las variables que se utilizan deben ser representativas de la capacidad de respuesta del sistema frente a episodios de avenidas. De forma general deben estar disponibles en la documentación de la presa, y no requerir de tratamiento previo.

- Por otro lado, se trabaja con un número relativamente reducido de valores de probabilidades de sobrevertido (30, de los cuales 4 no se utilizan por resultar probabilidades nulas). Siguiendo el Principio de Parsimonia³, se debe utilizar el menor número posible de coeficientes a ajustar.

A continuación se busca definir qué variables se incluyen en la herramienta de estimación. Para ello es conveniente revisar el proceso de laminación de un embalse, por el cual se obtiene la distribución de niveles máximos alcanzados en el embalse (y por tanto los posibles sobrevertidos).

Como desarrollo general de cálculo, la implementación del proceso de laminación de una avenida debe seguir los pasos de los procesos naturales que se dan en estos acontecimientos. Se plantea el equilibrio que se establece en el embalse dado un volumen previo V_0 (definido por el nivel previo H_0) entre los caudales entrantes E (dados por los hidrogramas de entrada) y los caudales salientes Q_{salida} (evacuados por los órganos de desagüe teniendo en cuenta las consignas de operación de compuertas, si las hay). En la Figura 3.2 se presenta el diagrama general de cálculo de la laminación, incluyendo los datos necesarios en cada paso (nodos verdes).

³ De un conjunto de variables explicativas que forman parte del modelo a estudiar, debe seleccionarse la combinación más reducida y simple posible, teniendo en cuenta la varianza residual, la capacidad de predicción y la multicolinealidad.

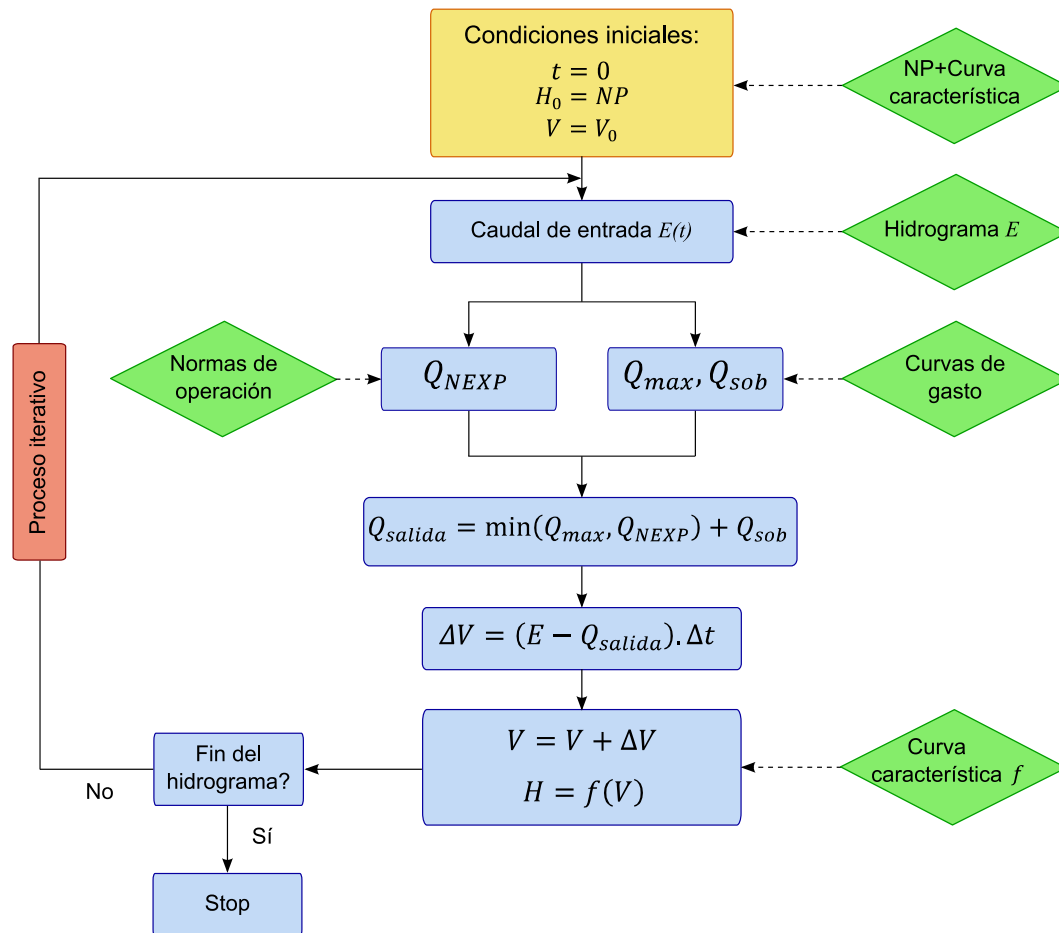


Figura 3.2: Diagrama general de cálculo de laminación [28].

Se puede apreciar que para evaluar la capacidad de laminación de un embalse tienen gran importancia la capacidad de alivio $Q_{max}(H,g)$ de los órganos de desagüe⁴ y la de almacenamiento $V=f(H)$. En una presa con un aliviadero mayor y de más capacidad se evacuarán antes los caudales de entrada sobrantes, evitando que éstos produzcan una sobreelevación del nivel del agua que pudiera devenir en un sobrevertido. Del mismo modo, si en una presa se dispone de un mayor volumen libre de embalse, ésta será capaz de absorber mejor los volúmenes de avenidas entrantes y por lo tanto de limitar los niveles máximos alcanzados.

Por otro lado, la capacidad física de laminación de una presa tiene que relativizarse con la importancia de la hidrología de entrada $E(t)$. Cuanto mayores

⁴ Donde g se refiere a la fiabilidad de los órganos de desagüe utilizados (del inglés *gate reliability*).

sean las avenidas (mayor volumen totales de entrada y/o mayor caudal pico) peor será la respuesta del sistema y se esperarán mayores niveles de agua, para una capacidad de alivio y de almacenamiento determinadas.

Lo que se ha planteado en este trabajo es utilizar los cocientes entre la capacidad o volumen de almacenamiento y el volumen de la avenida característica, y por otro lado entre la capacidad de los órganos de desagüe y el caudal pico de dicha avenida. Mediante éstos, se ha buscado su influencia en la probabilidad de que se produzca el sobrevertido, esto es definir la relación siguiente:

$$p_{sob} = f\left(\frac{Resg}{VolAv}, \frac{CapOD}{Q_p}\right) \quad \text{Ecuación (1)}$$

donde

- *Resg*: volumen de resguardo (hm³).
- *VolAv*: volumen de la avenida característica (hm³).
- *CapOD*: capacidad de los órganos de desagüe (m³/s).
- *Q_p*: caudal pico de la avenida característica (m³/s).

Por “avenida característica” se entiende la avenida de un determinado periodo de retorno que recoge de forma global cómo afecta la hidrología completa de entrada a la capacidad de laminación de la presa. Se adopta esta simplificación para no tener que trabajar con toda la colección de hidrogramas disponibles, y a su vez para homogeneizar para todas las presas los criterios de selección de la variable a utilizar en la ecuación.

En lo que sigue se busca la expresión de la función de la Ecuación (1) y también especificar qué variables se deben utilizar (qué capacidad de desagüe, de qué órganos, qué periodo de retorno para la avenida característica, etc.).

Para encontrar dicha expresión nos hemos basado en los resultados expuestos en [28]; en dicho artículo se estudia la relación de estas variables con las probabilidades de sobrevertido calculadas para un conjunto de 27 presas mediante modelos de riesgo. Estas probabilidades se presentan en la Figura 3.3. En [28] las capacidades relativas de alivio y de almacenamiento que se utilizan son:

- El cociente entre el volumen del resguardo (entre el NMN de la presa y coronación) y el volumen de la avenida de 10,000 años de periodo de retorno.
- El cociente entre la capacidad de los órganos de desagüe con el nivel de agua en coronación y el caudal pico de la avenida de 10,000 años de periodo de retorno.

Estas variables se representan para cada presa en la Figura 3.4, con el primer cociente en el eje de abscisas, y el segundo en el eje de ordenadas. En el gráfico se presentan los puntos según una escala de grises, en función de si la probabilidad de sobrevertido de la Figura 3.3 es alta ($>10^{-4}$), media ($<10^{-4}$), o nula. Los trazos discontinuos marcan la separación entre estos tres conjuntos de puntos, conformando elipses (notar que el eje de abscisas está deformado respecto del de ordenadas) centradas en el origen.

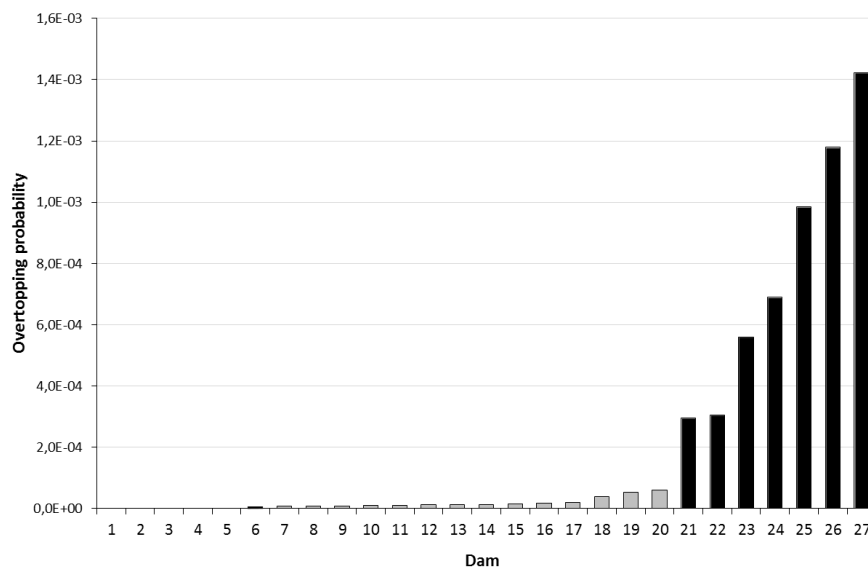


Figura 3.3: Probabilidades individuales de sobrevertido de un conjunto de 27 presas, calculadas mediante modelo de riesgo [28].

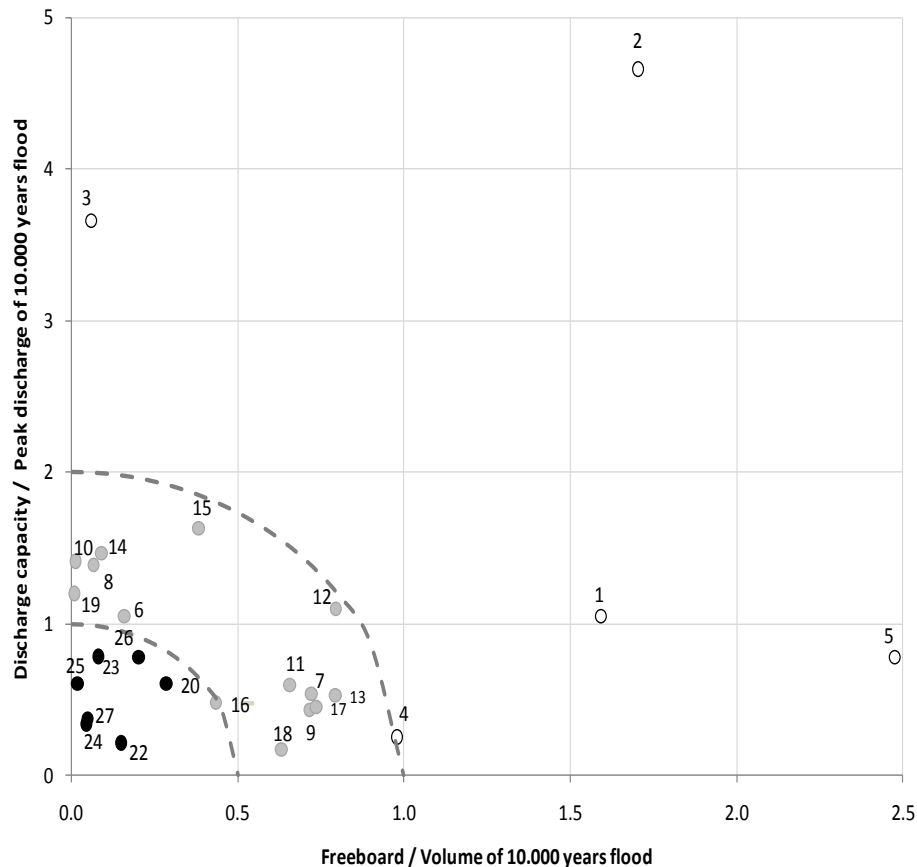


Figura 3.4: Relación Capacidad aliviadero con nivel en coronación/Caudal pico vs. Resguardo/Volumen de avenida relativos a las avenidas de 10,000 años de periodo de retorno, para un grupo de 27 presas con probabilidades de sobrevertido en escala de grises (negro: probabilidad alta, gris: probabilidad media, blanco: probabilidad nula) [28].

Se aprecia con esto que existe una relación entre la distancia al origen r de cada uno de los puntos y su probabilidad de sobrevertido: cuanto mayor es la distancia, menores son las probabilidades. La Ecuación (1) se puede reescribir como:

$$p_{sob} = f(r) \quad \text{Ecuación (2)}$$

A partir de esta idea se ha decidido utilizar el radio de la elipse (trazo discontinuo) que pasa por cada punto para obtener su probabilidad de sobrevertido. Atendiendo a la representación de los puntos de la Figura 3.4 y siendo los ejes los cocientes mencionados con anterioridad, la formulación para dicho radio que se propone en este trabajo es la siguiente:

$$r^2 = \left(\frac{Resg}{VolAv}\right)^2 + \alpha \cdot \left(\frac{CapOD}{Q_p}\right)^2 \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde el coeficiente α recoge la importancia relativa de una relación (*Resguardo/Volumen de avenida*) frente a la otra (*Capacidad aliviadero/Caudal pico*). De la escala utilizada para deformar el eje de abscisas, se estima que su valor (que debe ser ajustado posteriormente) está en el entorno de 0.5.

Para la elección de las variables a utilizar en la Ecuación (3), se debe tener en cuenta que la herramienta, y por lo tanto las expresiones de que se compone, debe utilizar pocas variables, y que éstas sean representativas de la capacidad de laminación del embalse. A continuación se exponen para cada una de las variables las consideraciones adoptadas para su elección.

- **Respecto del volumen de resguardo**

Lo que se debe utilizar es el volumen de resguardo que queda entre el nivel previo en el embalse (en el Apartado 3.2.1 se considera que será invariablemente su NMN, quedando así las estimaciones de probabilidad de sobrevertido del lado de la seguridad) y la cota de coronación de la presa (a partir de la cual se producen los sobrevertidos).

Éste define el volumen de agua que el embalse es capaz de absorber sin necesidad de aliviar caudales y sin producirse sobrevertidos.

- **Respecto de la avenida característica**

Como ya se ha mencionado, en [28] se han adoptado los valores del volumen y caudal pico de la avenida característica correspondiente a 10,000 años de periodo de retorno. Sin embargo en este trabajo se busca mejorar esta relación eligiendo la avenida característica que mejor ajuste la herramienta.

En la información hidrológica de las presas es habitual encontrar colecciones de hidrogramas de distintos periodos de retorno, que pueden ir desde T=2 años hasta en algunos casos T=100,000 años. En función de la antigüedad de los estudios o de la precisión con que se han elaborado se puede disponer de hidrogramas de alto periodo de retorno o que no vayan

más allá de los 500 años de periodo de retorno. Sin embargo, de forma general se encuentran hidrogramas de hasta $T=1,000$ e incluso 10,000 años.

A este respecto, se ha probado la bondad del ajuste de la herramienta para distintas avenidas características, correspondientes a $T=100$, $T=500$, $T=1,000$, $T=5,000$ y $T=10,000$ años. Los ajustes se han realizado siguiendo las indicaciones detalladas en el Apartado 3.2.4 siguiente; el objetivo es minimizar la raíz del error cuadrático medio RMSE, y maximizar el coeficiente de correlación de Pearson así como el índice de Nash-Sutcliffe⁵ [17]. En la Tabla 3.3 se muestran los porcentajes de estos índices de bondad, para las distintas avenidas, respecto de los índices obtenidos con la utilizada en [28] (avenida de $T=10,000$ años).

	T (años)				
	100	500	1,000	5,000	10,000
RMSE	81%	90%	79%	92%	100%
Coef. Pearson R	108%	109%	108%	103%	100%
Nash-Sutcliffe E	113%	108%	117%	107%	100%

Tabla 3.3: Resumen de las pruebas realizadas para la determinación del periodo de retorno T de la avenida característica de la herramienta.

A la vista de los resultados, la avenida que presenta unos mejores índices de bondad de forma global es la correspondiente a $T=1,000$ años, por lo tanto se ha adoptado como la avenida característica para utilizar en la herramienta. Además, presenta la ventaja de estar disponible de forma general en los estudios hidrológicos contenidos en la documentación de las presas.

⁵ El índice de Nash-Sutcliffe mide el grado de similitud entre series. Para un ajuste perfecto adopta un valor de 1, y si es 0 el error es del mismo orden de magnitud que la varianza de los datos observados, por lo que la media de los datos tendrá una capacidad predictora similar al modelo. Valores negativos implican que el modelo no es adecuado.

- **Respecto de la capacidad de los órganos de desagüe**

La variable de capacidad de los órganos de desagüe tiene en cuenta únicamente los aliviaderos, ya que es en general mucho mayor que la del resto de órganos (desagües de fondo, de medio fondo, tomas, etc.). De esta forma se trabaja de forma consistente con las indicaciones del Apartado 3.2.1.

Se propone considerar como capacidad característica aquella correspondiente al caudal de diseño de los aliviaderos, por varios motivos. En primer lugar, dicho caudal es representativo de la capacidad de los aliviaderos puesto que en su diseño se proyectaron para un funcionamiento con esta magnitud de vertido. Además, generalmente en la documentación de las presas ésta es la capacidad que se indica, con lo que es más fácil disponer de ella. En otro caso habría que utilizar las curvas de gasto de los aliviaderos, no siempre disponibles de forma sencilla, y calcular otros caudales complicando así la aplicación de la herramienta.

Se debe mencionar que podemos encontrarnos con ciertos órganos de desagüe regulados por compuertas y otros libres, sin control. Para recoger esa situación en la expresión del parámetro del radio, se ha decidido distinguir entre la Capacidad de los Órganos de Desagüe No Controlados (*CapODNC*) y la de los Órganos de Desagüe Controlados (*CapODC*). Con esto se está en disposición de recoger debidamente el efecto de las fiabilidades individuales de las compuertas (Op) sobre la respuesta del sistema a las cargas, y por ende sobre la probabilidad de sobrevertido. Evidentemente, dichas fiabilidades deben ser afectadas por el número de compuertas (n) que regulan los caudales de forma que, fijada una fiabilidad individual, a mayor número de compuertas se aumente la fiabilidad conjunta. Se propone un factor corrector de las capacidades de los órganos de desagüe controlados cuya expresión es ${}^n\sqrt{Op}$. Se puede apreciar cómo varía dicho factor respecto del número de compuertas y de su fiabilidad individual en la Figura 3.5.

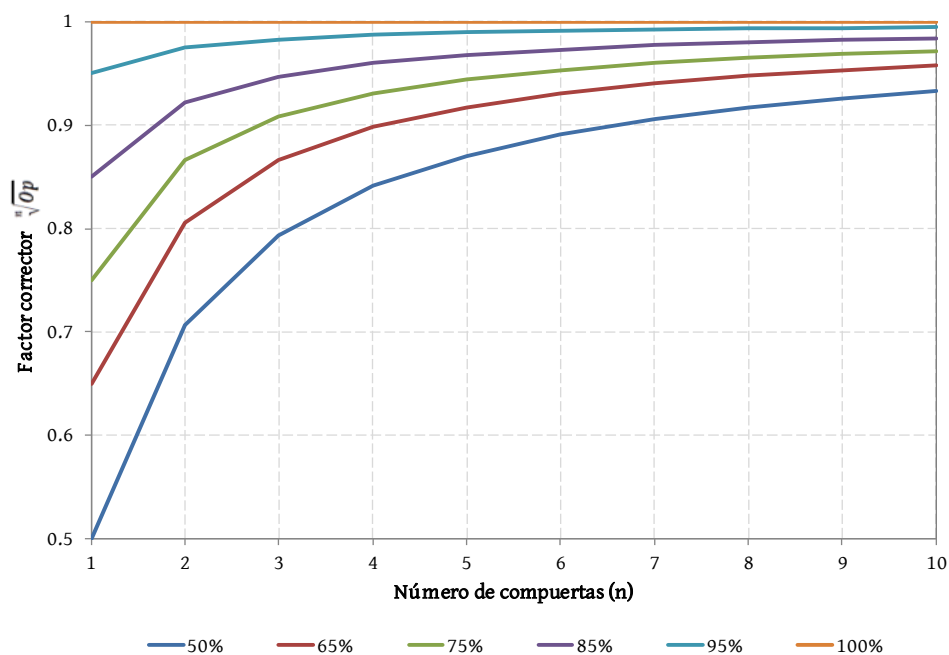


Figura 3.5: Factor corrector de la operatividad de los órganos de desagüe controlados en función del número de compuertas reguladoras (n) y de su fiabilidad individual (Op).

De la misma forma que antes, se ha probado ajustar la herramienta utilizando como variables: la capacidad de los aliviaderos en coronación (caso utilizado en [28]), la capacidad de diseño, y la capacidad de diseño incluyendo las operatividades estimadas de los mismos (ver detalles en la Tabla 3.5). En todos los casos, el ajuste se ha realizado utilizando como avenida característica la de $T=1,000$ años, que es la que se ha elegido en el punto anterior.

En la Tabla 3.4 se muestran los porcentajes de los índices de bondad, para las tres capacidades de aliviaderos mencionadas, respecto de los índices obtenidos con la utilizada en [28] (capacidad para el nivel de agua en coronación).

	Capacidad OD		
	Coronación	Diseño	Considerando operatividades
RMSE	100%	99%	100%
Coef. Pearson R	100%	101%	106%
Nash-Sutcliffe E	100%	102%	100%

Tabla 3.4: Resumen de las pruebas realizadas para la determinación de la capacidad de alivio para la herramienta.

Con esto se comprueba que la mejor modelación corresponde al caso en que se utiliza como variable de capacidad la correspondiente al caudal de diseño de los aliviaderos que incluye el factor corrector de las operatividades de las compuertas. Ésta será pues la variable *CapOD* a utilizar en la herramienta.

En la Tabla 3.5 se exponen para cada presa las características del sistema presa-embalse (resguardo, capacidad de los órganos de desagüe y en su caso fiabilidades de las compuertas) y de las cargas hidrológicas (volumen y caudal pico de la avenida de 1,000 años de periodo de retorno).

PRESA	Características del sistema presa-embalse					Características de las cargas hidrológicas	
	Resguardo (hm ³)	Capacidad OD (m ³ /s)		Compuertas	Fiabilidad	Volumen avenida T=1,000 años (hm ³)	Caudal pico avenida T=1,000 años (m ³ /s)
	Resg	CapODNC	CapODC	n	Op	VolAv	Qp
1	1.04	118	-	-	-	7.01	565
2	1.71	-	491	2	75%	21.03	830
3	2.77	-	506	2	75%	33.86	1474
4	4.56	-	400	2	85%	31.77	609
5	9.68	-	632	5	85%	51.87	914
6	6.19	-	619	2	95%	55.03	824
7	24.31	254	30	1	95%	55.63	511
8	41.30	-	2015	5	85%	127.48	4080
9	6.06	520	1757	3	85%	58.55	2626
10	5.85	-	400	2	85%	24.18	517
11	21.50	-	750	3	95%	40.48	956
12	0.89	372	-	-	-	9.89	375
13	2.23	-	682	3	95%	15.03	485
14	2.12	-	139	2	95%	2.86	211
15	25.23	-	999	2	85%	51.20	824
16	26.63	-	1332	3	85%	43.28	1842
17	25.86	-	600	3	85%	33.23	993
18	0.91	127	-	-	-	6.16	329
19	15.64	782	275	2	95%	53.00	1556
20	33.16	1152	-	-	-	63.14	5259
21	60.95	167	887	2	85%	126.15	2069
22	2.17	486	293	2	75%	22.29	642
23	0.07	80	-	-	-	0.84	43
24	2.85	-	491	3	85%	46.34	1445
25	1.74	-	2145	8	95%	77.09	3652
26	1.60	-	2600	8	95%	128.30	2536
27	1.13	-	1176	8	75%	68.76	1143
28	0.14	20	-	-	-	0.16	39
29	0.97	56	-	-	-	0.43	53
30	16.62	149	-	-	-	10.07	660

Tabla 3.5: Valores de las características del sistema presa-embalse y de las cargas hidrológicas de las 30 presas.

Con todo esto, se llega a la expresión del parámetro radio r^2 que sigue:

$$r^2 = \left(\frac{Resg}{VolAv} \right)^2 + 0.5 \cdot \left(\frac{CapODNC + CapODC \cdot \sqrt[n]{Op}}{Q_P} \right)^2 \quad \text{Ecuación (4)}$$

donde se ha sustituido el coeficiente α por 0.5 de forma provisional, a falta del ajuste.

Una vez definido el parámetro r^2 para cada una de las presas, se busca su relación con las probabilidades de sobrevertido definidas en el Apartado 3.2.2. La Tabla 3.6 siguiente recoge estos valores, y la relación se representa en la Figura 3.6.

Tipología	Presa	Probabilidad Sobrevertido	Parámetro de radio r^2
HORMIGÓN DE GRAVEDAD	1	1.78E-01	0.044
	2	3.26E-02	0.138
	3	1.54E-02	0.051
	4	6.96E-03	0.204
	5	3.63E-03	0.258
	6	2.86E-03	0.280
	7	1.85E-04	0.344
	8	5.43E-04	0.219
	9	2.80E-04	0.357
	10	7.41E-03	0.313
	11	7.28E-05	0.579
	12	1.78E-05	0.501
	13	1.13E-05	0.975
	14	1.71E-05	0.752
	15	1.35E-04	0.867
	16	1.11E-04	0.613
	17	3.48E-05	0.770

Tipología	Presa	Probabilidad Sobrevertido	Parámetro de radio r^2
ARCO Y BÓVEDA	18	3.16E-03	0.096
	19	6.05E-04	0.315
	20	3.16E-04	0.300
	21	2.24E-04	0.347
	22	4.51E-05	0.675
	23	0.00E+00	1.704
AZUDES HORMIGÓN	24	6.32E-02	0.056
	25	4.29E-03	0.171
	26	2.28E-04	0.519
	27	1.61E-04	0.493
MATERIALES SUELTOS	28	0.00E+00	0.919
	29	0.00E+00	5.738
	30	0.00E+00	2.748

Tabla 3.6: Probabilidades de sobrevertido de las presas estudiadas y su parámetro radio r^2 correspondiente, por tipología.

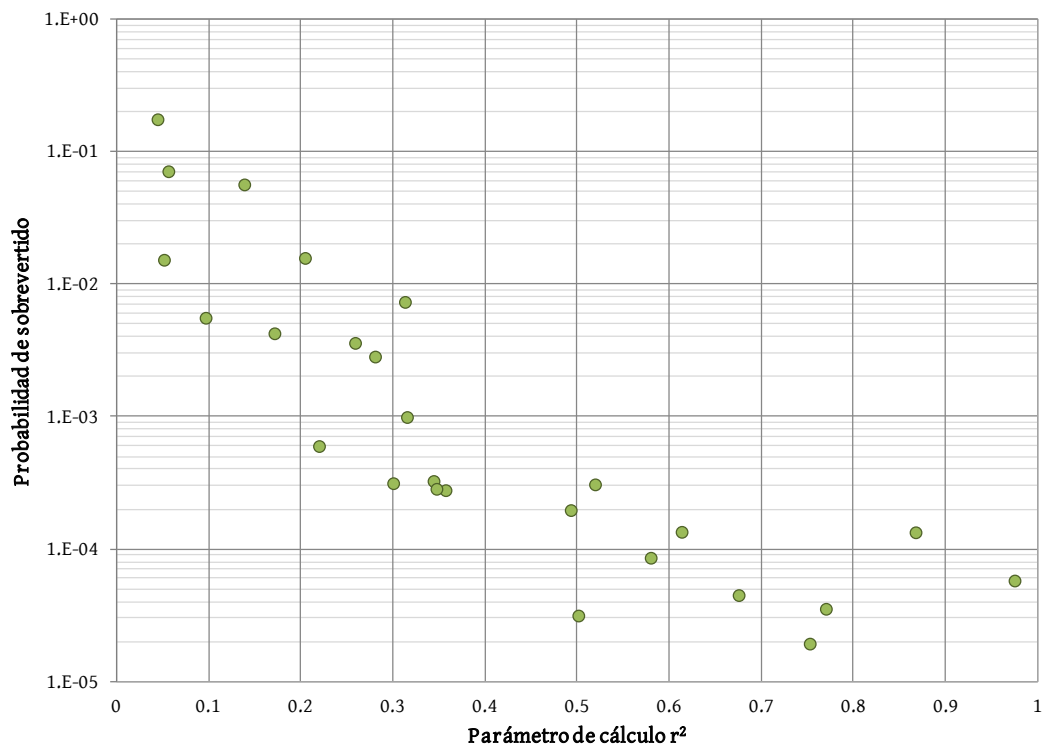


Figura 3.6: Relación entre el parámetro r^2 y la probabilidad de sobrevertido.

3.2.4 Ajuste de los coeficientes de la ecuación

El ajuste de los datos de probabilidades de sobrevertido p_{sob} (variable dependiente) al parámetro r^2 (variable independiente) se realiza mediante regresión no-lineal, utilizando una ecuación de la forma:

$$p_{sob} = f(r^2, \theta) \quad \text{Ecuación (5)}$$

Una vez definida la función f a utilizar, se determinan los coeficientes θ de forma que se optimice la bondad del ajuste, minimizando la raíz del error cuadrático medio, y maximizando el coeficiente de correlación de Pearson así como el índice de Nash-Sutcliffe.

Sin embargo, dada la naturaleza numérica de las probabilidades con las que se trabaja (valores entre 0 y 1, donde es de gran importancia su orden de magnitud), los índices de bondad pueden ser muy sensibles a valores altos de las probabilidades, mientras que valores reducidos pueden ser infra-estimados en el ajuste. Por lo tanto, se ha decidido aplicar el ajuste al logaritmo natural de las probabilidades como se menciona en [16].

De esta forma, en la Figura 3.7 se representa el logaritmo neperiano de la probabilidad de sobrevertido en función del parámetro r^2 .

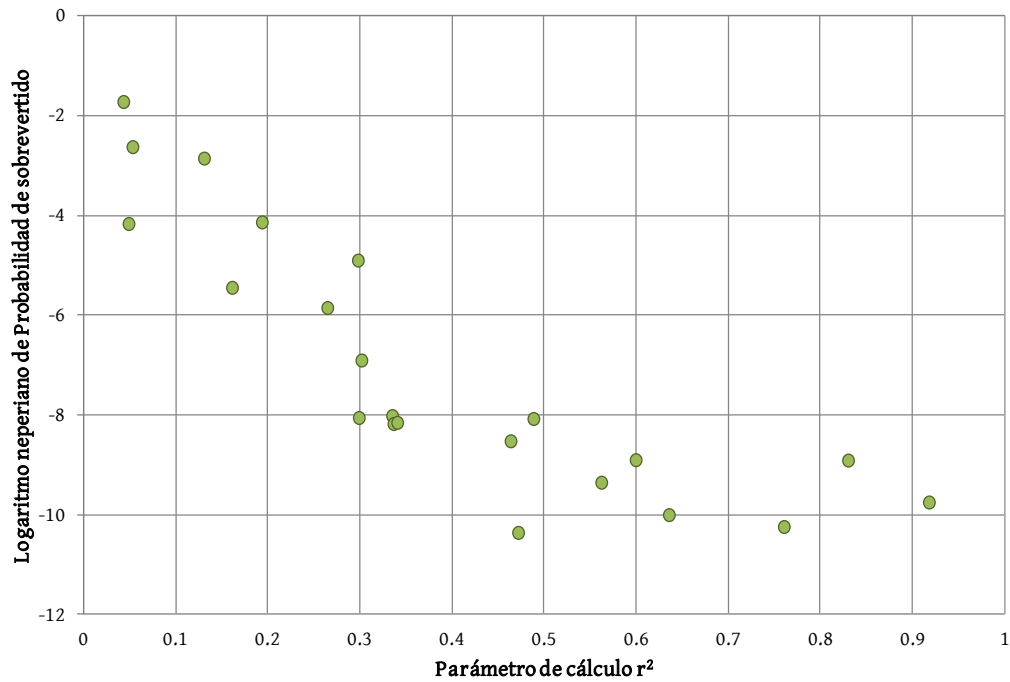


Figura 3.7: Relación entre el parámetro r^2 y el logaritmo neperiano de la probabilidad de sobrevertido.

Se aprecia una relación de tipo logarítmica entre el r^2 y el logaritmo de la probabilidad, con lo que se propone un ajuste mediante la ecuación:

$$\ln(p_{sob}) = \theta_1 \cdot \ln(r^2 + \theta_2) + \theta_3 \quad \text{Ecuación (6)}$$

Con estos 3 coeficientes queda asegurado que se ajuste a la forma y la magnitud de los datos, y además que cumpla la condición de $p_{sob}=1$ cuando $r^2=0$: éste es el caso en el que la presa no dispone de resguardo ninguno ni de capacidad de alivio, por lo tanto es condición necesaria que su probabilidad de sobrevertido sea la unidad.

Para ajustar los coeficientes θ_1 , θ_2 , y θ_3 así como el coeficiente α del parámetro r^2 , se divide el conjunto de datos (26 probabilidades de sobrevertido no nulas) en dos subconjuntos: uno para la calibración del modelo, y otro para su validación. En los casos en los que se dispone de un registro de datos amplio, es recomendable utilizar 2/3 de los datos para la calibración del modelo, y reservar el otro 1/3 para su validación. En este caso, al contar con un conjunto reducido, se ha decidido utilizar 22 datos en la calibración (84%) y 4 en la validación (16%). Para que la validación recoja la bondad del ajuste para distintas magnitudes de

la probabilidad de sobrevertido, se han incluido en este subconjunto casos distribuidos homogéneamente a lo largo del rango de probabilidades; así, se incluyen las presas 5, 8, 14 y 18.

Mediante un algoritmo simple de optimización, se han determinado los coeficientes que ofrecen un mejor ajuste de la ecuación. Éstos se presentan en la Tabla 3.7, junto con los índices de bondad (raíz del error cuadrático medio RMSE, coeficiente de correlación de Pearson R, e índice de Nash-Sutcliffe E) tanto para el conjunto de datos de calibración como para el de validación.

		Fase Calibración	Fase Validación
Índices Bondad	RMSE	1.04	1.19
	Coef. Pearson R	0.916	0.917
	Nash-Sutcliffe E	0.838	0.714
Coeficientes	α	0.47	
	θ_1	3.591	
	θ_2	0.05	
	θ_3	10.752	

Tabla 3.7: Valores de los coeficientes de la ecuación ajustados y los índices de bondad, para la fase de calibración y la de validación.

Como se aprecia, el comportamiento del modelo es satisfactorio para el conjunto de datos de calibración ($E > 0.8$), y algo peor en el conjunto de validación aunque el resultado es aceptable ($E > 0.7$).

Una vez se ha calibrado el modelo de los logaritmos de las probabilidades, se está en disposición de presentar la herramienta que relaciona directamente las características del sistema presa-embalse y sus cargas con la probabilidad de sobrevertido. Aplicando los coeficientes de la Tabla 3.7 a la Ecuación (6) y simplificando la expresión se obtiene lo siguiente:

$$p_{sob} = \frac{2.14 \cdot 10^{-5}}{(r^2 + 0.05)^{3.591}} \quad \text{Ecuación (7)}$$

donde

$$r^2 = \left(\frac{Resg}{VolAv} \right)^2 + 0.47 \cdot \left(\frac{CapODNC + CapODC \cdot \sqrt[n]{Op}}{Q_P} \right)^2$$

De forma expandida, la Ecuación (7) queda como sigue:

$$p_{sob} = \frac{2.14 \cdot 10^{-5}}{\left(\left(\frac{Resg}{VolAv} \right)^2 + 0.47 \cdot \left(\frac{CapODNC + CapODC \cdot \sqrt[n]{Op}}{Q_P} \right)^2 + 0.05 \right)^{3.591}}$$

En la Figura 3.8 se representan los datos de probabilidades de sobrevertido utilizados (Tabla 3.2) frente al parámetro r^2 (puntos verdes), así como la curva resultante del ajuste (azul). En la Tabla 3.8 se recogen los datos de las probabilidades y las probabilidades resultantes de la ecuación.

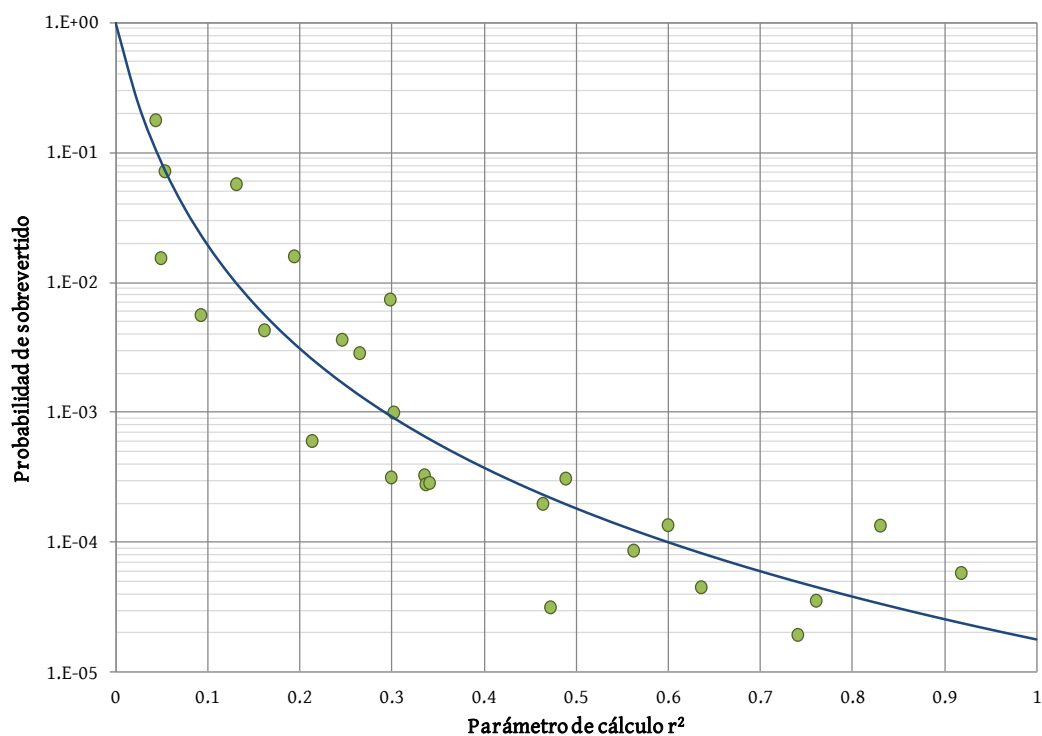


Figura 3.8: Datos de probabilidades de sobrevertido y su ajuste mediante la herramienta de estimación, en función del parámetro r^2 .

Tipología	Presa	Probabilidad Sobrevertido	Prob. sob. (ecuación)
HORMIGÓN DE GRAVEDAD	1	1.78E-01	1.10E-01
	2	3.26E-02	1.01E-02
	3	1.54E-02	8.89E-02
	4	6.96E-03	3.44E-03
	5	3.63E-03	1.71E-03
	6	2.86E-03	1.37E-03
	7	1.85E-04	6.62E-04
	8	5.43E-04	2.61E-03
	9	2.80E-04	6.53E-04
	10	7.41E-03	9.53E-04
	11	7.28E-05	1.25E-04
	12	1.78E-05	2.22E-04
	13	1.13E-05	2.41E-05
	14	1.71E-05	4.99E-05
	15	1.35E-04	3.39E-05
	16	1.11E-04	1.01E-04
	17	3.48E-05	4.56E-05

Tipología	Presa	Probabilidad Sobrevertido	Prob. sob. (ecuación)
ARCO Y BÓVEDA	18	3.16E-03	2.39E-02
	19	6.05E-04	9.17E-04
	20	3.16E-04	9.43E-04
	21	2.24E-04	6.29E-04
	22	4.51E-05	8.32E-05
	23	0.00E+00	3.52E-06
AZUDES HORMIGÓN	24	6.32E-02	7.63E-02
	25	4.29E-03	5.75E-03
	26	2.28E-04	1.98E-04
	27	1.61E-04	2.35E-04
MATERIALES SUELTOS	28	0.00E+00	2.47E-05
	29	0.00E+00	3.99E-08
	30	0.00E+00	5.33E-07

Tabla 3.8: Datos de probabilidades de sobrevertido y probabilidades resultantes de la ecuación.

Además, en la Figura 3.9 se comparan los resultados que se obtienen con la Ecuación (7) frente a los datos de partida; como se aprecia, en ningún momento la estimación difiere del dato en más de un orden de magnitud, con lo que se cumple el propósito de la herramienta.

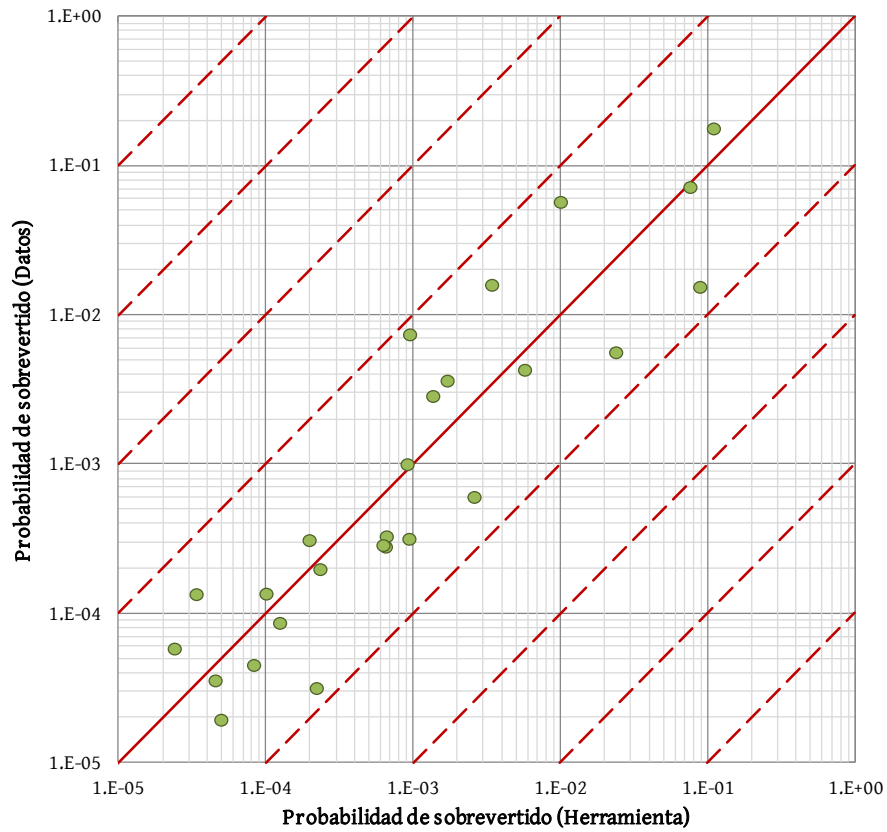


Figura 3.9: Relación entre las probabilidades de sobrevertido de los datos y las probabilidades obtenidas mediante la herramienta.

3.3 Limitaciones

El objetivo principal de esta herramienta no es la de ofrecer probabilidades de sobrevertido precisas, sino la de estimarlas de forma sencilla a partir de pocas variables. Esto se debe a que en el proceso de elaboración aparecen ciertos factores que alejan los resultados de lo es esperable según la física real del problema. Las principales fuentes de incertidumbre y de error que se deben considerar aquí son:

- Incertidumbre natural.
- Incertidumbre epistémica.
- Hipótesis simplificadoras.

Se entiende por **incertidumbre natural**, objetiva o aleatoria, a la relacionada con la aleatoriedad inherente a los procesos naturales, tanto en el tiempo como en el espacio. En nuestro caso, lo constituyen las cargas hidrológicas, recogidas mediante los hidrogramas de las distintas avenidas. Esta variabilidad se trata mediante modelos matemáticos que se ajustan de forma que puedan reproducir, de manera más o menos aproximada, el fenómeno analizado.

La **incertidumbre epistémica** es la derivada de la limitación de información y el conocimiento exacto de la realidad. Puede desglosarse en dos categorías: incertidumbre en los parámetros (limitada capacidad para estimarlos de forma adecuada a partir de un número limitado de datos, y de las limitaciones inherentes a las técnicas estadísticas empleadas en su estimación), e incertidumbre en el modelo (ignorancia sobre la medida en la que un modelo reproduce fielmente la realidad). Esta incertidumbre queda incorporada dado que la herramienta se ha definido en base a un número relativamente limitado de datos (únicamente los derivados de 30 modelos de sobrevertido), que se han relacionado mediante una única ecuación, y que se han utilizado unos pocos parámetros simplificados y estimados mediante optimización estadística.

Además de estas fuentes de incertidumbre propias del modelo, se han considerado unas **simplificaciones** en el cálculo de las laminaciones (indicadas en el apartado 3.2.1) que se han utilizado en los modelos de sobrevertido para

determinar las probabilidades de sobrevertido. Esto implica que existe una diferencia con la realidad física del problema.

De todo lo indicado anteriormente, es conveniente que la herramienta y sus resultados sean tratados con precaución, considerando siempre que no se busca obtener de forma precisa las probabilidades de sobrevertido sino un rango estimado.

CAPÍTULO 4

Relación entre probabilidades de sobrevertido y probabilidades de rotura

4.1 Objetivo

En el capítulo anterior se ha definido la herramienta que permite estimar las probabilidades de sobrevertido mediante una ecuación que utiliza unas pocas variables físicas del sistema presa-embalse.

En el presente capítulo se determina si se puede establecer una relación entre las probabilidades de sobrevertido y las probabilidades de rotura. Para ello se han utilizado modelos de riesgo de mayor o menor complejidad y precisión que incluyen la información relevante de las 30 presas utilizadas en el ajuste de la herramienta⁶. Con éstos, se han calculado para cada presa ambas probabilidades.

Una vez obtenida esta relación, el objetivo es definir unos rangos de probabilidades de sobrevertido obtenidas con la herramienta que correspondan con una probabilidad de rotura determinada. En función de estos rangos, es posible clasificar la relevancia del sobrevertido en las presas, y plantear así cuándo se requieren estudios más exhaustivos.

⁶ Aunque mediante estos modelos se puede calcular el riesgo de una presa, en nuestro caso únicamente es relevante determinar la probabilidad de rotura por sobrevertido, sin atender a las consecuencias asociadas.

4.2 Modelos de riesgo por sobrevertido

En este punto se van a determinar las probabilidades de sobrevertido y de rotura por sobrevertido del conjunto de las 30 presas estudiadas. De ellas, se dispone o bien de sus modelos de riesgo o de la información necesaria para elaborarlos.

En el ANEJO de *Indicaciones para la elaboración de modelos de riesgo* se describe cómo elaborar un modelo de riesgo. Su cálculo se ha realizado mediante el software específico iPresas [26]. En la Figura 4.1 se presenta un ejemplo genérico de modelo de riesgo, que incluye dos modos de fallo (sobrevertido y deslizamiento). Las cargas se recogen en los nodos de las cargas hidrológicas (*Avenida*), estación y resguardos (*est/resg*), niveles previos (*NP*), operatividades de los órganos de desagüe (*OpAliv* y *OpDesag*), y niveles y caudales resultantes de la laminación (*Laminación*). A continuación se definen los modos de fallo (*MF*), y su secuencia particular de desarrollo, así como los caudales de rotura correspondientes (*QRot*). Finalmente, se incluyen aquellos nodos que hacen referencia a las consecuencias, tanto económicas como en vidas en los casos de rotura (*€ si* y *vidas si*) y de no rotura de la presa (*€ no* y *vidas no*).

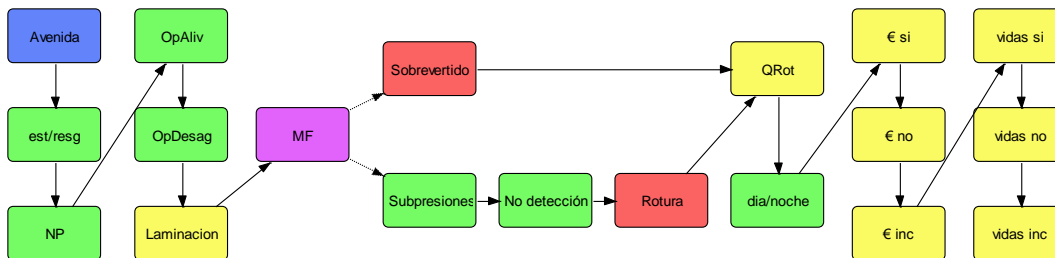


Figura 4.1: Ejemplo de modelo de riesgo completo utilizado en iPresas.

Como ya se ha comentado en el Apartado 2.3, es posible elaborar modelos de mayor o menor complejidad en función de la disponibilidad de información precisa sobre el sistema presa-embalse, y del alcance previsto de los trabajos [10]. Para este trabajo se han utilizado dos tipos de modelos de riesgo: **modelos completos** y **simplificados**. A continuación se detallan algunos aspectos en la elaboración de cada uno de ellos, mostrando sus diferencias y las consideraciones adoptadas.

4.2.1 Consideraciones para los modelos de riesgo completos

En el caso que nos ocupa, únicamente se ha considerado el modo de fallo por sobrevertido. Además, para la determinación de las probabilidades de rotura no es necesario contar con la información relativa a las consecuencias por lo que no se han incluido dichos nodos en los modelos. Así pues, del modelo expuesto en la Figura 4.1 sólo se va a utilizar la parte correspondiente a las cargas y la respuesta del sistema por sobrevertido, como se muestra en la Figura 4.2.

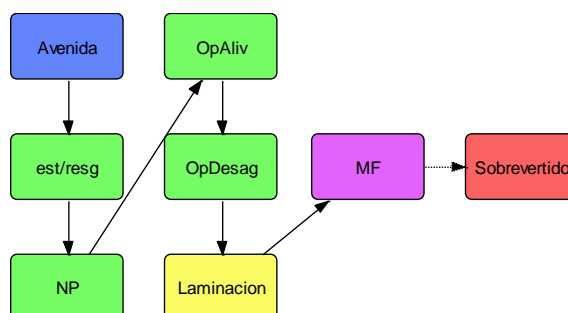


Figura 4.2: Parte del ejemplo de modelo de riesgo completo utilizada en la determinación de probabilidades de rotura y de sobrevertido.

A continuación se presentan las consideraciones más relevantes en cada nodo de los modelos de riesgo completos (como ya se ha hecho para los modelos de sobrevertido en el Apartado 3.2.1), y que completan las indicaciones del ANEJO final.

1. Avenidas

El rango de periodos de retorno T considerados va de 1 hasta 100,000 años, utilizando la misma información hidrológica que para el caso de los modelos de sobrevertido.

2. Resguardos

Los resguardos responden a una restricción en los niveles de explotación normal en los embalses, y pueden depender de la estación de año en la que nos encontremos. Éstos se plantean para disponer de un cierto volumen

capaz de absorber las entradas de agua procedente de eventos de avenida. Su principal efecto es la limitación de los niveles previos considerados en el modelo, no pudiéndose alcanzar mayores niveles que los máximos fijados en las normas de embalse o similares.

3. Niveles previos

Para definir los niveles previos de los modelos de riesgo completos se siguen las indicaciones del ANEJO final. Se parte de las curvas de probabilidad de excedencia, se discretiza el rango de niveles posibles en función de la precisión deseada y se obtiene la probabilidad de ocurrencia de cada intervalo al restar la probabilidad de excedencia de los niveles extremos del intervalo.

En la Figura 4.3 se representa un ejemplo de la relación entre el nivel previo y su probabilidad de excedencia, con los intervalos de discretización (trazo rojo discontinuo) y los niveles finalmente incluidos en el modelo (puntos verdes).

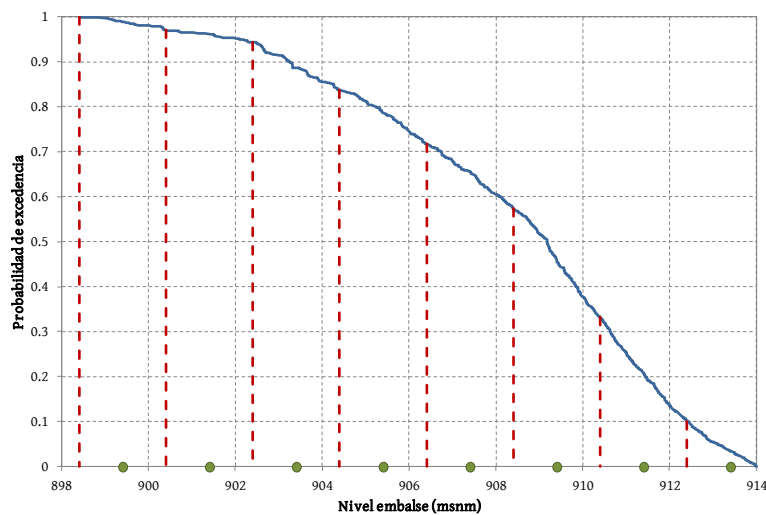


Figura 4.3: Ejemplo de curva de probabilidad de excedencia de niveles previos y discretización empleada.

4. Órganos de desagüe

En este caso se incluyen todos aquellos órganos de desagüe contemplados en los criterios de laminación de avenidas.

En los casos en los que los modelos de riesgo ya han sido elaborados, se dispone de las fiabilidades individuales de los órganos. Éstas se han estimado mediante análisis cuantitativos (como pudieran ser los árboles de fallo) o bien por juicio de experto. Cuando no se dispone de modelos previamente definidos, se utilizan las fiabilidades estándar recogidas en la Tabla 3.1 en base al estado general de los órganos de desagüe.

5. Estrategias de laminación

En la elaboración de modelos de riesgo completos, se consideran los criterios de gestión de avenidas particulares para cada presa. Los resultados de la laminación dependerán tanto de dichos criterios como de la combinación los demás condicionantes: hidrología de entrada, niveles previos, y órganos de desagüe utilizados.

6. Modo de fallo por sobrevertido

Este nodo define la probabilidad de producirse el sobrevertido de la presa o su rotura condicionada a los niveles alcanzados en el embalse.

En el cálculo de las probabilidades de sobrevertido (en las que no importa su magnitud ni duración), esta probabilidad será 1 en todas aquellas ramas del modelo en las que el nivel máximo supere la cota de coronación de la presa.

Por otro lado, en la determinación de las probabilidades de rotura por sobrevertido se requiere determinar las cargas aplicadas, como por ejemplo la altura y el tiempo de duración del sobrevertido. Por los mecanismos involucrados en el desarrollo de este modo de fallo, dicha relación diferirá según la tipología de la presa (un sobrevertido en una

presa de materiales sueltos afectará más a su integridad que en una presa arco).

Para llevar a cabo la estimación de las probabilidades de estos nodos se dispone de varias herramientas, principalmente el análisis de fiabilidad [6] [18], el juicio de experto [5] [8] y más recientemente el uso de tablas que relacionan coeficientes de seguridad y probabilidades de rotura [30].

En este trabajo se han utilizado unas curvas en forma de S que relacionan directamente altura de sobrevertido y probabilidad condicional de rotura, en función de la tipología de la presa (materiales sueltos, hormigón de gravedad, arco y bóveda de hormigón, y azudes de hormigón). Estas curvas se basan en la literatura existente (principalmente [2] y [24]) y en la experiencia de los autores. La Tabla 4.1 recoge los valores numéricos de estas probabilidades y la Figura 4.4 los representa gráficamente.

Presas de materiales sueltos		Presas de gravedad		Presas arco y bóveda		Azudes de hormigón	
Altura sobrevertido (m)	Probabilidad de rotura	Altura sobrevertido (m)	Probabilidad de rotura	Altura sobrevertido (m)	Probabilidad de rotura	Altura sobrevertido (m)	Probabilidad de rotura
0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
0.15	10%	0.3	10%	0.3	5%	0.75	5%
0.35	90%	0.7	90%	0.7	45%	1.75	45%
0.5	100%	1	100%	1	50%	2.5	50%

Tabla 4.1: Valores de probabilidades de rotura condicionales en función de la altura de sobrevertido y de la tipología de la presa.

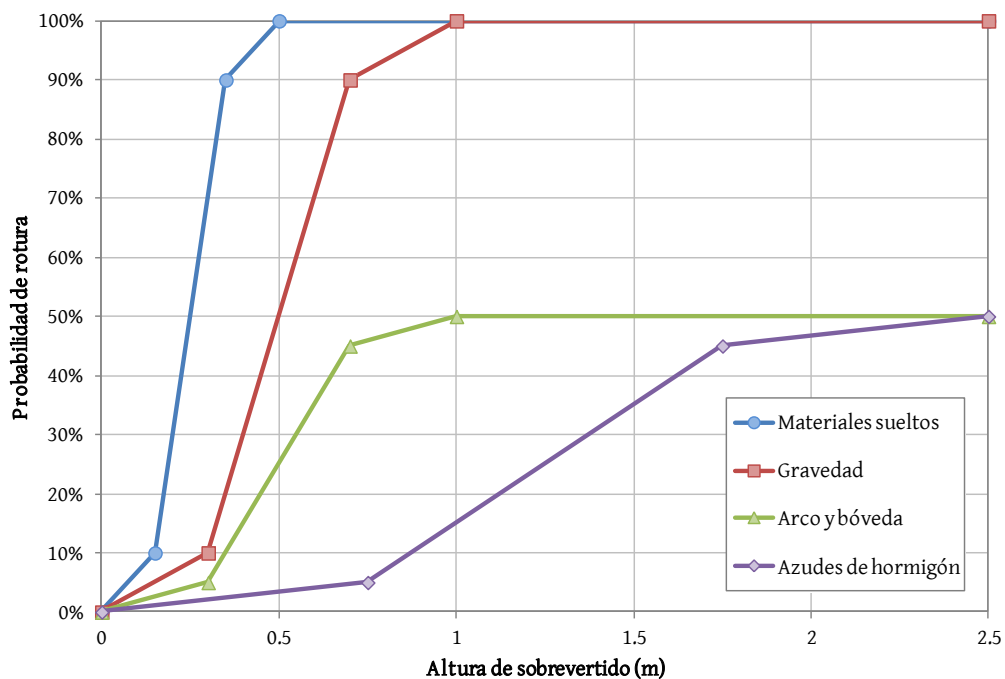


Figura 4.4: Curvas estandarizadas que relacionan la altura de sobrevetido con la probabilidad de fallo para diferentes tipos de presas.

Con todo lo indicado, se realizan los cálculos de las probabilidades (de sobrevetido y de rotura) con modelos completos mediante el software iPresas. Los resultados se presentan en la Tabla 4.2.

TIPO	PRESA	MODELOS COMPLETOS	
		prob. sob.	prob rotura
HORMIGÓN DE GRAVEDAD	1	1.37E-02	5.39E-04
	2	3.34E-03	3.36E-04
	3	1.15E-02	4.79E-03
	4	5.11E-04	1.53E-04
	5	8.38E-04	1.12E-04
	6	8.86E-04	4.63E-04
	7	1.55E-06	1.21E-07
	8	1.08E-05	5.43E-06
	9	1.11E-03	5.68E-04
	10	1.46E-04	3.49E-05
	11	3.62E-06	3.61E-07
	12	1.78E-05	1.09E-06
	13	3.78E-07	1.24E-07
	14	1.57E-05	8.42E-07
	15	4.34E-06	1.60E-06
	16	3.83E-07	3.35E-08
	17	1.62E-10	2.87E-12
ARCO Y BÓVEDA	18	5.70E-04	1.96E-05
	19	3.18E-04	8.49E-05
	20	1.66E-06	2.95E-07
	21	2.70E-06	3.76E-07
	22	1.80E-05	3.91E-07
	23	0.00E+00	0.00E+00
AZUDES HORMIGÓN	24	8.81E-03	4.86E-04
	25	1.94E-03	1.90E-04
	26	9.22E-05	7.41E-06
	27	1.75E-05	2.23E-07
MATERIALES SUELTOS	28	0.00E+00	0.00E+00
	29	0.00E+00	0.00E+00
	30	0.00E+00	0.00E+00

Tabla 4.2: Probabilidades de sobrevertido y de rotura por sobrevertido de las 30 presas estudiadas, en función de su tipología para modelos de riesgo completos.

4.2.2 Consideraciones para los modelos de riesgo simplificados

La estructura de los modelos de riesgo simplificados es similar a la descrita para modelos completos; se han considerado sin embargo ciertas simplificaciones, como se menciona en [10]. En la Figura 4.5 se representa la parte del ejemplo de modelo simplificado que se ha utilizado para el cálculo de las probabilidades de fallo y de sobrevertido.

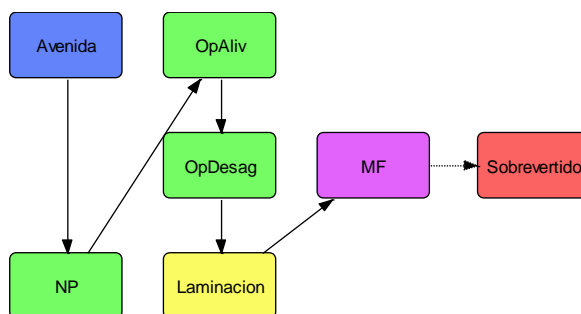


Figura 4.5: Parte del ejemplo de modelo de riesgo simplificado utilizada en la determinación de probabilidades de rotura y de sobrevertido.

A continuación se presentan las consideraciones adoptadas en cada nodo y su distinción con los relativos a los modelos de riesgo completos.

1. Avenidas

Se ha utilizado la misma hidrología que en los modelos de riesgo completos, cuyo rango de periodos de retorno T va de 1 hasta 100,000 años.

2. Niveles previos

En los modelos simplificados se considera que el embalse se encuentra siempre a su Nivel Máximo Normal (NMN). Bajo este supuesto los resultados quedan del lado de la seguridad ya que en general los embalses se encuentran con el nivel de agua por debajo del NMN (como ya se ha indicado para los modelos de sobrevertido en el Apartado 3.2.1).

3. Órganos de desagüe

Como antes, se incluyen todos aquellos órganos de desagüe contemplados en los criterios de laminación de avenidas. Sus fiabilidades se determinan siguiendo los criterios estándar de la Tabla 3.1, en función del estado de los órganos de desagüe.

4. Estrategias de laminación

En los modelos simplificados, los criterios de laminación consisten en igualar en la medida de lo posible los vertidos Q_{salida} a las entradas de caudales E , evitando que Q_{salida} exceda a E .

5. Modo de fallo por sobrevertido

Todas las consideraciones del nodo relativo al modo de fallo por sobrevertido son iguales que en los modelos de riesgo completos.

Así, se presentan en la Tabla 4.3 las probabilidades (de sobrevertido y de rotura) obtenidas con los 30 modelos simplificados.

TIPO	PRESA	MODELOS SIMPLIFICADOS	
		prob. sob.	prob rotura
HORMIGÓN DE GRAVEDAD	1	1.78E-01	6.87E-03
	2	4.39E-02	1.02E-02
	3	1.39E-02	5.63E-03
	4	3.05E-03	1.33E-03
	5	3.05E-03	4.26E-04
	6	2.05E-03	1.00E-03
	7	3.29E-04	4.45E-05
	8	4.26E-04	1.17E-04
	9	2.80E-04	1.32E-04
	10	2.96E-03	1.26E-03
	11	5.68E-05	2.07E-05
	12	1.78E-05	7.53E-07
	13	1.05E-05	3.21E-06
	14	1.38E-05	4.73E-07
	15	1.32E-04	6.73E-05
	16	8.47E-05	1.03E-05
	17	8.45E-06	4.88E-07
ARCO Y BÓVEDA	18	1.97E-03	8.47E-05
	19	6.10E-04	1.71E-04
	20	1.80E-04	3.71E-05
	21	1.21E-04	1.78E-05
	22	3.02E-05	5.86E-07
	23	0.00E+00	0.00E+00
AZUDES HORMIGÓN	24	7.20E-02	2.46E-02
	25	4.29E-03	2.02E-04
	26	3.10E-04	2.37E-05
	27	2.45E-03	4.15E-05
MATERIALES SUELTOS	28	0.00E+00	0.00E+00
	29	0.00E+00	0.00E+00
	30	0.00E+00	0.00E+00

Tabla 4.3: Probabilidades de sobrevvertido y de rotura por sobrevvertido de las 30 presas estudiadas, en función de su tipología para modelos de riesgo simplificados.

Como se menciona en el Apartado 3.2.2, existen 4 casos en los que las probabilidades (de sobrevvertido y de rotura) son nulas para el rango de avenidas consideradas, tanto en modelos completos como simplificados.

4.3 Relación entre probabilidades de sobrevertido y de rotura por sobrevertido

Una vez definidas las probabilidades de sobrevertido y de rotura por sobrevertido mediante modelos de riesgo completos y simplificados, se busca una relación entre ambas. Dado que las probabilidades de rotura por sobrevertido dependen de la tipología de la presa (Tabla 4.1), dicha relación también lo hará.

4.3.1 Utilización de modelos de riesgo completos

A continuación se relacionan para cada presa la probabilidad de sobrevertido con la probabilidad de rotura por sobrevertido dependiendo de su tipología. Los puntos resultantes se representan en la Figura 4.6 siguiente. A falta de más datos, la distribución de los puntos hace pensar que se puede ajustar una relación potencial de la forma $p_{rot} = p_{sob}^{\alpha}$ donde el factor α varía para cada tipología de presa.

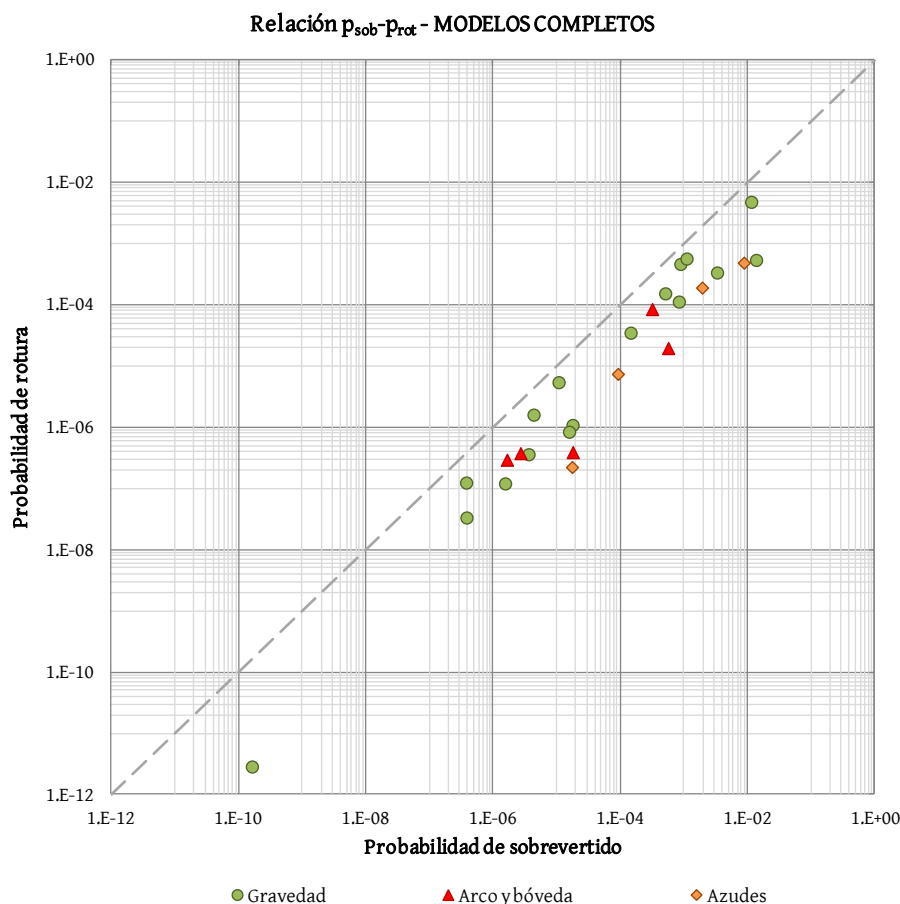


Figura 4.6: Relación gráfica entre las probabilidades de sobrevvertido y de rotura por sobrevvertido para distintos tipos de presas, utilizando modelos de riesgo completos.

Se busca ahora relacionar estos puntos de forma que se optimice la bondad del ajuste. Se plantea para cada tipología una relación potencial que haga mínimo la raíz del error cuadrático medio, y que maximice el coeficiente de correlación de Pearson así como el índice de Nash-Sutcliffe [17]. Como se explica en el 3.2.4, el ajuste se va a aplicar sobre los logaritmos naturales de las probabilidades.

A continuación se presenta la Tabla 4.4 que recoge para cada tipología de presas la relación potencial entre la probabilidad de sobrevvertido p_{sob} y la probabilidad de rotura p_{rot} ⁷. Se muestran además los índices de bondad del ajuste obtenido

⁷ Dado que en el conjunto de presas con el que se trabaja no existe ninguna de materiales sueltos en la que se produzca sobrevvertido, no se ha obtenido la relación correspondiente a dicha tipología.

sobre sus logaritmos neperianos: la raíz del error cuadrático medio RMSE, coeficiente de Pearson R, e índice de Nash-Sutcliffe E.

	Tipología de la presa		
	Gravedad	Arco y bóveda	Azudes
RELACIÓN	$p_{rot} = p_{sob}^{1.17}$	$p_{rot} = p_{sob}^{1.22}$	$p_{rot} = p_{sob}^{1.37}$
RMSE	0.98	1.21	0.75
Coef. Pearson R	0.984	0.916	0.979
Nash-Sutcliffe E	0.964	0.739	0.938

Tabla 4.4: Relaciones entre probabilidades de sobrevertido y de rotura para distintas tipologías, y valores de los índices de bondad del ajuste, para modelos completos.

Los datos de probabilidades y su relación se muestran gráficamente en la Figura 4.7 (presas de hormigón de gravedad), en la Figura 4.8 (presas arco y bóveda) y en la Figura 4.9 (azudes de hormigón) siguientes.

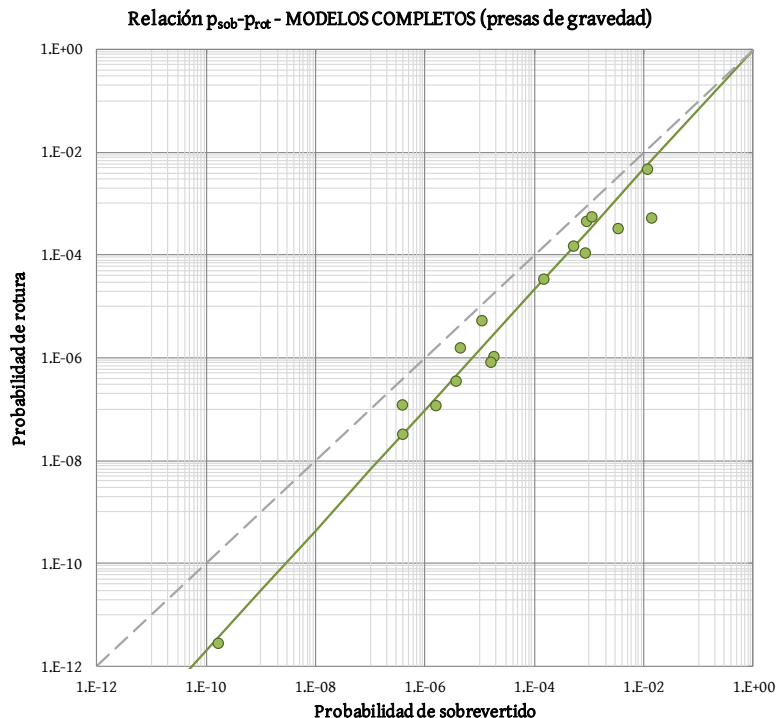


Figura 4.7: Ajuste de la relación probabilidad de sobrevertido-probabilidad de rotura, para presas de tipo hormigón de gravedad.

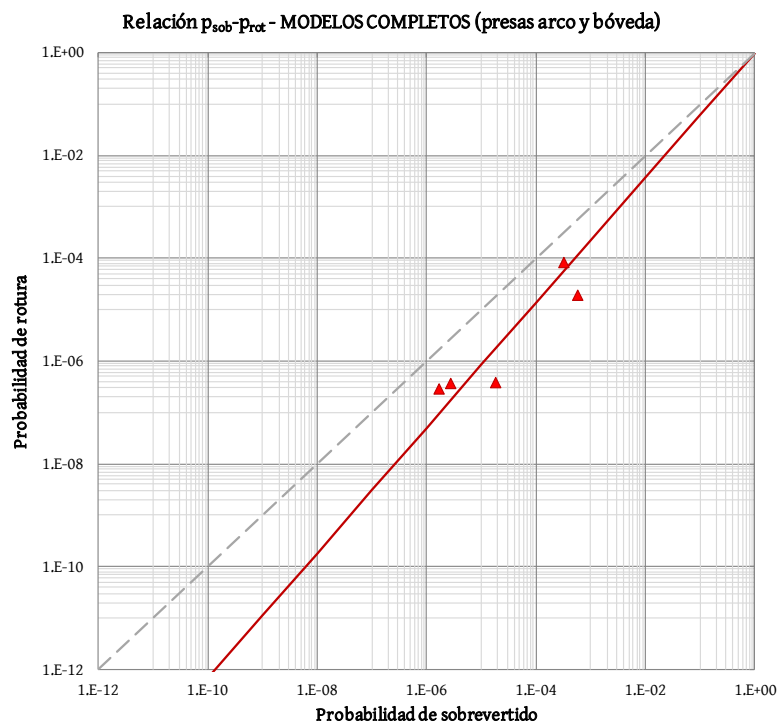


Figura 4.8: Ajuste de la relación probabilidad de sobrevetido-probabilidad de rotura, para presas de tipo arco y bóveda.

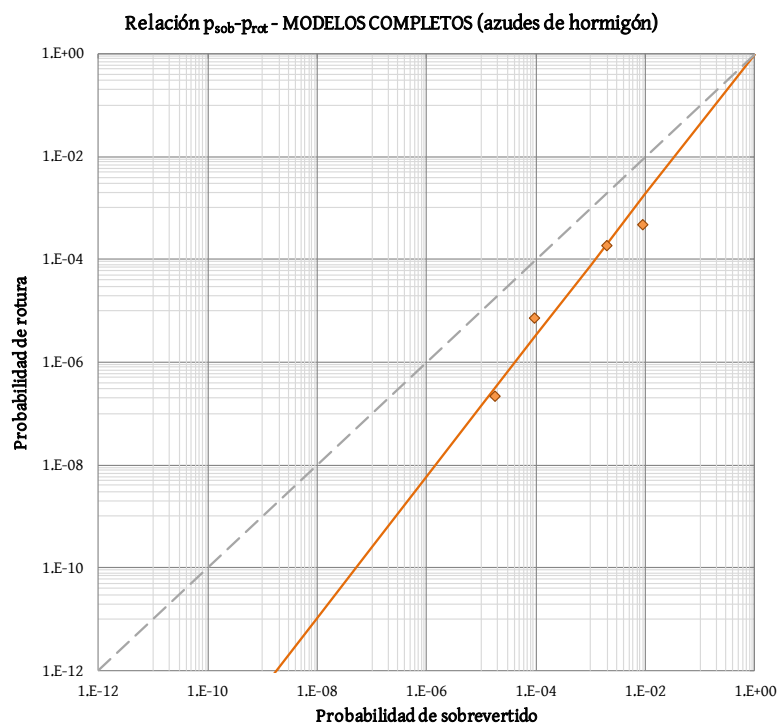


Figura 4.9: Ajuste de la relación probabilidad de sobrevetido-probabilidad de rotura, para azudes de hormigón.

4.3.2 Utilización de modelos de riesgo simplificados

Como antes, se representa en la Figura 4.10 la relación para cada presa entre la probabilidad de sobrevetido y la probabilidad de rotura por sobrevetido, dependiendo de su tipología.

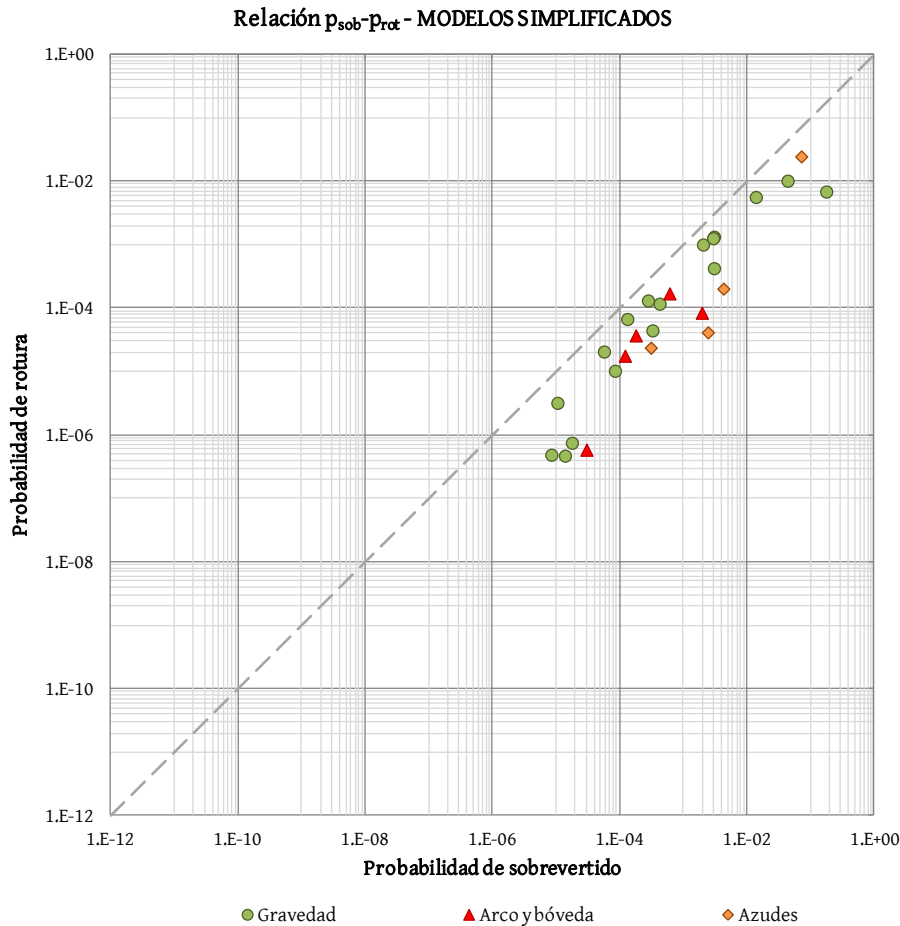


Figura 4.10: Relación gráfica entre las probabilidades de sobrevetido y de rotura por sobrevetido para distintos tipos de presas, utilizando modelos de riesgo simplificados.

De la misma forma que para las probabilidades resultantes de modelos de riesgo completos, éstas se han ajustado para el caso de modelos simplificados a una relación de tipo potencial. Las relaciones potenciales resultantes y los valores de los índices de bondad de los ajustes para cada tipología están recogidos en la Tabla 4.5 siguiente.

	Tipología de la presa		
	Gravedad	Arco y bóveda	Azudes
RELACIÓN	$p_{rot} = p_{sob}^{1.20}$	$p_{rot} = p_{sob}^{1.28}$	$p_{rot} = p_{sob}^{1.47}$
RMSE	1.01	0.97	0.91
Coef. Pearson R	0.963	0.872	0.948
Nash-Sutcliffe E	0.915	0.757	0.888

Tabla 4.5: Relaciones entre probabilidades de sobrevertido y de rotura para distintas tipologías, y valores de los índices de bondad del ajuste, para modelos simplificados.

Los datos de probabilidades y su relación se muestran gráficamente en la Figura 4.11 (presas de hormigón de gravedad), en la Figura 4.12 (presas arco y bóveda) y en la Figura 4.13 (azudes de hormigón) siguientes.

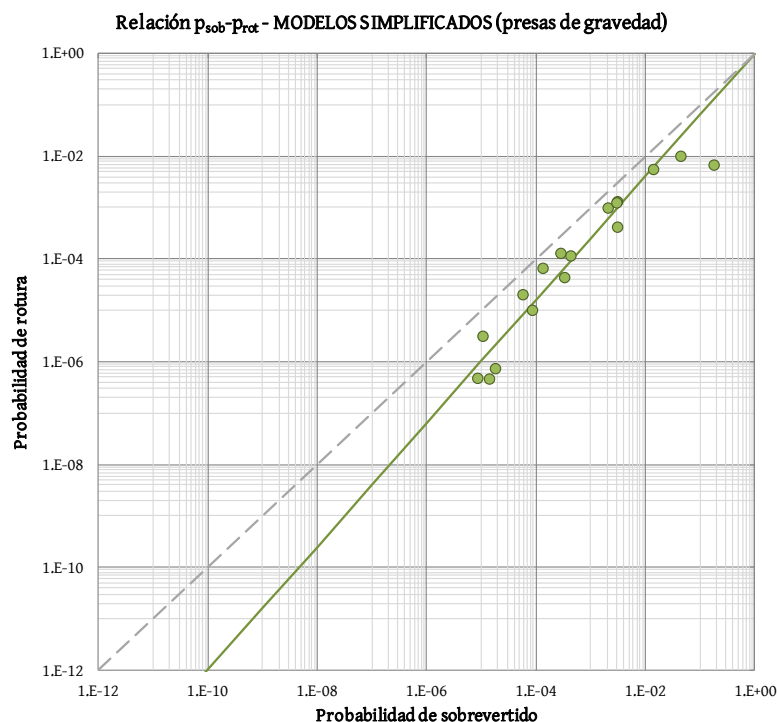


Figura 4.11: Ajuste de la relación probabilidad de sobrevertido-probabilidad de rotura, para presas de tipo hormigón de gravedad.

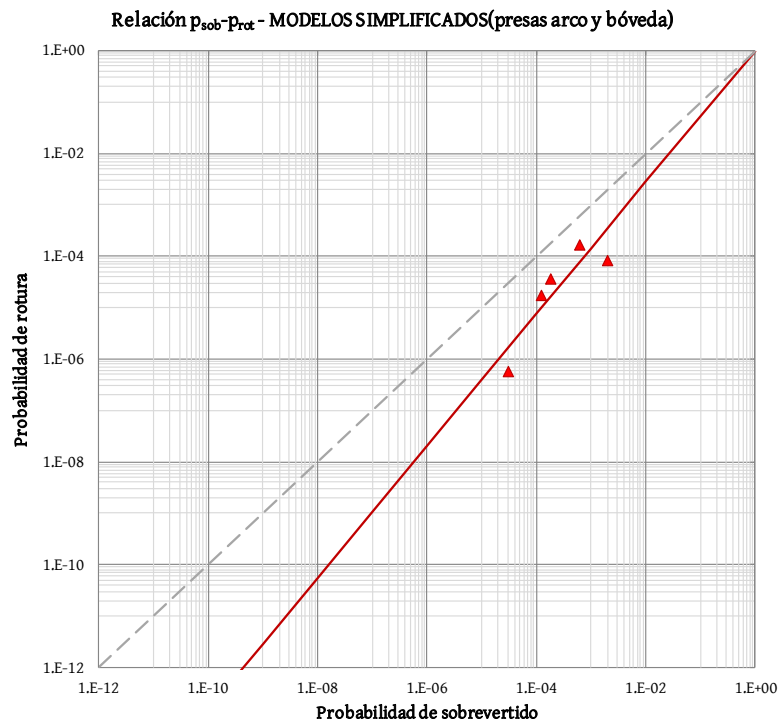


Figura 4.12: Ajuste de la relación probabilidad de sobrevertido-probabilidad de rotura, para presas de tipo arco y bóveda.

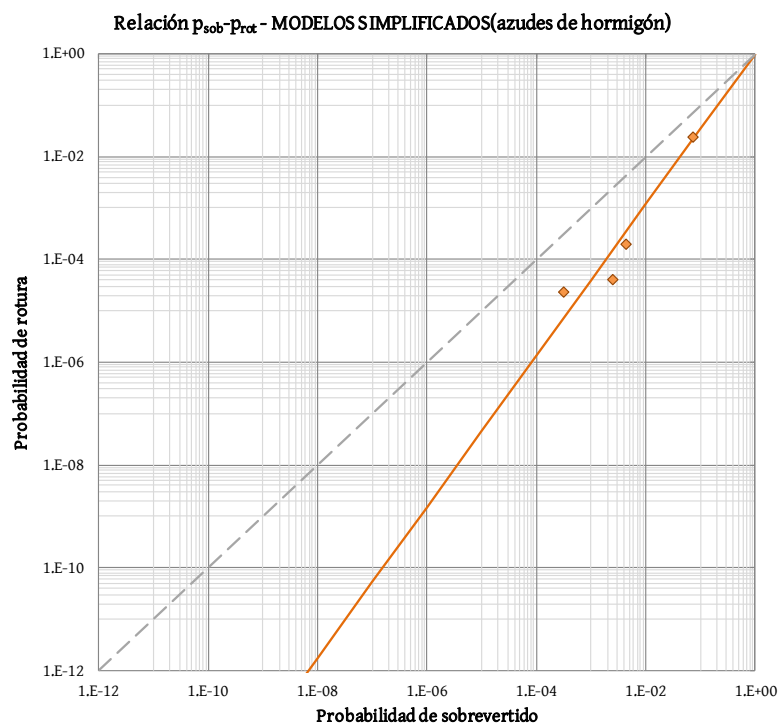


Figura 4.13: Ajuste de la relación probabilidad de sobrevertido-probabilidad de rotura, para azudes de hormigón.

De lo visto, se concluye que es posible establecer una relación entre la probabilidad de sobrevertido de una presa y su probabilidad de rotura por sobrevertido, en función de su tipología. Tanto en el caso de modelos de riesgo completos como simplificados, los índices de bondad obtenidos indican que se trata de ajustes de calidad y por lo tanto aseguran un alto nivel de predicción.

Además, el ajuste es capaz de sintetizar de forma razonable el efecto de la distribución de niveles máximos alcanzados sobre las probabilidades de fallo (mediante las curvas de rotura de la Figura 4.4). Éstas pueden determinarse conociendo únicamente la tipología de la presa y su probabilidad de sobrevertido.

Sin embargo, el escaso número de casos que se han podido estudiar (y en particular de presas arco y bóveda y azudes de hormigón) no ofrece suficientes garantías de validez de los ajustes para una generalización de los mismos. Es por lo tanto muy recomendable complementar este estudio con modelos de más presas.

CAPÍTULO 5

Propuesta de clasificación de presas para la gestión de la seguridad

Llegados a este punto se ha determinado lo siguiente:

- a) Una herramienta de estimación de probabilidades de sobrevertido, que utiliza una ecuación cuyas variables son las características hidráulicas e hidrológicas principales del sistema presa-embalse: capacidad de diseño los aliviaderos, volumen de resguardo desde el NMN hasta coronación, y caudal pico y volumen de la avenida correspondiente a un periodo de retorno de 1,000 años. Los coeficientes de dicha ecuación han sido ajustados a los resultados de modelos de sobrevertido.
- b) Que existe una relación entre la probabilidad de sobrevertido y de rotura por sobrevertido (utilizando tanto modelos de riesgo completos como simplificados), y que depende de la tipología de la presa. Mediante esto, se ha demostrado que se puede determinar la probabilidad de rotura de una presa utilizando su probabilidad de sobrevertido.

Así pues, lo que se busca en este punto es utilizar ambas relaciones para definir en qué medida las probabilidades obtenidas con la ecuación de a) (a partir de ahora *probabilidad de sobrevertido de la herramienta*) pueden estimar un rango de probabilidades de rotura por sobrevertido obtenidas en b) (a partir de ahora *probabilidad de rotura de los modelos*).

Si además se consideran criterios de tolerabilidad de riesgo, se definen unas recomendaciones para clasificar el modo de fallo por sobrevertido de una presa dada como muy relevante, relevante o de escasa importancia en un análisis de riesgo⁸. En función de los resultados será necesario plantear estudios más exhaustivos que puedan incluir cálculos de laminaciones completas y uso de modelos de riesgo.

Esto puede ser útil en un análisis de riesgo de un conjunto de presas para una fase previa tipo *screening*. El objetivo de dicho análisis es el de clasificar y comparar las presas, de forma simplificada y homogénea, en términos de su potencial riesgo, ayudando a la organización, planificación y asignación de recursos a programas de seguridad mediante la identificación de aquellas presas

⁸ Inspirado en la Dam Safety Action Classification (DSAC) propuesta por el USACE [14].

con niveles de riesgo más elevados. Es importante tener en cuenta que los resultados de este análisis son relativos; éstos se aplican exclusivamente para comparar proyectos evaluados con esta herramienta.

A continuación se procede a plantear estas relaciones y sus recomendaciones ulteriores, utilizando para ello los resultados de los modelos de riesgo completos (Apartado 4.2.1) y simplificados (Apartado 4.2.2).

5.1 Probabilidades mediante modelos de riesgo completos

Se dispone por un lado de las probabilidades de sobrevertido de cada presa mediante la herramienta (Tabla 3.8), y por otro de las probabilidades de rotura calculadas mediante modelos completos (Tabla 4.2). En la Figura 5.1 se representan ambas series de datos, distinguiendo por la tipología de cada presa.

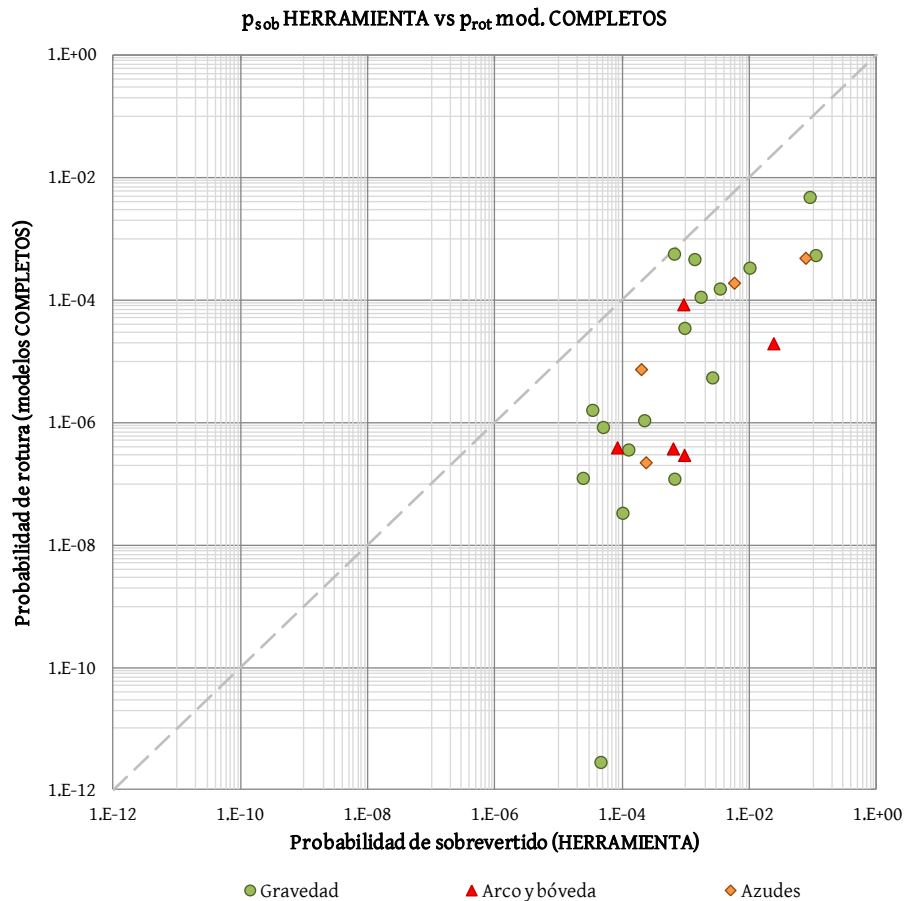


Figura 5.1: Relación entre las probabilidades de sobrevertido de la herramienta y las probabilidades de rotura de los modelos completos.

La dispersión que se observa en los puntos se debe principalmente a:

- La dispersión propia consecuencia de relacionar probabilidades de sobrevertido y probabilidades de rotura, ya que éstas no siguen un ajuste perfecto (puesto de manifiesto en el Apartado 4.3.1). Esta dispersión tiene que ver con la utilización de curvas de rotura.
- Las simplificaciones consideradas a la hora de definir y calcular los modelos de sobrevertido (Apartado 3.2.1) frente a las consideraciones de

los modelos de riesgo. En particular, la dispersión se ve afectada de manera notable por considerar un único nivel previo en los modelos de sobrevertido (el NMN) frente a considerar una distribución de niveles en los modelos de riesgo completos.

- Los errores en el ajuste de la herramienta a las probabilidades de sobrevertido obtenidas en los modelos de sobrevertido (Apartado 3.2.4).

Así pues no es recomendable intentar ajustar una relación biunívoca entre las probabilidades de sobrevertido obtenidas mediante la herramienta y las probabilidades de rotura de los modelos completos.

Frente a esto, se ha decidido plantear unos límites superior e inferior que abarquen de forma razonable estos puntos, incluyendo como mínimo el 85% de los mismos. Parece que la dispersión de los puntos aumenta conforme nos alejamos de las probabilidades cercanas a la unidad, por lo que se propone la expresión siguiente para dichos límites:

$$p_{rot} = p_{sob}^{\alpha}$$

donde el factor α varía para cada tipología de presa. En la Tabla 5.1 se recogen los límites según la tipología de la presa, y se representan junto con los puntos para el caso de presas de hormigón de gravedad (Figura 5.2), arco y bóveda (Figura 5.3), y azudes de hormigón (Figura 5.4).

Mediante estas curvas es posible obtener un rango de estimación de probabilidades de sobrevertido para una probabilidad de rotura dada.

	Tipología de la presa		
	Gravedad	Arco y bóveda	Azudes
Límite inferior	$p_{rot} = p_{sob}^{2.2}$	$p_{rot} = p_{sob}^3$	$p_{rot} = p_{sob}^{3.1}$
Límite superior	$p_{rot} = p_{sob}^{1.15}$	$p_{rot} = p_{sob}^{1.3}$	$p_{rot} = p_{sob}^{1.35}$

Tabla 5.1: Límites superior e inferior de estimación de las probabilidades de rotura en los modelos completos.

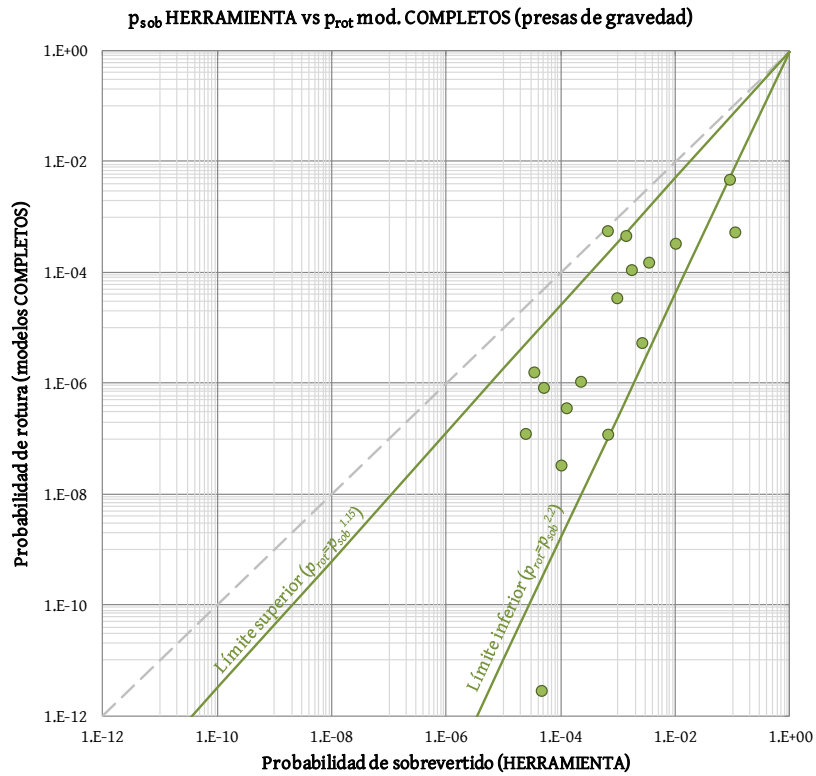


Figura 5.2: Relación y límites de estimación de la probabilidad de rotura en función de la probabilidad de sobrevetido de la herramienta, para modelos completos de presas de gravedad.

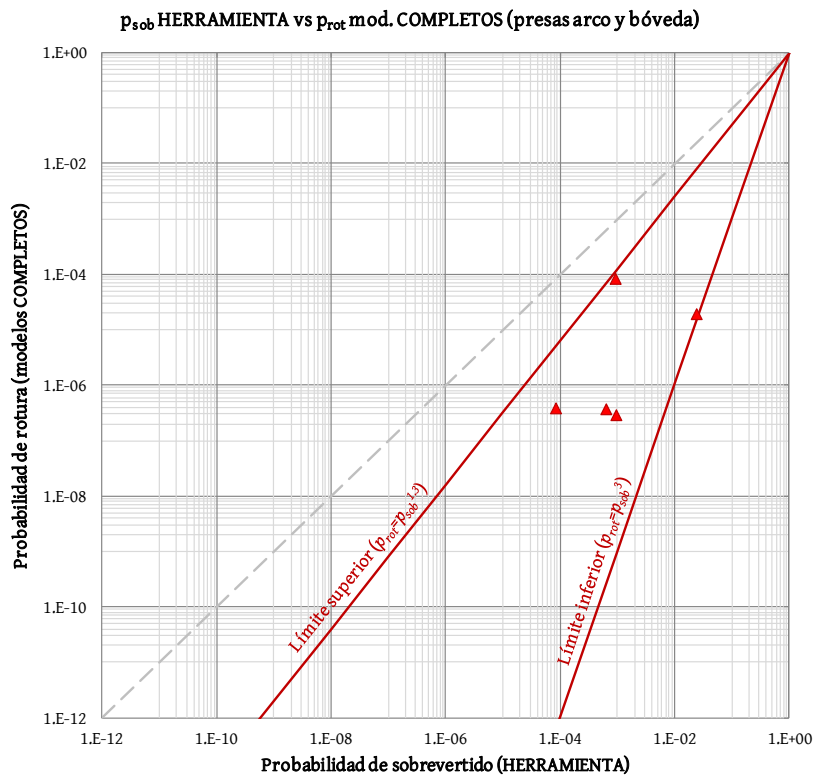


Figura 5.3: Relación y límites de estimación de la probabilidad de rotura en función de la probabilidad de sobrevvertido de la herramienta, para modelos completos de presas arco y bóveda.

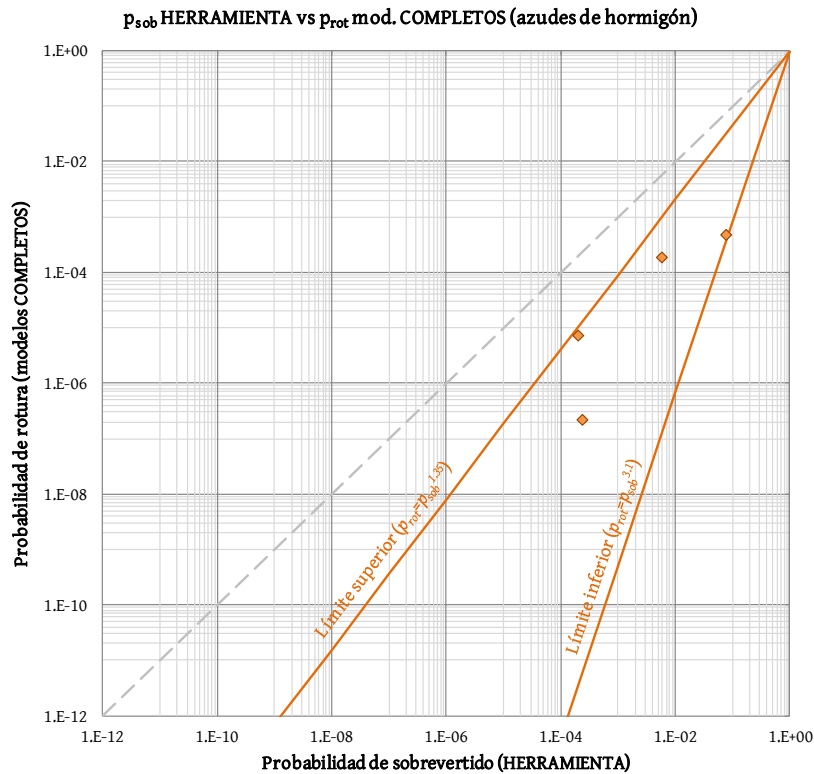


Figura 5.4: Relación y límites de estimación de la probabilidad de rotura en función de la probabilidad de sobrevertido de la herramienta, para modelos completos de azudes de hormigón.

Los resultados se deben homogeneizar y comparar con criterios internacionales de tolerabilidad para establecer si el modo de fallo por sobrevertido es determinante o no. Entre los criterios existentes, se pueden mencionar por su relevancia los propuestos por el USBR (United States Bureau of Reclamation) [21], el ANCOLD (Australian Committee on Large Dams) [2], y el USACE (United States Corps of Engineers) [19] que se basa en los dos primeros. El USBR establece sus criterios de tolerabilidad en base a dos medidas: la probabilidad anual de rotura y el valor esperado de pérdida de vidas humanas. El límite que plantea para la probabilidad anual de rotura es de 10^{-4} . Por su parte, uno de los criterios propuestos por el ANCOLD limita el riesgo de la persona más expuesta a 10^{-4} al año para presas existentes y a 10^{-5} al año para nuevas presas o grandes recrecimientos (*riesgo inaceptable*); en la práctica, es habitual equiparar este valor a la probabilidad de rotura. Así, en este trabajo se va a tomar como criterio común de tolerabilidad el de 10^{-4} para la probabilidad anual de rotura.

Fijado este criterio de la probabilidad de rotura, se definen las dos probabilidades de sobrevertido de la herramienta correspondientes a cada uno

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE ESTIMACIÓN DE PROBABILIDADES DE SOBREVERTIDO

EN PRESAS EN EL CONTEXTO DEL ANÁLISIS DE RIESGO

de los dos límites propuestos en la Tabla 5.1 para dicho criterio. Estas dos probabilidades de sobrevertido son las que se representan con sendas flechas en la Figura 5.5 y dividen el eje de abscisas en tres intervalos: aquellas probabilidades inferiores a la flecha de la izquierda, las superiores a la flecha de la derecha, y las probabilidades entre ambas flechas.

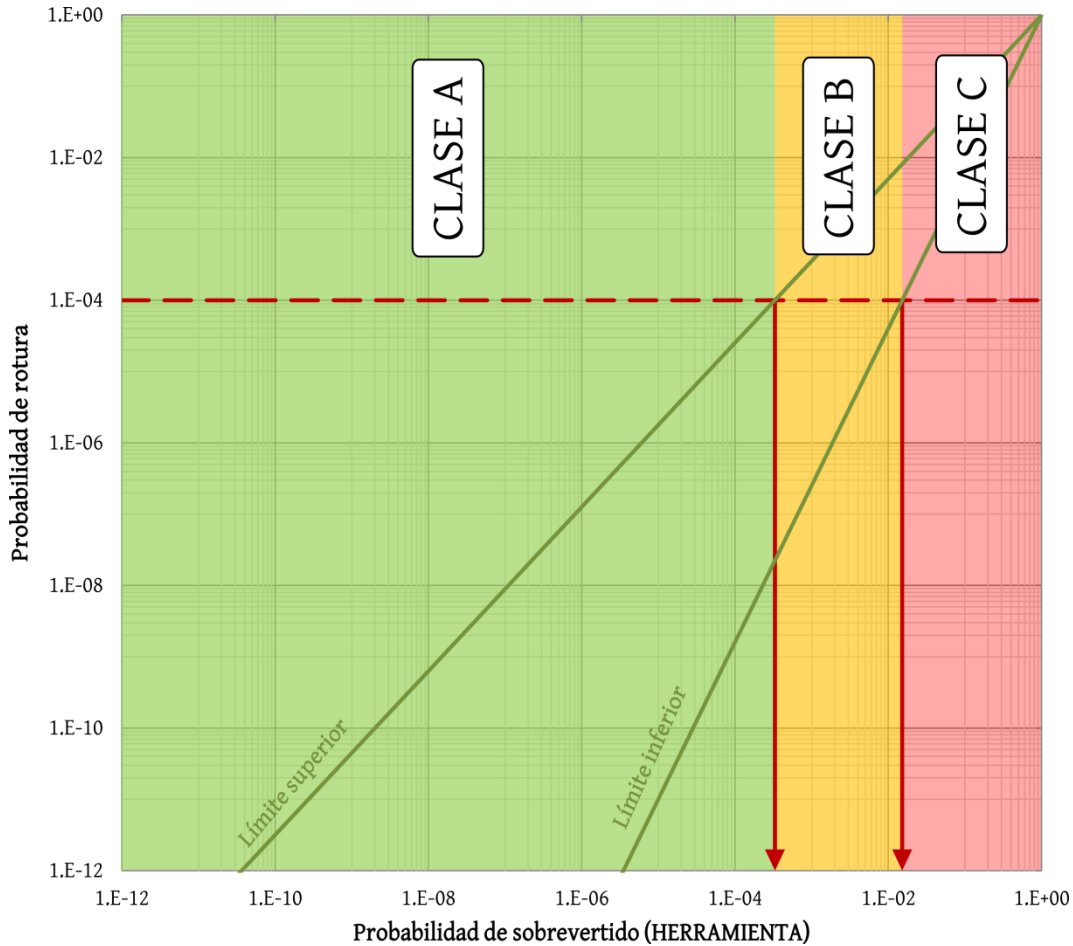


Figura 5.5: Criterio de tolerabilidad de la probabilidad de rotura adoptado y correspondencia con los límites superior e inferior de la probabilidad de sobrevertido de la herramienta.

Dichas probabilidades de sobrevertido delimitan tres rangos, que corresponden con las tres clases descritas a continuación propuestas en las recomendaciones de la Tabla 5.2:

- Clase A: corresponde con los casos en los que la probabilidad de rotura es inferior a 10^{-4} , y por tanto cumple con los criterios de tolerabilidad. En este caso el modo de fallo por sobrevertido no resulta de gran

importancia, y no es necesario realizar estudios de detalle sobre su ocurrencia.

- Clase B: incluye aquellos casos en los que la probabilidad de rotura es del orden del límite del criterio de tolerabilidad. La decisión de realizar más estudios sobre el modo de fallo debe complementarse con otras informaciones, con comparación con casos similares, e incluso con cálculos de laminaciones completos.
- Clase C: se disponen aquellos casos en los que la probabilidad de rotura excede claramente los criterios de tolerabilidad. Por lo tanto el modo de fallo por sobrevertido tendrá un peso importante en el riesgo de la presa, y se requieren estudios de detalle para poder calcularlo.

CLASE	Límites de las probabilidades de sobrevertido de la herramienta (años ⁻¹)			DESCRIPCIÓN
	Gravedad	Arco y bóveda	Azudes	
A	0 – 3.3*10 ⁻⁴	0 – 8.4*10 ⁻⁴	0 – 1.1*10 ⁻³	- La probabilidad de rotura es inferior al criterio de tolerabilidad. - No se requieren estudios en detalle del modo de fallo por sobrevertido.
B	3.3*10 ⁻⁴ – 1.5*10 ⁻²	8.4*10 ⁻⁴ – 4.6*10 ⁻²	1.1*10 ⁻³ – 5.1*10 ⁻²	- La probabilidad de rotura está en el entorno del límite del criterio de tolerabilidad. - Es recomendable un estudio con mayor profundidad de la conveniencia de considerar el modo de fallo por sobrevertido.
C	1.5*10 ⁻² – 1	4.6*10 ⁻² – 1	5.1*10 ⁻² – 1	- La probabilidad de rotura es superior al criterio de tolerabilidad. - Es necesario considerar el modo de fallo por sobrevertido y realizar un estudio detallado.

Tabla 5.2: Límites recomendados de la probabilidad de sobrevertido de la herramienta por tipología de presa y en base a modelos de riesgo completos, para cumplir con el criterio de tolerabilidad del USBR.

5.2 Probabilidades mediante modelos de riesgo simplificados

De la misma forma que antes, se representa en la Figura 5.6 la relación entre las probabilidades de sobrevertido calculadas mediante la herramienta y las de rotura calculadas mediante modelos simplificados.

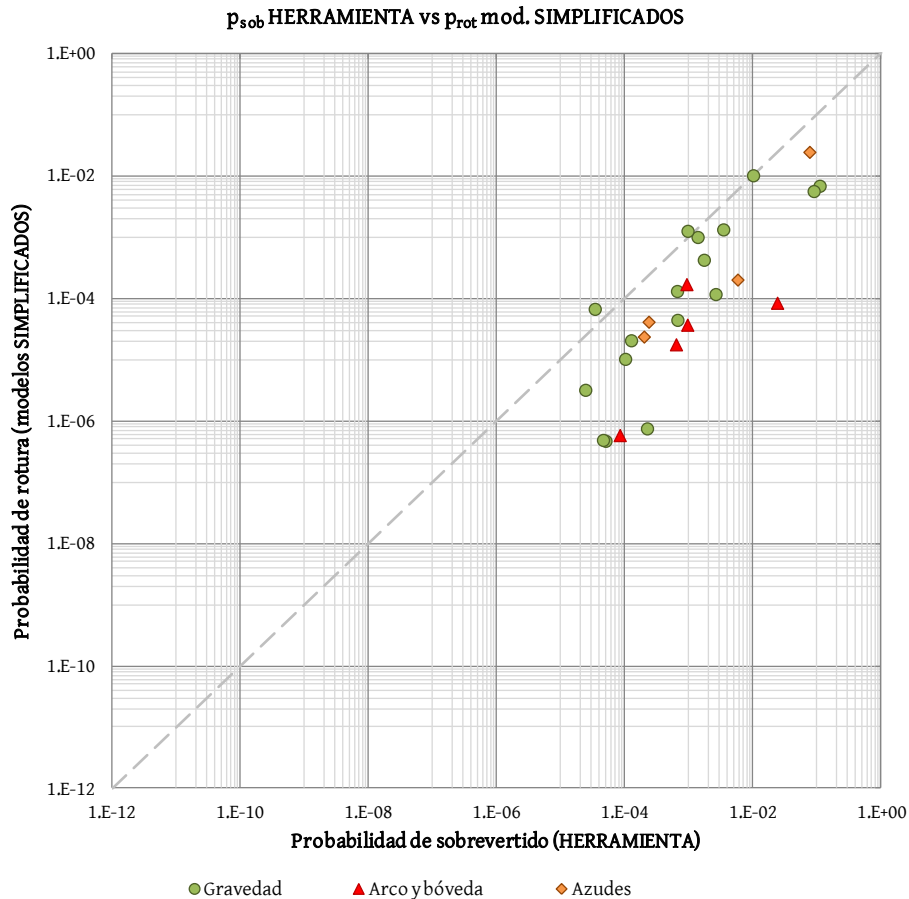


Figura 5.6: Relación entre las probabilidades de sobrevertido de la herramienta y las probabilidades de rotura de los modelos simplificados.

Los límites inferior y superior de las bandas de estimación de las probabilidades de rotura se muestran en la Tabla 5.3, y se representan junto con los puntos para el caso de presas de hormigón de gravedad (Figura 5.7), arco y bóveda (Figura 5.8), y azudes de hormigón (Figura 5.9).

	Tipología de la presa		
	Gravedad	Arco y bóveda	Azudes
Límite inferior	$p_{rot} = p_{sob}^{1.7}$	$p_{rot} = p_{sob}^{2.6}$	$p_{rot} = p_{sob}^{1.75}$
Límite superior	$p_{rot} = p_{sob}^{0.97}$	$p_{rot} = p_{sob}^{1.25}$	$p_{rot} = p_{sob}^{1.2}$

Tabla 5.3: Límites superior e inferior de estimación de las probabilidades de rotura en los modelos simplificados.

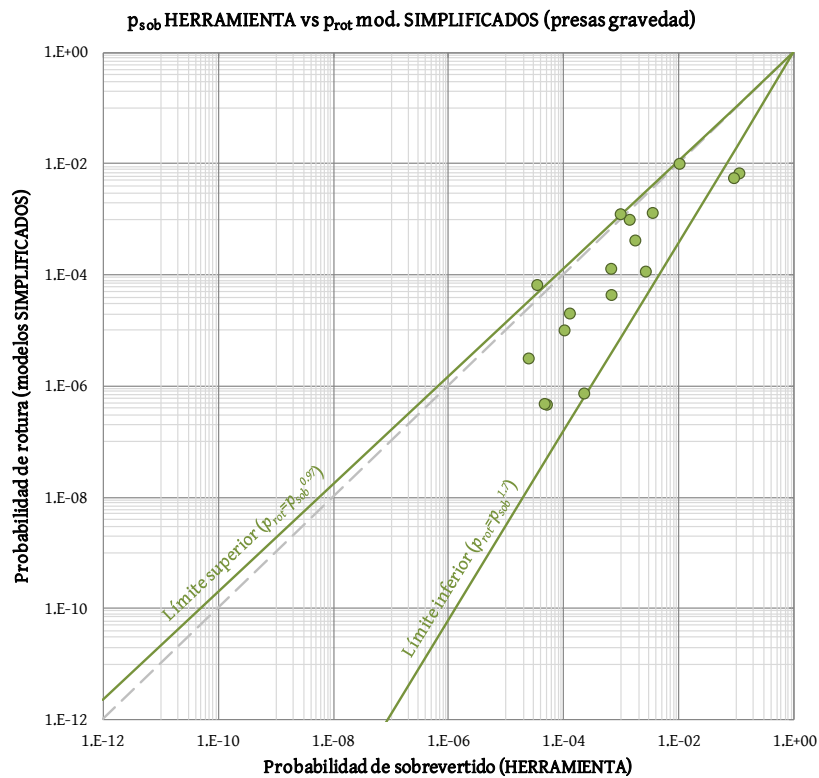


Figura 5.7: Relación y límites de estimación de la probabilidad de rotura en función de la probabilidad de sobrevertido de la herramienta, para modelos simplificados de presas de gravedad.

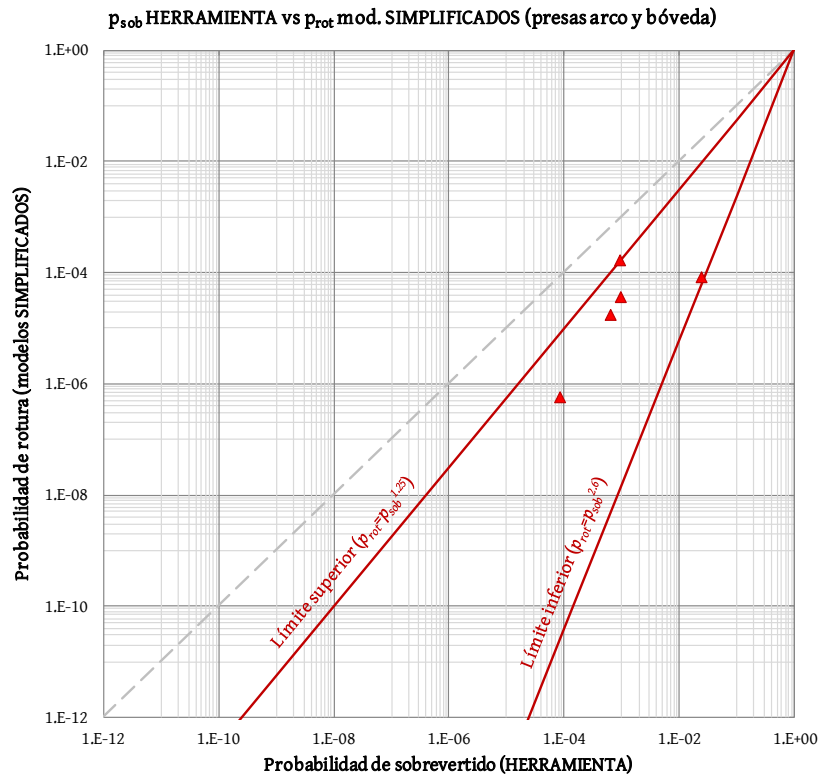


Figura 5.8: Relación y límites de estimación de la probabilidad de rotura en función de la probabilidad de sobrevuerto de la herramienta, para modelos simplificados de presas arco y bóveda.

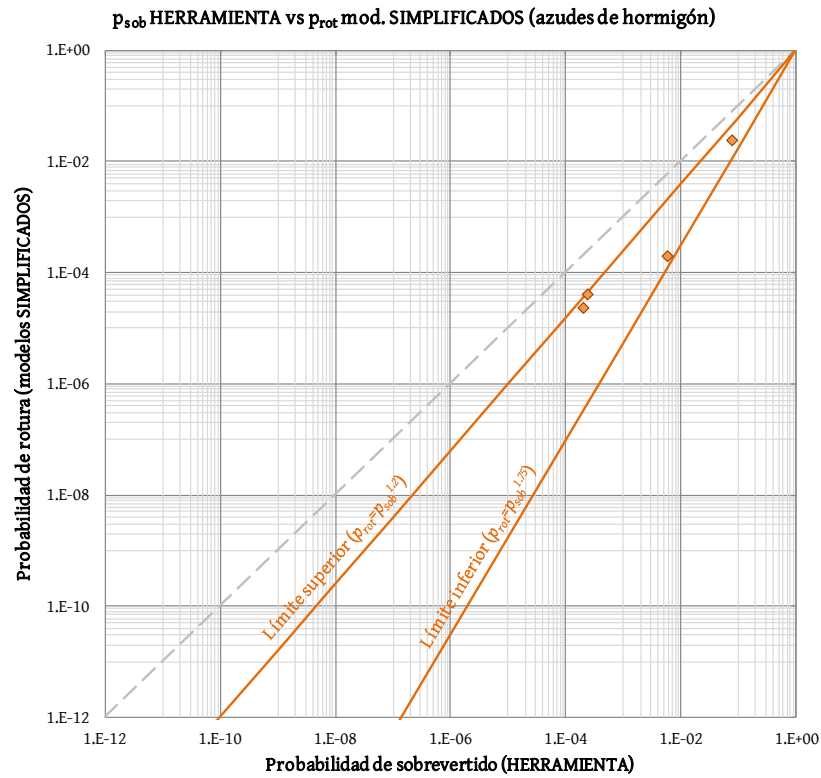


Figura 5.9: Relación y límites de estimación de la probabilidad de rotura en función de la probabilidad de sobreviento de la herramienta, para modelos simplificados de azudes de hormigón.

Finalmente, se presenta en la Tabla 5.4 las recomendaciones para cada rango de probabilidades de sobreviento calculadas mediante la herramienta con los resultados de los modelos de riesgo simplificados, siguiendo la misma clasificación que la explicada para el caso anterior.

CLASE	Límites de las probabilidades de sobrevertido de la herramienta (años ⁻¹)			DESCRIPCIÓN
	Gravedad	Arco y bóveda	Azudes	
A	0 – 7.5*10 ⁻⁵	0 – 6.3*10 ⁻⁴	0 – 4.6*10 ⁻⁴	- La probabilidad de rotura es inferior al criterio de tolerabilidad. - No se requieren estudios en detalle del modo de fallo por sobrevertido.
B	7.5*10 ⁻⁵ – 4.4*10 ⁻³	6.3*10 ⁻⁴ – 2.9*10 ⁻²	4.6*10 ⁻⁴ – 5.2*10 ⁻³	- La probabilidad de rotura está en el entorno del límite del criterio de tolerabilidad. - Es recomendable un estudio con mayor profundidad de la conveniencia de considerar el modo de fallo por sobrevertido.
C	4.4*10 ⁻³ – 1	2.9*10 ⁻² – 1	5.2*10 ⁻³ – 1	- La probabilidad de rotura es superior al criterio de tolerabilidad. - Es necesario considerar el modo de fallo por sobrevertido y realizar un estudio detallado.

Tabla 5.4: Límites recomendados de la probabilidad de sobrevertido de la herramienta por tipología de presa y en base a modelos de riesgo simplificados, para cumplir con el criterio de tolerabilidad del USBR.

CAPÍTULO 6

Conclusiones y futuras líneas de investigación

En este trabajo se ha elaborado una herramienta sencilla de estimación de probabilidades de sobrevertido en presas, basada en unas características hidrológico-hidráulicas básicas generalmente disponibles en la documentación de la presa: la capacidad de diseño de sus órganos de desagüe, el volumen de resguardo en el embalse, y el caudal pico y el volumen de la avenida correspondiente a un periodo de retorno de 1,000 años.

Se ha estudiado asimismo la relación entre las probabilidades de sobrevertido y las probabilidades de rotura por sobrevertido obtenidas mediante modelos de riesgo completos y simplificados. Estos resultados han permitido plantear unas recomendaciones a la hora de considerar el modo de fallo por sobrevertido y de contemplar estudios de mayor detalle, en función de los rangos de probabilidades de sobrevertido estimados utilizando la herramienta.

Una de las utilidades principales de esta herramienta es la clasificación de conjuntos de presas en una fase previa de tipo *screening*, como ayuda para la organización, planificación y asignación de recursos a programas de seguridad mediante la identificación de aquellas presas con niveles de riesgo más elevados. Así pues, disponiendo de una herramienta de estimación de probabilidades de sobrevertido basada únicamente en unas pocas características hidráulicas e hidrológicas, se puede ahorrar mucho tiempo y esfuerzo para evaluar la respuesta del sistema en el caso de modos de fallo relativos al sobrevertido. Esta clasificación facilita la fase de asignación de recursos para la evaluación completa del riesgo de cada una de las presas, haciendo hincapié en aquellas con niveles de seguridad más comprometidos. De esta forma un análisis cualitativo previo evita sobreesfuerzos en aquellos casos en los que el nivel de seguridad tiene una alta probabilidad de ser adecuado, e indica aquellos que requieren de un estudio más detallado de alguna de sus componentes.

La herramienta sirve también como ayuda en la fase de definición de medidas correctoras. Una vez calculado el riesgo de una presa y cuando éste no es tolerable e incluso cuando es tolerable, se deben plantear medidas que lo reduzcan. Entre las medidas estructurales más frecuentes para la reducción del riesgo por sobrevertido se pueden citar el aumento de la cota de coronación (lo que aumentaría el volumen de resguardo), el aumento de la capacidad de

desagüe, la mejora de la fiabilidad de los órganos de desagüe, o la mejora de la obra civil de los órganos de desagüe. Por otro lado, algunas medidas no estructurales podrían ser la implantación de mayores resguardos o la optimización de las reglas de operación de los órganos de desagüe en la laminación de avenidas. La implantación de alguna de estas medidas se traduciría en una modificación de las características físicas del sistema presa-embalse (el resguardo establecido *Resg*, y la capacidad de sus órganos de desagüe *CapODNC* y *CapODC*), y consecuentemente en una reducción de la probabilidad de sobrevertido. A partir de la ecuación de la herramienta se puede determinar qué medidas tendrán un mayor impacto en la reducción de la probabilidad de sobrevertido y por lo tanto del riesgo asociado a dicho modo de fallo. Esto es útil cuando se quiere establecer una clasificación de las acciones correctoras en función de su efectividad y de su coste estimado, lo que ofrece una idea de su eficiencia.

Este trabajo se ha fundamentado en los datos y resultados obtenidos para un conjunto de 30 presas españolas, de distinta tipología. Para los distintos ajustes realizados, éste resulta un número escaso y se corre el riesgo de no recoger de forma sólida toda la casuística posible de presas. De hecho, de entre las presas estudiadas únicamente 3 de ellas son de materiales sueltos; además, en ninguna de ellas se produce el sobrevertido y por lo tanto no es posible particularizar los resultados y las relaciones obtenidas para estos casos (como por ejemplo la relación *probabilidad de sobrevertido vs probabilidad de rotura*, o las tablas de criterios recomendados a la hora de considerar el modo de fallo de sobrevertido). Este hecho resalta la necesidad de una investigación más detallada, que incluya una mayor cantidad de casos.

Si se contara con más modelos de riesgo y/o de sobrevertido o con la información necesaria de más presas, sería posible mejorar la herramienta en la forma que se indica a continuación:

- Mejorando el ajuste de los coeficientes de la herramienta (ecuación del parámetro r^2 y de la probabilidad de sobrevertido), e incluso añadiendo más coeficientes a la misma.

- Con una base más sólida para la elección de las variables físicas elegidas para definir el parámetro r^2 .
- Definiendo mejor la relación entre probabilidad de rotura y de sobrevertido a partir de más datos y por lo tanto de forma más contrastada.
- Mejorando la definición de los límites superior e inferior de estimación de la probabilidad de rotura en función de la probabilidad de sobrevertido de la herramienta.

Como resumen, se presenta en la Figura 6.1 un resumen en forma de esquema de la metodología seguida en este trabajo para el desarrollo de la herramienta y su aplicación. Se indica en el esquema las relaciones obtenidas, y los modelos utilizados para el cálculo de las probabilidades.

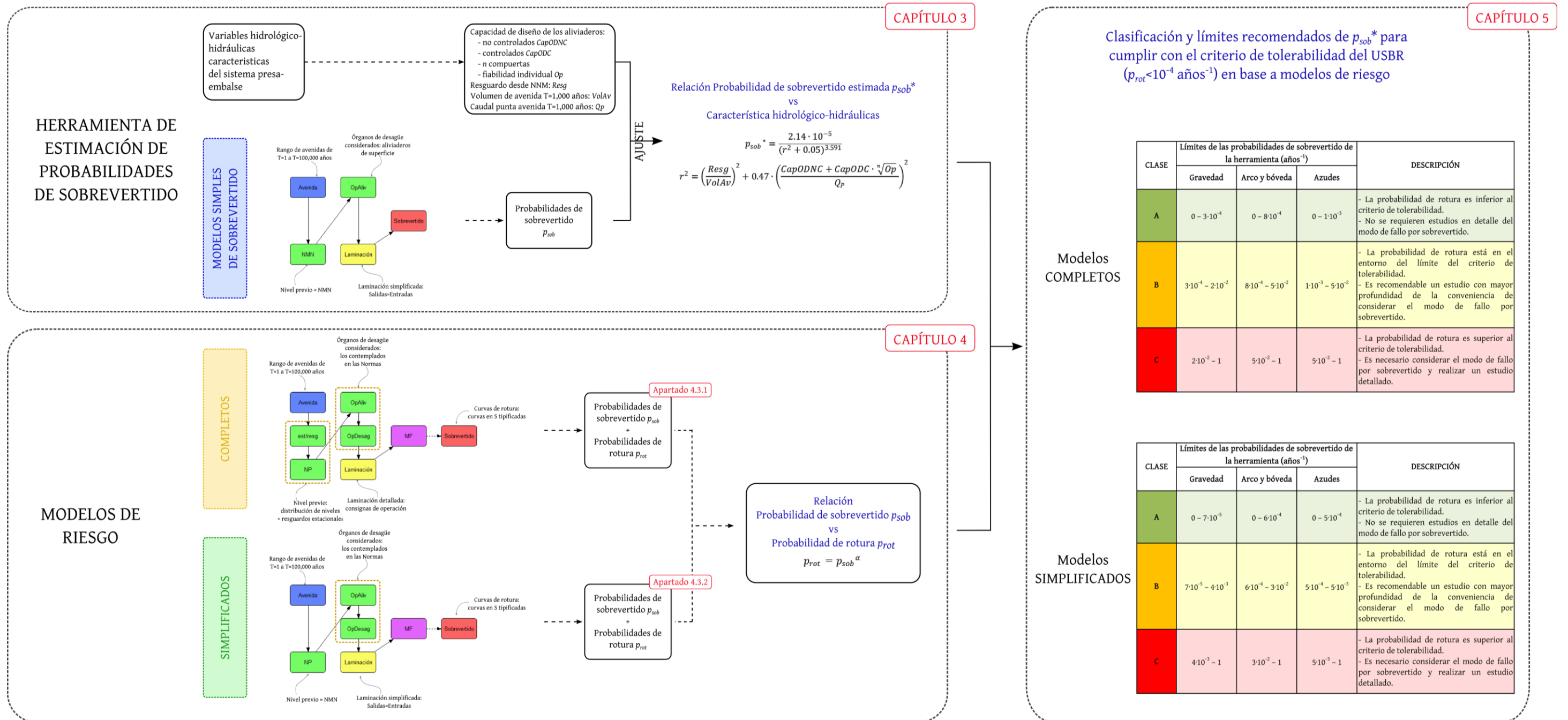


Figura 6.1: Diagrama resumen de la metodología seguida.

Referencias bibliográficas

- [1] L. Altarejos-García. *Contribución a la estimación de la probabilidad de fallo de presas de hormigón en el contexto del análisis de riesgos*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Valencia, 2009. Dir: Escuder-Bueno, I.
- [2] ANCOLD. *Guidelines on Risk Assessment*. Australian National Committee on Large Dams, 2003.
- [3] ANCOLD. *Guidelines on Risk Assessment*. Australian National Committee on Large Dams, 2004.
- [4] C. Anderson, C. Mohorovic, L. Mogck, B. Cohen, and G. Scott. Concrete dams case histories of failures and nonfailures with back calculations. Report DSO-98-005, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, December 1998.
- [5] B.M. Ayyub. *Elicitation of expert opinions for uncertainty and risks*. CRC Press, 2001.
- [6] J.T. Baecher, G.B. & Christian. *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. Wiley, Noviembre, 2003, ISBN 978-0471498339.
- [7] Ven Te Chow. *Applied hydrology*. McGraw-Hill, 1988.
- [8] Nuclear Regulatory Commission. *Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: guidance on uncertainty and expert use*. 1997.
- [9] S. Cox and R. Tait. *Safety, Reliability and Risk Management: an integrated approach - 2nd ed*. Butterworth-Heinemann, Oxford, Great Britain, 1998.
- [10] I. Escuder-Bueno, A. Serrano-Lombillo, J. Fluixá-Sanmartín, and A. Morales-Torres. Evaluación de la seguridad hidrológica de presas mediante modelos de riesgo simplificados. In *Forum on Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security and Critical Infrastructure Management*, 2011.
- [11] F.J. Ferrer. *Análisis estadístico de caudales de avenidas*. CEDEX, 1992.
- [12] Fell & Robin & Chi Fai Wan & Mark Foster. *Methods for estimating the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping - piping through the embankment*. The University of New South Wales.
- [13] M. Gómez de Membrillera-Ortuño. *Contribución a la aplicación del análisis y declaración de riesgos en presas españolas, incluyendo priorización de inversiones*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Valencia, 2007. Dir: Escuder-Bueno, I.

- [14] P.E. Jeffrey T. McClenathan. Update for screening risk analysis for u.s. army corps of engineers dams. Technical report, U.S. Army Corps of Engineers, 2007.
- [15] S. Kaplan. The words of risk analysis. *Risk Analysis*, 17(4):407–417, 1997.
- [16] P. Krause, D.P. Boyle, and F. Bäse. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5:89–97, 2005.
- [17] R.H. McCuen, Z. Knight, and A.G. Cutter. Evaluation of the nash–sutcliffe efficiency index. *Journal o Hydrologic Engineering*, 6:597–602, 2006.
- [18] R. Mínguez. *Seguridad, fiabilidad y análisis de sensibilidad en obras de ingeniería civil mediante técnicas de optimización por descomposición. Aplicaciones*. PhD thesis, Universidad Cantabria, 2003.
- [19] D.F. Munger, D.S. Bowles, D.D Boyer, D.W. Davis, D.A. Margo, D.A Moser, and N. Regan, P.J. y Snorteland. *Interim tolerable risk guidelines for US Army Corps of Engineers dams*. USSD Workshop on the future of dam safety decision making: combining standards and risk, abril 2009.
- [20] U.S. Bureau of Reclamation. Risk analysis methodology. appendix e. estimating risk of internal erosion and material transport failure modes for embankment dams. Technical report, U. S. Department of the Interior, 2001.
- [21] U.S. Bureau of Reclamation. Guidelines for achieving public protection in dam safety decision making. Technical report, U. S. Department of the Interior, 2003.
- [22] OFITECO and S.L. iPresas. Desarrollo de un programa complementario de gestión de la seguridad basado en el riesgo para las presas de la confederación hidrográfica del duero (chd). Technical report, MMARM, 2009-2011.
- [23] ICOLD – International Commission on Large Dams. *Non-structural risk reduction measures. Benefits and costs for dams.*, volume Bulletin E02. 4-50. ICOLD, 2001.
- [24] G.R. Powledge, D.C. Ralston, P. Miller, H Chen-Yung, P.E. Clopper, and D.M. Temple. Mechanics of overflow erosion on embankments. ii. hydraulic and design considerations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(8):1056–1075, 1989.

- [25] A. Serrano-Lombillo. *Desarrollo de una herramienta completa de análisis y evaluación de riesgos en seguridad de presas*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Valencia, 2011. Dir: Escuder-Bueno, I., Co-Dir: Gomez de Membrillera-Ortuño, M.
- [26] A. Serrano-Lombillo, I. Escuder-Bueno, M. Gómez de Membrillera-Ortuño, and L. Altarejos-García. iPresas: Software for risk analysis. In *Twenty-third International Congress on Large Dams*, 2009.
- [27] A. Serrano-Lombillo, I. Escuder-Bueno, M. Gómez de Membrillera-Ortuño, and L. Altarejos-García. Methodology for the calculation of annualized incremental risks in systems of dams. *Risk Analysis*, 31(6):1000–1015, 2010.
- [28] A. Serrano-Lombillo, J. Fluixá-Sanmartín, and V.J. Espert-Canet. Flood routing studies in risk analysis. In *Forum on Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security and Critical Infrastructure Management*, 2011.
- [29] R. E. Swain, D. Bowles, and D. Ostenaar. A framework for characterization of extreme floods for dam safety risk assessments. *Proceedings of the 1998 USCOLD Annual Lecture, Buffalo, New York*, 1998.
- [30] U.S. Bureau of Reclamation, U.S. Army Corps of Engineers, Denver, Colorado. *Dam Safety Risk Analysis Best Practices Training Manual*, version 2.2 edition, Abril 2011.
- [31] F. Walter. The Cause of the Jonhston Flood. *Civil Engineering*, May:63–66, 1988.
- [32] V. Yevjevich. *Probability and statistics in hydrology*. Water Resources Publications, 1997.

ANEJO

Indicaciones para la elaboración de modelos de riesgo

El presente ANEJO resume los estudios necesarios para confeccionar un modelo de riesgo estándar en escenario hidrológico, extraídos principalmente de [25]. En la Figura A.1 se presenta el esquema general de un modelo de riesgo completo. Sin embargo, como en este trabajo únicamente nos interesan las probabilidades de fallo y de sobrevertido sólo se va a trabajar con las partes correspondientes a las cargas y a la respuesta del sistema (hasta los nodos rojos), sin considerar las consecuencias. Así pues, se van a repasar los estudios necesarios para cada nodo referentes a:

- Las solicitaciones: avenidas (Apartado A.1).
- Los niveles previos (Apartado A.2).
- La operatividad de compuertas (Apartado A.3).
- La laminación (Apartado A.4).
- Las probabilidades de fallo (Apartado A.5).

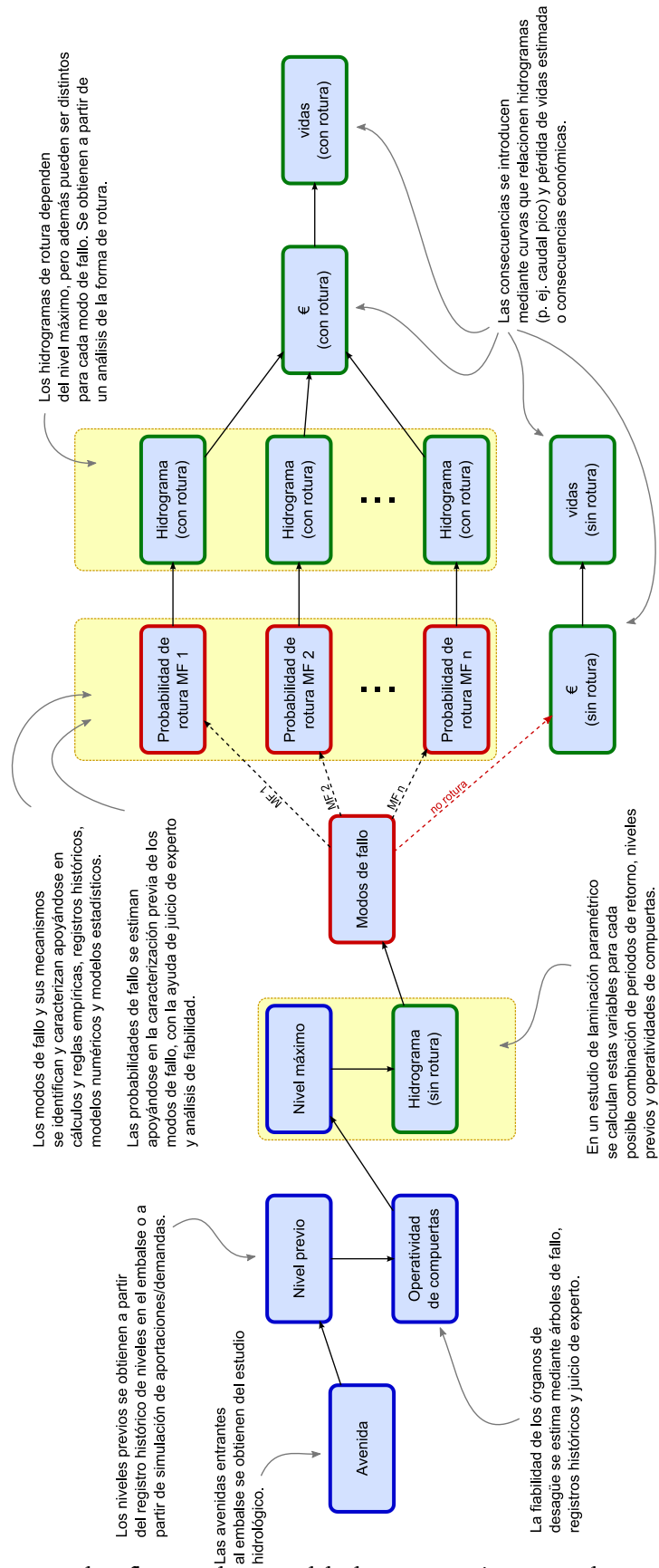


Figura A.1: Diagrama de influencia de un modelo de riesgo genérico para el escenario hidrológico mostrando los trabajos a realizar para caracterizar cada una de las variables [25].

A.1. Nodo de avenidas

Un modelo de riesgo parte de un evento inicial que provoca las cargas a las que es sometida la presa. En el escenario hidrológico estos eventos son las avenidas. Éstas se pueden caracterizar con la magnitud del volumen total de aportación, aunque lo más común es hacerlo a través del valor de su caudal pico Q_p , o máximo caudal que se produce en un punto de la cuenca por el transcurso del hidrograma.

Además, llevan asociada una cierta frecuencia de ocurrencia, explicitada mediante su probabilidad anual de excedencia PAE (probabilidad de que el caudal pico de la mayor avenida en un año cualquiera supere un determinado caudal Q) o su periodo de retorno T (inverso de la PAE, es el tiempo medio en años que discurre entre distintos eventos con caudales superiores a dicho valor Q).

El propósito del estudio hidrológico en el análisis de riesgo es la obtención de una serie de hidrogramas de avenida completos con un cierto periodo de retorno asociado. Esto significa que deben obtenerse tanto la forma de los hidrogramas como su magnitud (caracterizada normalmente por el valor de su caudal máximo o de su volumen total). Para conseguir este objetivo, es válido en principio cualquier método que proporcione una colección de hidrogramas de entrada al embalse y sus correspondientes periodos de retorno, como por ejemplo el método hidrometeorológico. Es posible incorporar estudios hidrológicos estacionales

En el propio modelo de riesgo, los resultados obtenidos en el estudio hidrológico se incluyen en el nodo Avenida y se emplean asimismo para los cálculos relacionados con la laminación:

- Por un lado, en el nodo Avenida se indica la avenida entrante, calculando con su PAE la probabilidad asociada a cada rama del árbol de eventos.
- Por otro, los datos numéricos de los hidrogramas completos se utilizan en el cálculo de la laminación del embalse, con la que se obtienen a su vez los nodos correspondientes de Nivel máximo e Hidrograma (sin rotura).

En la Figura A.2 se presenta un ejemplo de hidrogramas entrantes a un embalse, con periodos de retorno que van de 5 a 10,000 años.

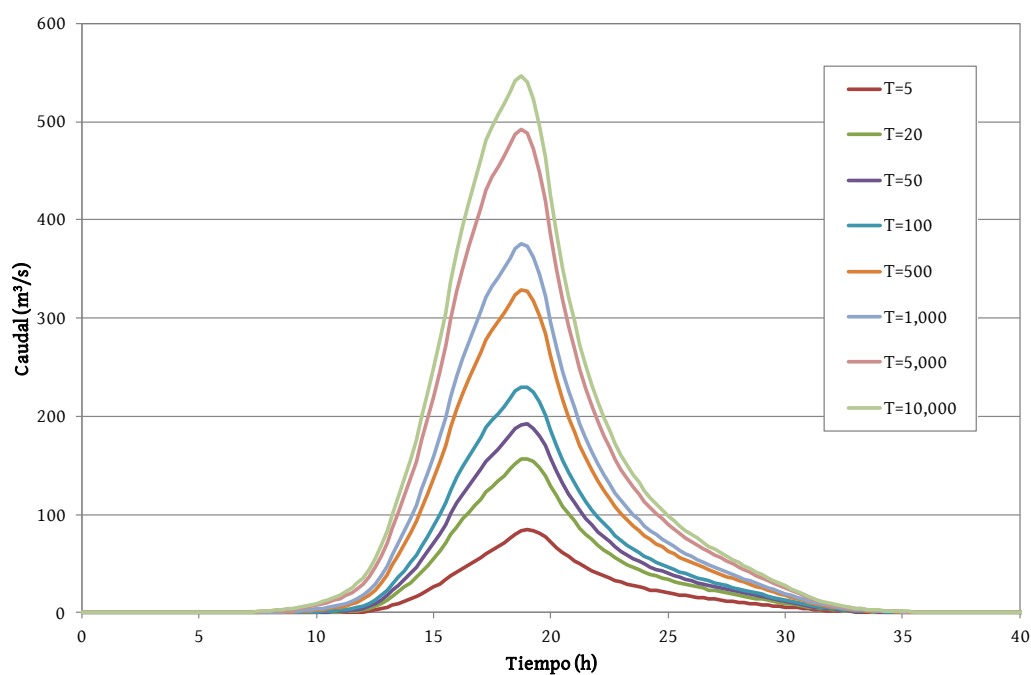


Figura A.2: Ejemplo de avenidas de 5 a 10,000 años de periodo de retorno.

A.2. Nodo de nivel previo

El estudio de los niveles previos tiene el objetivo de analizar la probabilidad de que el embalse se encuentre a un cierto nivel cuando llega la avenida, es decir, define la situación de partida en el embalse para estudiar las cargas que la avenida introduce.

La relación entre el nivel previo y su probabilidad se suele incluir en el modelo de riesgo mediante una curva de probabilidad de excedencia de niveles en el embalse. Esta curva puede obtenerse utilizando el registro de niveles históricos en el embalse. Para ello es necesario contar con un registro suficientemente largo y representativo de la situación de explotación actual. Cuando esto no sea posible o cuando se desee evaluar alguna posible situación futura se debe recurrir a series sintéticas (simulaciones del nivel en el embalse).

Para obtener la curva empírica de probabilidad de excedencia de los niveles en el embalse es necesario ordenar todos los datos de niveles de menor a mayor. De esta forma, la probabilidad de excedencia de cada nivel de embalse se obtiene con la siguiente fórmula [32]:

$$PE_n = 1 - \frac{i_n - 1}{N - 1}$$

donde PE_n es la probabilidad de excedencia de un nivel n , i_n es el número de orden del nivel n dentro de la serie de niveles cuando son ordenados de menor a mayor y N es la longitud de la series de niveles.

Para evitar introducir en la curva de probabilidad los datos que no son representativos de la situación normal del embalse, deben quitarse del análisis los datos correspondientes a situaciones excepcionales como:

- El proceso de llenado del embalse.
- Vaciado del embalse para obras de reparación.
- Otras situaciones que no sean habituales en la explotación normal del embalse.

Además, en el escenario hidrológico, es necesario eliminar las situaciones de avenida en el registro, ya que la sobreelevación de nivel provocada por las

avenidas es introducida de forma independiente en el modelo de riesgo a través del estudio de laminación.

En general, puede ser suficiente con truncar la curva de probabilidad de excedencia obtenida en el Nivel Máximo Normal del embalse (NMN), suponiendo de esta manera que siempre que el embalse se encuentre por encima del NMN es porque hay una situación de avenida. Al realizar este truncamiento, toda la probabilidad que antes del truncamiento correspondía a los niveles superiores al NMN se concentra ahora en un único nivel. De esta manera, al discretizar la variable se incluye una rama con dicha probabilidad y cuyo nivel asociado es el NMN.

Para introducir esta curva en el modelo de riesgo es necesario que sea discretizada en varios intervalos. El número de intervalos depende de la precisión deseada, cuanto mayor sea más precisos serán los resultados. Obviamente esto lleva a tener más ramas en el árbol de eventos del modelo de riesgo.

En general, estos intervalos se suelen elegir equiespaciados dentro del rango de niveles previos que se da en el embalse, aunque en algunos casos puede interesar elegir los intervalos de forma manual, ya que su distribución puede ser crucial para conseguir una buena precisión en los resultados. Por ejemplo, cuando se estudian modos de fallo asociados a niveles máximos muy altos (como el sobrevertido) y que posiblemente solo son factibles cuando en el embalse ya hay un nivel previo alto, entonces es necesario un mayor grado de detalle (y por lo tanto de intervalos) en la zona de la curva que representa los niveles previos mayores.

Es necesario asociar a cada uno de estos intervalos un valor del nivel del embalse (normalmente el punto medio del intervalo). La probabilidad de ocurrencia de cada intervalo se obtiene al restar la probabilidad de excedencia de los niveles extremos del intervalo, como se observa en la Figura A.3.

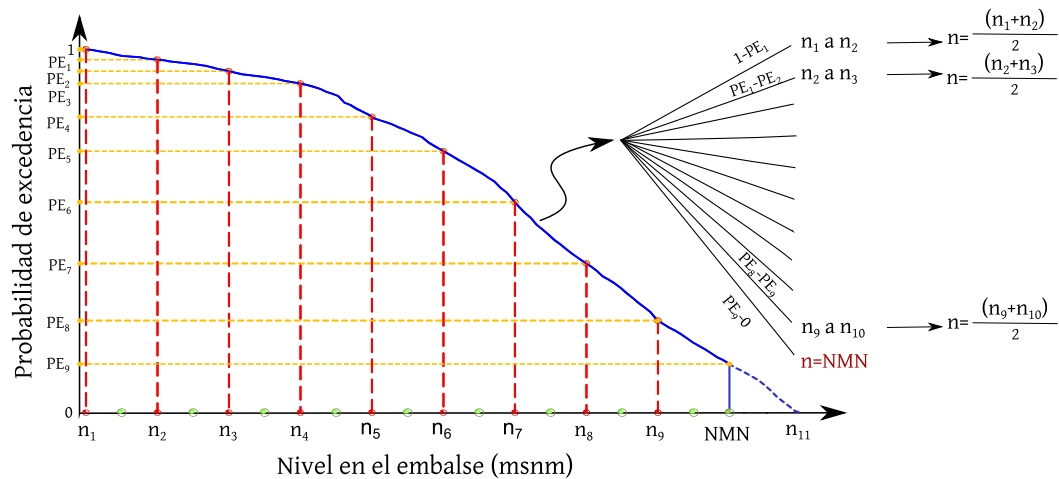


Figura A.3: Ejemplo de curva de probabilidad de excedencia de niveles previos y discretización empleada.

En lo que respecta al truncamiento de la curva en el NMN del embalse, este nivel puede ser variable a lo largo del año debido a la imposición de resguardos estacionales. En dicho caso, será necesario realizar tantas curvas de probabilidad de excedencia de niveles como casos de resguardos se presenten; el modelo de riesgo contará entonces con un nodo adicional que incluya la probabilidad de encontrarse en una estación u otra, y de la que dependerá trabajar con una curva u otra.

A.3. Nodo de operatividad de las compuertas

El efecto sobre la seguridad de la presa de la fiabilidad de los órganos de desagüe es indirecto: una baja fiabilidad hace que la probabilidad de alcanzar niveles de embalse altos o sobrevertidos durante una avenida sea mayor, lo cual aumenta la probabilidad de rotura.

Por lo tanto, la información que deben incluir estos nodos es la probabilidad de que cada órgano se pueda utilizar para dicho fin, es decir que en el momento en que se presente una avenida cada órgano de desagüe pueda o no ser utilizado. Es habitual y suele ser suficiente hacer la hipótesis de que cada órgano de desagüe (cada vano de un aliviadero, cada tubo de un desagüe) puede funcionar completamente o no funcionar en absoluto. En principio, también se podría hacer un estudio que contemplase escenarios intermedios de funcionamiento parcial aunque habría que valorar si las mejoras en cuanto a precisión de resultados serían relevantes.

No se debe confundir la fiabilidad de los órganos de desagüe con la posibilidad de que sufran un colapso o apertura repentina que provoque una avenida artificial aguas abajo. Este aspecto, también debe ser analizado, pero no como un componente de las cargas del sistema sino como un posible modo de fallo. Resumiendo, este apartado no trata la posibilidad de que las compuertas se abran cuando no se quiere sino la posibilidad de que no se abran cuando sí se quiere.

El análisis de las causas que pueden llevar a que no se pueda operar una compuerta no se puede limitar al fallo mecánico ya que la experiencia demuestra que los fallos pueden ocurrir por muy variadas razones. Por lo tanto si se analiza el sistema completo, existen varias razones por las cuales se podría producir el fallo:

- Error humano (ya sea porque no se identifica la necesidad de abrir una compuerta, porque la orden no se transmite, porque la persona encargada de operar una compuerta comete un error...).
- Falta de acceso a la cámara de maniobras (por ejemplo por nieve).
- Fallo mecánico (rotura de una pieza, trabazón...).

- Fallo en la obra civil (que pudiera inutilizar el desagüe).
- Fallo eléctrico (ya sea en el suministro como en los componentes del propio órgano de desagüe).
- Obturación del órgano de desagüe (por ejemplo por troncos).
- Fallo en el software que controla la compuerta o válvula (en caso de existir).
- Otros.

Por lo tanto para estimar la probabilidad global de fallo de la compuerta se deben tener en cuenta todos estos supuestos. La mejor herramienta para combinar todas estas probabilidades y para estudiar en detalle cada una de ellas son los árboles de fallo. Los árboles de fallo son una herramienta lógica deductiva en la cual se postula un evento superior indeseado, el fallo, y se deducen sistemáticamente todas las posibles maneras en que el fallo puede producirse.

En este sentido hay que tener en cuenta que los árboles de fallo (como muchos otros métodos) no son modelos cuantitativos en sí mismos. En realidad son una herramienta cualitativa que puede ser evaluada cuantitativamente. Por lo tanto, muchas veces se pueden usar los árboles de fallo como herramienta para ayudar a entender un sistema o para ayudar a racionalizar una discusión, sin que se lleguen a evaluar numéricamente. Aún así, el conocimiento que se obtenga del sistema tras modelarlo mediante árboles de fallo será de gran ayuda para la asignación de probabilidades sobre su fiabilidad. En cuanto al nivel de detalle del análisis, éste se puede clasificar en tres categorías:

Somero. Tras discutir todas las posibles causas de fallo, se estima una única probabilidad que englobe todas ellas.

Intermedio. Se realiza un árbol de fallo de alto nivel que desagregue las posibles causas de fallo, pero sin llegar al despiece de los componentes mecánicos del sistema. Se estiman las probabilidades desagregadas y se calcula la probabilidad global de fallo mediante el árbol de fallo.

Detallado. Se realiza un árbol de fallo lo más completo posible, modelando los distintos componentes mecánicos, del suministro eléctrico y de la cadena de órdenes. Se estiman las probabilidades desagregadas y se calcula la probabilidad global de fallo mediante el árbol de fallo.

También hay que tener en cuenta la importancia relativa de cada desagüe en la seguridad de la presa. Por ejemplo si se está analizando la fiabilidad de los órganos de desagüe de una presa con un aliviadero de 500 m³/s y un desagüe de 50 m³/s, probablemente será más rentable dedicar más esfuerzo a la estimación de la fiabilidad del aliviadero. Similarmente tendrá más sentido realizar un análisis detallado en una presa que dependa mucho de sus órganos de desagüe para la laminación que en una presa con mucha holgura en la seguridad hidrológica. Es posible determinar la importancia relativa de los órganos de desagüe realizando un modelo de riesgo preliminar en el que poder evaluar el efecto de la fiabilidad mediante un análisis de sensibilidad.

A.4. Nodo de laminación

El objetivo perseguido en la determinación de la laminación será conocer la respuesta del sistema presa-embalse frente a las sollicitaciones hidrológicas mediante el cálculo del régimen de caudales evacuados por la presa hacia aguas abajo en función del tiempo, así como los niveles alcanzados en el embalse. Esto proporciona los datos necesarios para:

- Calcular las consecuencias aguas abajo de la presa producidas por los desagües realizados, y en particular por el caudal pico.
- Conocer las probabilidades de alcanzar unas ciertas cargas (nivel máximo en el embalse, sobrevertido, duración de dicha situación...), que servirán para cuantificar las probabilidades de fallo de la presa.

En el propio modelo de riesgo, los nodos que se ven directamente afectados por este paso son los que calculan el nivel máximo alcanzado en el embalse y el hidrograma de salida sin rotura. Los nodos “Nivel máximo” e “Hidrograma (sin rotura)” se obtienen directamente del estudio de laminación.

En función de los modos de fallo a estudiar, en algunos casos además del nivel máximo será necesario calcular alguna otra variable como pueda ser el tiempo de sobrevertido. En cuanto al hidrograma de salida, éste se suele caracterizar por su caudal pico, aunque en función de las características particulares de cada presa, se podría caracterizar por otra u otras variables representativas.

Los datos necesarios para llevar a cabo el cálculo de laminación son:

- Hidrograma de entrada al embalse

De los estudios hidrológicos de la cuenca vertiente se extraen los datos de partida referentes al flujo de entrada al embalse. Estos estudios concluirán con la obtención de las curvas de caudales de llegada al embalse en función del tiempo (hidrogramas de entrada), y para distintos periodos de retorno.

- Nivel previo

Para iniciar el cálculo de la laminación de un embalse, se debe partir de un nivel inicial en el mismo (y por lo tanto de un volumen inicial dado) a

partir del cual se producirán las variaciones de volúmenes y niveles consecuencia del equilibrio entre el caudal de la avenida y el caudal desaguado.

A efectos del estudio de laminación sólo es necesario saber el rango de niveles que se debe modelar y no su probabilidad, ya que esta se introducirá posteriormente en el modelo de riesgo.

- Curva característica del embalse

La curva característica de un embalse es la relación entre los niveles alcanzados en el embalse, la superficie de agua en el mismo y el volumen de agua embalsado (nivel-superficie-volumen). Estos datos suelen encontrarse en el Archivo Técnico de la presa.

En lo concerniente a este estudio de laminación, las curvas características son necesarias para plantear el equilibrio de volúmenes entrantes y salientes. Habida cuenta de que los caudales evacuados por los órganos de desagüe dependen directamente del nivel de agua en el embalse, los hidrogramas de salida dependerán de éste.

- Curvas de gasto de los órganos de desagüe

Las curvas de gasto de los órganos de desagüe de una presa representan la respuesta del sistema presa-embalse frente a unas ciertas sollicitaciones hidráulicas. Con estos datos se modeliza la capacidad de los distintos órganos de desagüe para desaguar los caudales excedentes que aportan las avenidas. El resultado obtenido serán los caudales desaguados a través de aliviaderos y desagües, en función de la altura o carga de agua en el embalse.

Conocidas las características de los órganos de desagüe (perfil del aliviadero, tipo de compuertas, forma y dimensiones de los conductos, etc.), estas curvas de gasto serán función fundamentalmente de dos factores: la carga de agua (es decir la altura de la lámina en el embalse), y

el grado de abertura de las compuertas que regulan el desagüe, en caso de existir éstas.

- Consignas de operación de compuertas

El estudio de laminación precisa de las consignas de operación de compuertas de los órganos de desagüe de presas. Esto proporciona las pautas a seguir en cada instante para obtener los caudales a evacuar por los órganos de desagüe, en el supuesto de que dichos caudales puedan controlarse mediante compuertas u otros mecanismos de regulación.

- Operatividad de órganos de desagüe

Para el cálculo de la laminación se deberán contemplar tantos escenarios de operatividad de órganos de desagüe como se hayan considerado en el nodo (o nodos) correspondiente del modelo de riesgo.

No se contemplan en el estudio de laminación las probabilidades de funcionamiento de los órganos de desagüe. En este cálculo de la laminación únicamente se considerarán los distintos escenarios considerados de operatividad de los órganos de desagüe.

Una vez obtenidas todas las laminaciones para los periodos de retorno considerados, se introducen estos datos en el modelo de riesgo planteado como una relación de valores dependientes de la combinación de las distintas variables utilizadas: para cada probabilidad anual de excedencia (PAE) o periodo de retorno, para cada combinación de nivel previo y órganos de desagüe operativos, y en función de las consignas de operación establecidas, se dispondrán los valores de nivel máximo alcanzado, caudal laminado, altura y tiempo de sobrevertido, además de otras variables que pudieran ser necesarias para el modelo.

A.5. Nodo de probabilidad de fallo

El estudio de las probabilidades de fallo es una de las piezas necesarias para alimentar el modelo de riesgo una vez su arquitectura ha sido definida. De las tres componentes del riesgo (solicitaciones, probabilidad de fallo y consecuencias) el estudio trata la segunda. El estudio de probabilidades de fallo es posterior a la identificación de modos de fallo: antes de poder realizar este estudio es necesario haber identificado todos los modos de fallo que se van a incluir en el modelo y haberlos descompuesto en sus mecanismos de fallo. Una vez descompuesto el modo de fallo en pasos bien definidos, se deben estimar las probabilidades de cada uno de ellos. La descomposición se realiza sobre la base de los árboles de eventos y los diagramas de influencia. Para llevar a cabo la estimación de cada probabilidad individual se dispone de varias herramientas, principalmente:

- Las técnicas de fiabilidad.
- El juicio de experto.
- El uso de metodologías específicas para la estimación de probabilidades de fallo.

A su vez, estas herramientas se basan en otras como los modelos numéricos (deterministas y estadísticos), las técnicas Monte Carlo o las tablas estandarizadas de descriptores verbales. En realidad, la anterior clasificación no está compuesta por compartimentos estancos. Por ejemplo, dentro de un mismo modo de fallo es válido estimar algunas probabilidades mediante juicio de experto y otras mediante técnicas de fiabilidad. También es posible emplear ambos en la estimación de una misma probabilidad ya que las técnicas de fiabilidad requieren de datos que pueden ser estimados mediante juicio de experto.

Cualquier probabilidad de un modo de fallo que sea modelable mediante un modelo numérico determinista, es candidata a ser evaluada numéricamente mediante técnicas de fiabilidad. Las técnicas de fiabilidad (o análisis de fiabilidad) consisten en propagar las incertidumbres de las entradas a un modelo hasta su resultado, de tal manera que en lugar de un valor determinista, se

obtiene una probabilidad. En los casos en que se pueda y se opte por llevar a cabo un análisis cuantitativo de las probabilidades condicionales de rotura, los modelos numéricos suelen ir ligados a análisis de tipo Monte Carlo. Las incertidumbres con las que se ha de tratar incluyen: el escenario (niveles de agua, terremotos a considerar...), la manera en que las cargas deben actuar (subpresión, presiones efectivas...) y las propiedades de los materiales. Otra dificultad suele estar en la propia definición de fallo. Por lo tanto, aunque el modelo esté construido sobre una base determinista, al menos parte de los parámetros de entrada tienen una estructura estocástica, con lo que la salida del modelo también será de naturaleza estocástica.

La estimación de probabilidades mediante juicio de experto consiste en recoger la opinión que un individuo tiene respecto de la verosimilitud de un evento. Es por lo tanto una probabilidad subjetiva. Para dar mayor robustez a esta estimación, siempre se realiza un promedio de las estimaciones de varios individuos. Además, existen una serie de reglas de buena práctica que se deben seguir cuando se realizan este tipo de estimaciones. Cuando se estiman las probabilidades mediante juicio de experto, los modelos numéricos también suelen tener un papel relevante. Aunque un modelo numérico no ofrezca directamente una probabilidad de fallo, puede colaborar al entendimiento del problema por parte de los integrantes del proceso. También puede acotar los términos del debate, demostrando que un modo de fallo es más o menos viable, cuantificando el efecto de alguna característica sobre la que se tenga incertidumbre o mediante estudios de sensibilidad. En su papel de informador del proceso de obtención de probabilidades mediante juicio de experto, son válidos tanto los modelos deterministas como los estadísticos o híbridos.

Con la experiencia que se ha ido acumulando a lo largo de los años en estimación de probabilidades de fallo en presas, han surgido metodologías que de forma más o menos guiada ayudan a estimar probabilidades de fallo. En unas ocasiones se trata de metodologías muy detalladas para un modo de fallo concreto, con tablas y procedimientos que correlacionan distintas variables con probabilidades [20] [12]. En otras, se trata de una colección de recomendaciones, tablas y buenas prácticas que sirven de ayuda a la hora de estimar las distintas probabilidades que pueden surgir en un análisis de riesgo [30].

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE ESTIMACIÓN DE PROBABILIDADES DE SOBREVERTIDO

EN PRESAS EN EL CONTEXTO DEL ANÁLISIS DE RIESGO