



Título del Trabajo Fin de Máster:

***HERRAMIENTA DE GESTIÓN
CONTINUA DE ACTUACIONES EN
SEGURIDAD DE PRESAS CON
INDICADORES DE RIESGO***

Intensificación:

RECURSOS HÍDRICOS

Autor:

MORALES TORRES, ADRIÁN

Director/es:

DR. ESCUDER BUENO, IGNACIO

DR. SERRANO LOMBILLO, ARMANDO

Fecha: JULIO, 2012



Título del Trabajo Fin de Máster:
**HERRAMIENTA DE GESTIÓN CONTINÚA DE ACTUACIONES EN
SEGURIDAD DE PRESAS CON INDICADORES DE RIESGO**

Autor: **MORALES TORRES, ADRIÁN**

| | | | |
|-------------|--|----------------------|------------------|
| Tipo | A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/> | Lugar de Realización | VALENCIA |
| Director | ESCUDEBUENO, IGNACIO | Fecha de Lectura | SEPT 2012 |
| Codirector1 | SERRANO LOMBILLO, ARMANDO | | |
| Codirector2 | | | |
| Tutor | | | |

Resumen:

En este documento se presenta una herramienta para la priorización de actuaciones en seguridad de presas a partir de los resultados de un proceso previo de Análisis de Riesgo. Los resultados son analizados a través de indicadores para cada una de las medidas planteadas. Estos indicadores están basados en principios de reducción de riesgo, principalmente de eficiencia y equidad.

Con el fin de poder obtener secuencias de implementación de medidas de inversión, se ha desarrollado un software que funciona conjuntamente con un software de cálculo de riesgo y permite obtener secuencias de implementación de medidas de una forma rápida, clara y eficaz a partir de los indicadores de riesgo. Estas secuencias son un apoyo para la toma de decisiones en seguridad de presas.

La herramienta desarrollada ha sido aplicada a la gestión de 95 medidas estructurales y no estructurales en un grupo heterogéneo de 27 presas. De esta forma, se han obtenido diferentes secuencias de implementación de medidas para diferentes indicadores de riesgo y se ha analizado como cada una de estas secuencias sigue los diferentes principios de reducción de riesgo.

En aquest document es presenta una eina de priorització de actuacions per millorar la seguretat de preses utilitzant els resultats de un procés previ de Anàlisi de Riscs. Els resultats són analitzats a través de indicadors per a cada una de les mesures plantejades. Aquests indicadors estan basats en principis de reducció de risc, principalment d'eficiència i equitat.

Amb l'objectiu d'obtenir seqüències de implementació de mesures de inversió, se ha desenvolupat un software que funciona conjuntament amb un software de càlcul de risc i pot obtenir seqüències de implantació de mesures de una forma ràpida, clara i eficaç a partir de indicadors de risc. Aquestes seqüències són un recolzament per prendre decisions en seguretat de preses.

Esta eina ha sigut aplicada a la gestió de 95 actuacions estructural i no estructurals en un grup heterogeni de 27 preses. La eina desenvolupada ha permès obtindre diferents seqüències de implementació de mesures per a diferents indicadors de risc. A partir de aquests resultats, se ha fet un anàlisi de como aquestes seqüències segueixen els diferents principis de reducció de risc.

In this document, a tool for risk reduction measures prioritization in dams' security is introduced. This tool is supported by the results of a previous Risk Analysis process. These results are analyzed for each proposed measure using indicators, which are based on risk reduction principles, mainly efficiency and equity.

In order to obtain prioritization sequences for risk reduction measures using risk indicators, a software has been developed. This tool is clear, fast and efficient and works jointly with a software for computing risk. The obtained sequences can be a support for decision-making in dam safety. The developed tool has been applied to manage 95 structural and non-structural measures in a heterogeneous group of 27 dams. Different sequences of measures prioritization has been obtained for different risk indicators. The relation between the risk reduction principles and the obtained sequences has been analyzed.

Palabras clave:

Análisis de riesgo, seguridad de presas, priorización de medidas, indicadores de riesgo, actuaciones en seguridad de presas.

Índice

| | |
|--|----|
| 1. Introducción | 11 |
| 2. El Análisis de Riesgo como herramienta de gestión | 13 |
| 2.1 Conceptos previos..... | 14 |
| 2.2 La metodología de Análisis de Riesgo | 17 |
| 2.3 El modelo de riesgo..... | 20 |
| 2.4 Evaluación del riesgo..... | 23 |
| 2.5 Medidas de reducción de riesgo | 28 |
| 2.6 La gestión de medidas de reducción de riesgo | 31 |
| 2.6.1 Introducción..... | 31 |
| 2.6.2 Gestión de medidas según el HSE..... | 32 |
| 2.6.3 Gestión de medidas según el ANCOLD..... | 33 |
| 2.6.4 Gestión de medidas según el ICOLD..... | 34 |
| 2.6.5 Gestión de medidas según el USACE..... | 34 |
| 2.6.6 Gestión de medidas según el USBR | 35 |
| 2.6.7 Conclusiones..... | 36 |
| 3. Proceso de gestión de medidas basado en principios de priorización e indicadores de riesgo..... | 37 |
| 3.1 Introducción | 38 |
| 3.2 Principios de priorización de medidas | 40 |
| 3.2.1 Introducción..... | 40 |
| 3.2.2 Principio de eficiencia | 40 |
| 3.2.3 Principio de equidad | 41 |
| 3.3 Indicadores de riesgo para la priorización de medidas | 42 |
| 3.3.1 Introducción..... | 42 |
| 3.3.2 Cost per Statistical Life Saved (CSLS) | 42 |
| 3.3.3 Adjusted Cost per Statistical Life Saved (ACSLs)..... | 43 |
| 3.3.4 Social Risk Decrease Index (SRDI)..... | 44 |
| 3.3.5 Failure Probability Decrease Index (FPDI)..... | 44 |
| 3.3.6 Cost per Statistical Failure Prevented (CSFP) | 45 |
| 3.3.7 Adjusted Cost per Statistical Failure Prevented (ACSFP)..... | 45 |
| 3.3.8 Economical Risk Decrease Index (ERDI)..... | 46 |

| | |
|---|-----|
| 3.3.9 Cost-Benefit Ratio (CBR)..... | 46 |
| 3.3.10 Equity Weighted Adjusted Cost per Statistical Life Saved (EWACSLs) | 46 |
| 3.3.11 Resumen..... | 48 |
| 3.4 Gráficos de variación del riesgo..... | 49 |
| 3.5 Análisis de la bondad de la priorización..... | 51 |
| 3.6 La influencia del factor tiempo en la priorización de medidas | 54 |
| 4. Herramienta de priorización de medidas..... | 57 |
| 4.1 Introducción | 58 |
| 4.2 Herramienta para el cálculo de combinaciones de medidas..... | 59 |
| 4.3 Herramienta para establecer la priorización de medidas | 62 |
| 4.4 Restricciones a la priorización..... | 65 |
| 4.5 Cálculo de itinerarios de implantación de medidas en el tiempo | 67 |
| 5. Caso de estudio: Priorización de medidas en la gestión de un conjunto de 27 presas | 75 |
| 5.1 Descripción del caso de estudio | 76 |
| 5.2 Resultados de aplicación de medidas..... | 79 |
| 5.3 Resultados de priorización de medidas | 81 |
| 5.3.1 Introducción de datos en la herramienta de gestión..... | 81 |
| 5.3.2 Obtención de secuencias de implementación aleatorias | 83 |
| 5.3.3 Resultados con diferentes indicadores de riesgo | 83 |
| 5.3.4 Análisis detallado de los resultados con el indicador EWACSLs | 90 |
| 5.4 Resultados de implementación de medidas en el tiempo | 99 |
| 6. Conclusiones y futuras líneas de investigación..... | 105 |
| 7. Bibliografía..... | 109 |
| Anejo 1 Código de programación de la herramienta | 113 |
| A1.1 Código central de la herramienta de cálculo de combinaciones | 114 |
| A1.2 Código central de la herramienta de priorización de medidas | 120 |
| A1.3 Código central de la herramienta de priorización en el tiempo..... | 128 |
| Anejo 2 Descripción de las medidas propuestas en el caso de estudio | 137 |
| A2.1 Resumen de medidas..... | 138 |
| A2.2 Medidas en la presa A | 144 |
| A2.3 Medidas en la presa B..... | 153 |
| A2.4 Medidas en la presa C..... | 156 |

| | |
|--|-----|
| A2.5 Medidas en la presa D | 163 |
| A2.6 Medidas en la presa E..... | 173 |
| A2.7 Medidas en la presa F | 178 |
| A2.8 Medidas en la presa G | 180 |
| A2.9 Medidas en la presa H | 185 |
| A2.10 Medidas en la presa I..... | 188 |
| A2.11 Medidas en la presa J..... | 193 |
| A2.12 Medidas en la presa K | 195 |
| A2.13 Medidas en la presa L..... | 200 |
| A2.14 Medidas en la presa M | 201 |
| A2.15 Medida en la presa N..... | 207 |
| A2.16 Medidas en la presa O | 211 |
| A2.17 Medidas en la presa P..... | 219 |
| A2.18 Medidas en la presa Q | 224 |
| A2.19 Medidas en la presa R | 229 |
| A2.20 Medidas en la presa S..... | 235 |
| A2.21 Medidas en la presa T..... | 237 |
| A2.22 Medidas en la presa U | 243 |
| A2.23 Medidas en la presa V | 249 |
| A2.24 Medidas en la presa W | 255 |
| A2.25 Medidas en la presa X | 260 |
| A2.26 Medidas en la presa Y | 265 |
| A2.27 Medidas en el sistema Z..... | 271 |
| Anejo 3 Secuencias de implementación de medidas para diferentes indicadores de riesgo..... | 283 |
| A3.1 Secuencia obtenida con el indicador CSLS | 284 |
| A3.2 Secuencia obtenida con el indicador ACSLS..... | 286 |
| A3.3 Secuencia obtenida con el indicador SRDI | 288 |
| A3.4 Secuencia obtenida con el indicador FPDI..... | 290 |
| A3.5 Secuencia obtenida con el indicador CSFP | 292 |
| A3.6 Secuencia obtenida con el indicador ACSFP | 294 |
| A3.7 Secuencia obtenida con el indicador ERDI | 296 |
| A3.8 Secuencia obtenida con el indicador CBR..... | 298 |
| A3.9 Secuencia obtenida con una combinación del ACSLS y el ACSFP | 300 |

| | |
|---|-----|
| Anejo 4 Secuencias de implementación de medidas con el indicador EWACSLs para diferentes valores de n | 303 |
| A4.1 Secuencia obtenida para un valor del parámetro $n=1$ | 304 |
| A4.2 Secuencia obtenida para un valor del parámetro $n=0.05$ | 306 |
| A4.3 Secuencia obtenida para un valor del parámetro $n=0.1$ | 308 |
| A4.4 Secuencia obtenida para un valor del parámetro $n=0.2$ | 310 |
| A4.5 Secuencia obtenida para un valor del parámetro $n=0.33$ | 312 |
| A4.6 Secuencia obtenida para un valor del parámetro $n=0.5$ | 314 |
| A4.7 Secuencia obtenida para un valor del parámetro $n=0.75$ | 316 |
| A4.8 Secuencia obtenida para un valor del parámetro $n=1.5$ | 318 |
| A4.9 Secuencia obtenida para un valor del parámetro $n=2$ | 320 |
| A4.10 Secuencia obtenida para un valor del parámetro $n=3$ | 322 |
| A4.11 Secuencia obtenida para un valor del parámetro $n=5$ | 324 |
| A4.12 Secuencia obtenida para un valor del parámetro $n=10$ | 326 |
| A4.13 Secuencia obtenida para un valor del parámetro $n=20$ | 328 |
| Anejo 5 Secuencias de implementación de medidas en el tiempo | 331 |
| A5.1 Secuencia obtenida para un horizonte de decisión de 3 años..... | 332 |
| A5.2 Secuencia obtenida para un horizonte de decisión de 1 año | 333 |
| A5.3 Secuencia obtenida para un horizonte de decisión de 2 años..... | 334 |
| A5.4 Secuencia obtenida para un horizonte de decisión de 4 años..... | 335 |
| A5.5 Secuencia obtenida para un horizonte de decisión de 5 años..... | 336 |
| A5.6 Secuencia obtenida con un presupuesto máximo anual de 0.1 M€..... | 337 |
| A5.7 Secuencia obtenida con un presupuesto máximo anual de 0.75 M€..... | 339 |
| A5.8 Secuencia obtenida con un presupuesto máximo anual de 1 M€..... | 340 |
| A5.9 Secuencia obtenida con un presupuesto máximo anual de 1.5 M€..... | 341 |
| A5.10 Secuencia obtenida minimizando la probabilidad de fallo..... | 342 |

1. INTRODUCCIÓN

En este documento se presenta una herramienta para la priorización de actuaciones en seguridad de presas a partir de los resultados de un proceso previo de Análisis de Riesgo. Estos resultados constituyen una valiosa información para la gestión de actuaciones, ya que son el resultado de un estudio de todos los aspectos que afectan a la seguridad de la presa. La gestión de medidas a partir de la metodología de Análisis de Riesgo hace que la toma de decisiones sea transparente, sistemática y defendible. En el Apartado 2 se presenta cómo funciona este proceso de toma de decisiones a partir de los resultados de riesgo y sus principales ventajas. Además, se analiza cómo se realiza este proceso en los principales organismos internacionales.

Los resultados de riesgo son analizados a través de indicadores para cada una de las medidas planteadas. Estos indicadores están basados en principios de reducción de riesgo, principalmente de eficiencia y equidad. En el Apartado 3 se han analizado y ordenado los diferentes indicadores de riesgo encontrados en la bibliografía, analizando los principios en los que se basan. Además, se han desarrollado índices que permiten analizar la bondad de cualquier secuencia de implantación de medidas según un determinado principio.

Estos indicadores pueden ser utilizados como criterio de priorización para obtener una secuencia de implantación de medidas basada en uno o varios principios de reducción de riesgo. Estas secuencias pueden ser útiles para apoyar la toma de decisiones respecto a la seguridad de presas. En esta tesina se ha desarrollado software que permite definir secuencias de priorización de medidas en un grupo de presas a partir de sus resultados de riesgo de forma clara y sistemática. En el Apartado 4 se muestra la estructura de la herramienta desarrollada. Esta herramienta funciona conjuntamente con un software de cálculo de riesgo y permite obtener secuencias de implementación de medidas de una forma rápida, clara y eficaz.

Por último, se ha aplicado la herramienta desarrollada para la gestión de 95 medidas estructurales y no estructurales en un grupo heterogéneo de 27 presas. Para ello, se ha partido de los resultados de la aplicación de la metodología de Análisis de Riesgos a cada una de estas presas. La herramienta desarrollada ha permitido obtener diferentes secuencias de implementación de medidas para diferentes indicadores de riesgo, tal y como se muestra en el Apartado 5. De esta forma, se ha analizado cómo diferentes indicadores de riesgo producen diferentes resultados de los índices de bondad de los principios de reducción de riesgo.

2. EL ANÁLISIS DE RIESGO COMO HERRAMIENTA DE GESTIÓN

2.1 Conceptos previos

El **riesgo** es la combinación de tres conceptos: qué puede pasar, cómo de probable es que pase y cuáles son sus consecuencias [17]. En el análisis de riesgos aplicado a seguridad de presas, el qué puede pasar hace referencia al fallo de la presa, el cómo de probable es que pase es la probabilidad de que se dé este fallo y las consecuencias son las producidas por el fallo de la presa. A partir de estos tres conceptos, el riesgo de fallo en una presa se suele obtener al multiplicar su probabilidad de fallo por las consecuencias de este fallo.

Por un lado, la **probabilidad de fallo** o **probabilidad de rotura** de una presa es la combinación de dos probabilidades: la probabilidad de que se produzcan unas determinadas solicitaciones sobre la estructura y la probabilidad condicionada de que estas solicitaciones produzcan el fallo de la presa. Conceptualmente, la probabilidad de fallo se puede definir con la siguiente ecuación:

$$p(f) = \sum p(c) \cdot p(f|c) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde $p(f)$ es la probabilidad de fallo, $p(c)$ es la probabilidad de que se presente unas determinadas cargas y $p(f|c)$ es la probabilidad condicional de fallo de la presa ante estas cargas.

La probabilidad de fallo en el Análisis de Riesgos suele ser una probabilidad anual, es decir, la probabilidad de que en un año la presa falle. Normalmente esto se debe a que la probabilidad de presentación de las solicitaciones suele estar anualizada (unidades de años⁻¹) y el resto de probabilidades son adimensionales.

La metodología de Análisis de Riesgo no se limita a una única forma de fallo, sino que estudia todas las posibles formas de fallo de la presa. Cada forma de fallo se conoce con el nombre de **modo de fallo**, que se define como la secuencia lógica de eventos que puede dar lugar a un funcionamiento inadecuado del sistema presa-embalse o una parte del mismo. De esta forma, la probabilidad de fallo se obtiene a partir de la probabilidad de todos los modos de fallo. El concepto de fallo o rotura no se limita exclusivamente a la rotura catastrófica de la presa, sino que puede abarcar cualquier suceso que acarree consecuencias negativas.

Además, los modos de fallo van asociados a un **escenario de solicitación**, según el evento inicial que desencadena el fallo. Estos escenarios pueden definir eventos extremos, como el escenario hidrológico, que hace referencia a las avenidas, y el escenario sísmico, para los terremotos. Además, también se puede considerar el escenario normal, que trata la situación del día a día.

Por otro lado, las **consecuencias** se obtienen al analizar qué ocurriría si la presa fallara. Existen diferentes tipos de consecuencias que se pueden obtener [16] [27]:

- Daños a personas: En general, se calcula la pérdida de vidas potencial producida por la posible inundación. También pueden contemplarse otros

daños como el número de heridos o el trauma social, aunque su cuantificación es más difícil.

- **Consecuencias económicas:** Incluyen los daños a las propiedades e infraestructuras producidos directamente por la onda de inundación (daños directos) y la afección a la economía de la zona por la interrupción de las actividades (daños indirectos).
- **Otras consecuencias:** Por ejemplo, los daños medioambientales, la pérdida de reputación, el daño al patrimonio histórico-cultural... Estas consecuencias son difícilmente cuantificables, por lo que se suelen tratar de forma cualitativa.

En general, el riesgo se obtiene como la multiplicación de la probabilidad de fallo por las consecuencias. Sus unidades suelen ser vidas/año (cuando se utiliza la pérdida de vidas) y €/año o \$/año (cuando se utilizan los daños económicos).

Existen diferentes tipos de riesgo según los casos considerados en el cálculo [7]:

- **Riesgo de fallo o riesgo de rotura:** Considera únicamente el riesgo producido por la rotura de la presa.

$$R_f = \sum p(c) \cdot p(f|c) \cdot C(c, f) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde R_f es el riesgo de fallo y $C(c, f)$ son las consecuencias en el caso de fallo de la presa para las solicitaciones c .

- **Riesgo de no fallo o riesgo de no rotura:** Se obtiene a partir de las situaciones de inundación aguas abajo en las que no se produce el fallo de la presa.

$$R_{nf} = \sum p(c) \cdot p(nf|c) \cdot C(c, nf) \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde R_{nf} es el riesgo de no fallo, $p(nf|c)$ es la probabilidad condicionada de no fallo de la presa dadas las cargas (es equivalente a $1-p(f|c)$) y $C(c, nf)$ son las consecuencias para los casos de no fallo de la presa con las cargas c .

- **Riesgo total:** Es el riesgo de inundación aguas abajo, por lo que incluye los casos de rotura de la presa y los casos en los que no falla.

$$R_T = \sum p(c) \cdot (p(f|c) \cdot C(c, f) + p(nf|c) \cdot C(c, nf)) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde R_T es el riesgo total de la presa.

- **Riesgo incremental:** Es la parte del riesgo que se puede atribuir al fallo de la presa, restando a las consecuencias de fallo, las consecuencias que se hubiesen producido aunque la presa no hubiese fallado, es decir, las consecuencias en el caso de no fallo.

$$R_\Delta = \sum p(c) \cdot p(f|c) \cdot C_\Delta(c, f) = \sum p(c) \cdot p(f|c) \cdot (C(c, f) - C(c, nf)) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde R_{Δ} es el riesgo incremental de la presa y $C_{\Delta}(c,f)$ son las consecuencias incrementales, obtenidas al restar las consecuencias para el caso de rotura con las consecuencias en el caso de no rotura.

El riesgo incremental es el utilizado habitualmente en el Análisis de Riesgos para la gestión de la seguridad de la presa.

Además, en muchos documentos se hace referencia a los conceptos de riesgo social e individual. El **riesgo individual** es la probabilidad de que al menos una persona pierda su vida por el fallo de la presa. El **riesgo social** es el riesgo calculado utilizando como consecuencias la pérdida de vidas, por lo que sus unidades son vidas/año.

2.2 La metodología de Análisis de Riesgo

El Análisis de Riesgo es una herramienta que permite integrar toda la información existente respecto a la seguridad de la presa para realizar una gestión eficaz, objetiva y defendible basada en resultados de riesgo [2]. La principal ventaja de esta metodología como apoyo para la gestión de la seguridad de la presa es que a partir de los resultados de riesgo se puede [11]:

- Analizar la fijación de resguardos estacionales y su distribución entre presas de un mismo sistema de explotación.
- Identificar la necesidad de mantenimientos especiales, reparaciones o sustituciones de mecanismos de compuertas o instalaciones completas.
- Plantear mejoras en la forma de operación de las compuertas de presas y sistemas de presas en situación de avenida.
- Plantear nuevas investigaciones (geotécnicas, del cuerpo de presa), cálculos (equilibrio límite, elementos finitos, etc.) así como mejoras en el sistema de vigilancia y auscultación.
- Plantear mejoras en los Planes de Emergencia de Presa.

Para realizar un Análisis de Riesgo completo y cuantitativo, en la bibliografía [24] se proponen los procesos que se muestran en la Figura 1:

- **Determinación del alcance del estudio:** El primer paso consiste en determinar los objetivos, los plazos y el alcance del estudio. No siempre es recomendable realizar un análisis con el máximo grado de detalle, en algunas ocasiones puede ser preferible realizar un análisis con un nivel de detalle menor, por ejemplo, para realizar una primera evaluación de un grupo numeroso de presas.
- **Revisión del Archivo Técnico:** Consiste en el estudio de toda la información disponible en el Archivo Técnico referente a la seguridad de la presa. En este sentido, algunos de los documentos con información más útil para la elaboración del modelo de riesgo son las Normas de Explotación, el Documento XYZT, las Revisiones de Seguridad y el Plan de Emergencia. Además, esta información es discutida en sesiones de grupo para su estructuración y puesta en valor.
- **Visita de campo:** Una vez todo el grupo ha tenido la ocasión de consultar la información disponible, se debe realizar una inspección de la presa. Esta fase del proceso constituye una fuente de información muy valiosa en tanto que permite comprobar las condiciones reales en las que se encuentra la presa y detectar particularidades que, por su naturaleza, o simplemente por los constantes cambios que sufre la estructura a lo largo del tiempo, no se encuentran detallados en la documentación escrita oficial.

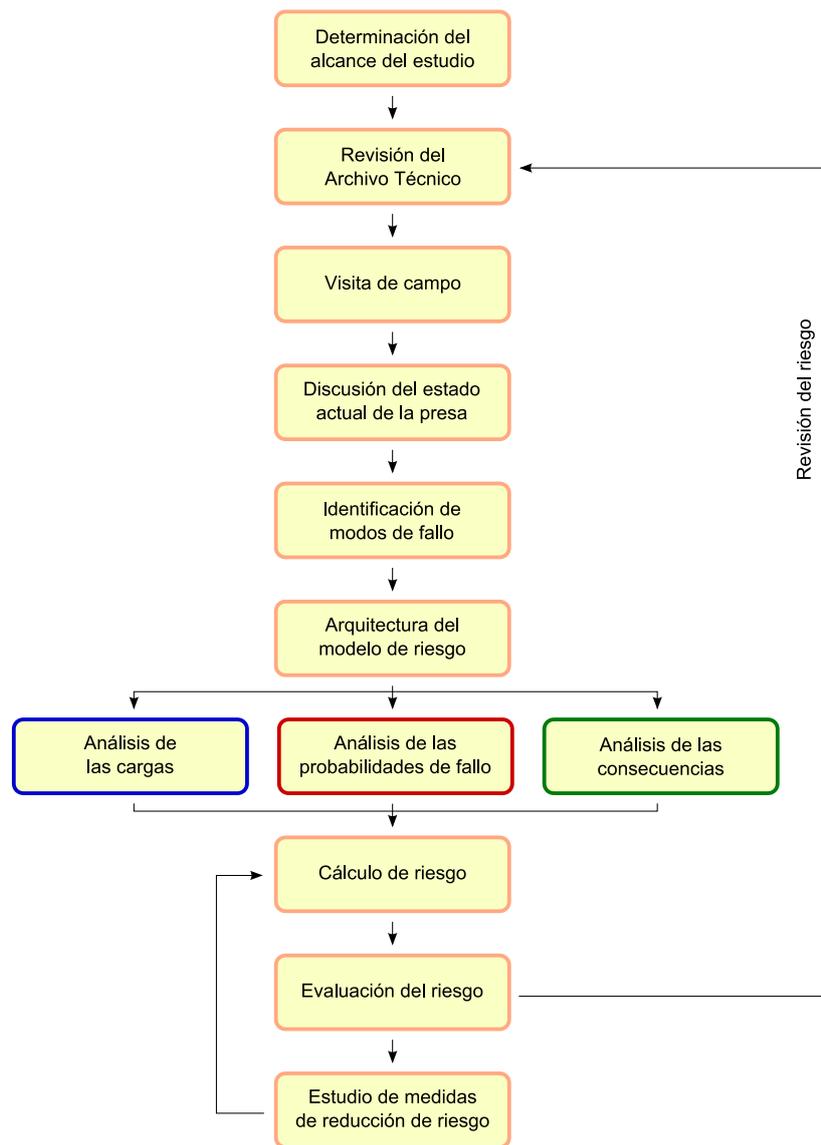


Figura 1: Procesos que componen la metodología de Análisis de Riesgos [24].

- **Discusión del estado actual de la presa:** El siguiente paso es realizar un diagnóstico de la situación actual, basado en la revisión de la información disponible y las visitas realizadas a la presa. Este diagnóstico se realiza mediante sesiones en grupo, donde toda la información obtenida es discutida y analizada.
- **Identificación de modos de fallo:** Tras analizar la información disponible, la siguiente etapa consiste en identificar los posibles modos de fallo que pueden ocurrir en la presa. La identificación de 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. En estas sesiones, cada modo de fallo identificado es estructurado en una secuencia lógica de eventos.

- **Arquitectura del modelo de riesgo:** A partir de los modos de fallo identificados y de la información disponible, es posible desarrollar la arquitectura de un modelo de riesgo que permita calcular el riesgo asociado a cada uno de los modos de fallo. Esta arquitectura vincula la respuesta del sistema (modos de fallo) con la probabilidad de las sollicitaciones y con las consecuencias por rotura de la presa. En el Apartado 2.3 se realiza una descripción más detallada de cómo se estructura el modelo de riesgo.
- **Cálculo del riesgo:** A partir del modelo de riesgo es posible calcular el riesgo asociado a la presa introduciendo los datos necesarios en cada uno de los nodos del modelo de riesgo. En el Apartado 2.3 se definen los tipos de datos necesarios para el cálculo del riesgo.
- **Evaluación del riesgo:** En este punto, los resultados de riesgo obtenidos son comparados con estándares internacionales de tolerabilidad de riesgo para saber si los riesgos existentes en la presa son tolerables. En el Apartado 2.4 se explica este proceso con más detalle.
- **Estudio de medidas de reducción de riesgo:** A partir de los resultados de evaluación del riesgo, se analiza la necesidad de implantar medidas de reducción de riesgo en la presa. Para ello, se introduce en el modelo de riesgo los cambios que estas medidas producen y se recalcula el riesgo. A partir de estos resultados, es posible decidir qué medida es más adecuada para mejorar la seguridad de la presa. Estos datos constituyen una información útil para la toma de decisiones, aunque también deben tenerse en cuenta otros aspectos para la gestión de la presa [4]. En los Apartados 2.5 y 2.6 se describe este proceso con más detalle y las recomendaciones de los principales organismos internacionales.

2.3 El modelo de riesgo

El modelo de riesgo es una herramienta que permite calcular el riesgo asociado a una presa para unos determinados modos de fallo. El modelo de riesgo está dividido en tres áreas: las solicitaciones o cargas, las probabilidades de fallo (también conocidas como respuesta del sistema) y las consecuencias. Un modelo de riesgo analiza los posibles casos de sollicitación sobre la presa y su probabilidad. Para cada caso, calcula la probabilidad de fallo de la presa y las consecuencias asociadas a este fallo. A partir de estos datos, las ecuaciones del Apartado 2.1 permiten realizar el cálculo del riesgo.

El modelo de riesgo puede ser representado a partir de un diagrama de influencia. En él, cada variable del modelo se representa mediante un nodo y cada relación mediante un conector. A partir de un diagrama de influencia [24], es posible llevar a cabo el cálculo del riesgo del sistema con la ayuda de software, introduciendo los datos necesarios en cada nodo. En la Figura 2 se muestra un diagrama de influencia de un modelo de riesgo genérico para el escenario hidrológico.

El escenario de sollicitación analizado determina en gran medida la estructura del modelo de riesgo. Para un escenario hidrológico, los datos que deben ser introducidos en el modelo son [11]:

- Las avenidas y sus probabilidades de presentación anual.
- El nivel previo al que se encuentra el embalse en el momento de la avenida.
- La fiabilidad del funcionamiento de las compuertas y válvulas que permiten la salida de agua a través de los aliviaderos y desagües de fondo.
- La laminación incluyendo el nivel máximo alcanzado en el embalse y el caudal laminado en cada situación de avenida, funcionamiento de compuertas y nivel previo en el embalse.
- Las probabilidades condicionales de que se produzca cada uno de los fenómenos en que se descomponen los modos de fallo en función del nivel máximo en el embalse o del caudal de salida del embalse.
- Los caudales pico resultantes de la rotura de la presa.
- Las consecuencias en términos de pérdida estimada de vidas y de costes económicos provocados por el fallo. Estas consecuencias se obtienen para el caso de no rotura, utilizando el caudal pico laminado, y para el caso de rotura, utilizando el caudal pico de rotura.

En un escenario sísmico, el nodo de avenidas es sustituido por el de probabilidad de sismos y las cargas sobre la presa son definidas por la aceleración horizontal, en lugar de por los resultados de la laminación de la avenida.

En un escenario normal, las cargas son definidas directamente por el nivel en el embalse.

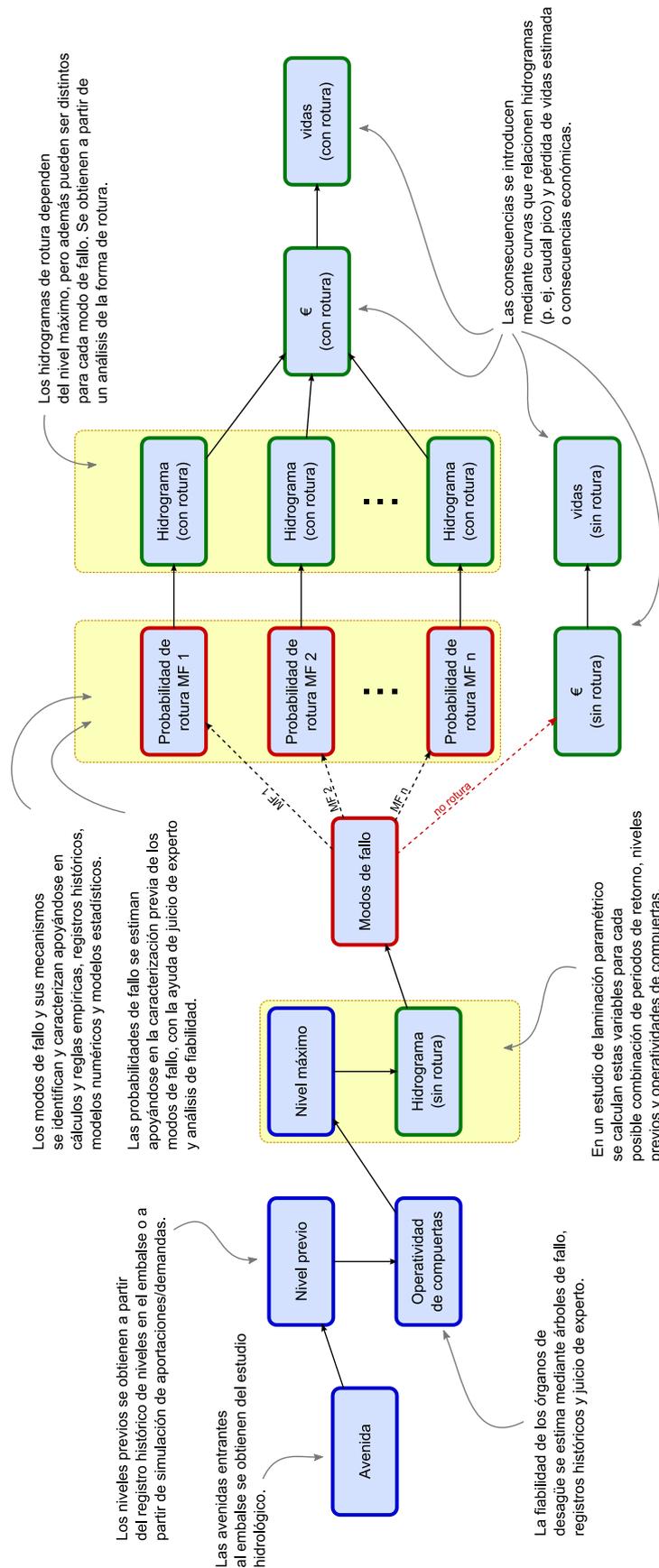


Figura 2: Diagrama de influencia de un modelo de riesgo genérico para el escenario hidrológico mostrando los trabajos a realizar para caracterizar cada una de las variables [24].

El modelo de riesgo es una representación numérica de cómo las variables referentes a la seguridad de la presa dependen unas de otras. De esta forma, se consigue modelar el comportamiento de la presa durante una situación que puede producir el fallo.

En general, cada modelo de riesgo representa el comportamiento de una presa, pero también pueden elaborarse modelos de riesgo que representen el comportamiento de un sistema de presas [26]. De esta forma, se puede analizar el efecto que el comportamiento de una presa tiene sobre el riesgo del resto de presas del sistema, obteniendo resultados de riesgo más completos. De igual forma, se puede analizar cómo la implantación de una medida en una presa afecta al resto de presas.

2.4 Evaluación del riesgo

La Evaluación de Riesgo es el proceso por el cual se evalúa la importancia del riesgo asociado a la rotura de una presa. La fase de evaluación de riesgo es el punto en el que los juicios y valores se introducen en el proceso de decisión (implícita o explícitamente) al incluir la consideración de la importancia de los riesgos estimados [14]. La evaluación del riesgo se basa en los siguientes conceptos [13]:

- **Riesgo inaceptable:** Riesgo que la sociedad no puede tolerar independientemente de los beneficios que conlleve.
- **Riesgo tolerable:** Riesgo con el que la sociedad puede convivir a cambio de ciertos beneficios. Es un riesgo que no se considera despreciable, por lo tanto debe ser adecuadamente gestionado y reducido si es factible.
- **Riesgo ampliamente aceptado:** Es el riesgo que en general puede ser considerado como insignificante y por lo tanto, es aceptado por la sociedad. Este tipo de riesgo no suele darse en grandes presas, debido a las potenciales altas consecuencias que suele producir su rotura.

A partir de estos conceptos, diversos organismos internacionales han desarrollado recomendaciones de tolerabilidad para presas, que indican cuando un riesgo es tolerable [5]. En general, estas recomendaciones se aplican a los resultados de riesgo incremental. Algunos de estas recomendaciones son:

- Bureau of Reclamation, Estados Unidos (USBR) 2003 [30]:

Las recomendaciones de tolerabilidad se basan en valores de riesgo promedio. La primera limitación afecta a la probabilidad de fallo anual, siempre que el fallo produzca pérdida de vidas, siendo el valor recomendado 10^{-4} . Este valor sería equivalente al riesgo individual y tiene connotaciones muy vinculadas igualmente a la propia imagen y responsabilidad pública del propietario de la presa.

La segunda limitación se establece en términos de riesgo incremental, debiendo este limitarse a valores inferiores a 10^{-2} y 10^{-3} vidas/año a corto y largo plazo respectivamente. En presas por encima de la primera recomendación, es necesario hacer especial énfasis en medidas que rebajen el riesgo rápidamente, mientras que en la segunda recomendación el margen para la planificación es mayor.

Como se muestra en la Figura 3, estas limitaciones se representan en un gráfico fN, que muestra la probabilidad de rotura en el eje vertical y la pérdida de vidas en el eje horizontal. En este caso, en el eje horizontal se representa una pérdida de vidas promedio de todos los casos de rotura de la presa, obtenida al dividir el riesgo social incremental por la probabilidad de rotura. Mediante

estos gráficos, puede representarse la situación de la presa y observar si cumple estas recomendaciones.

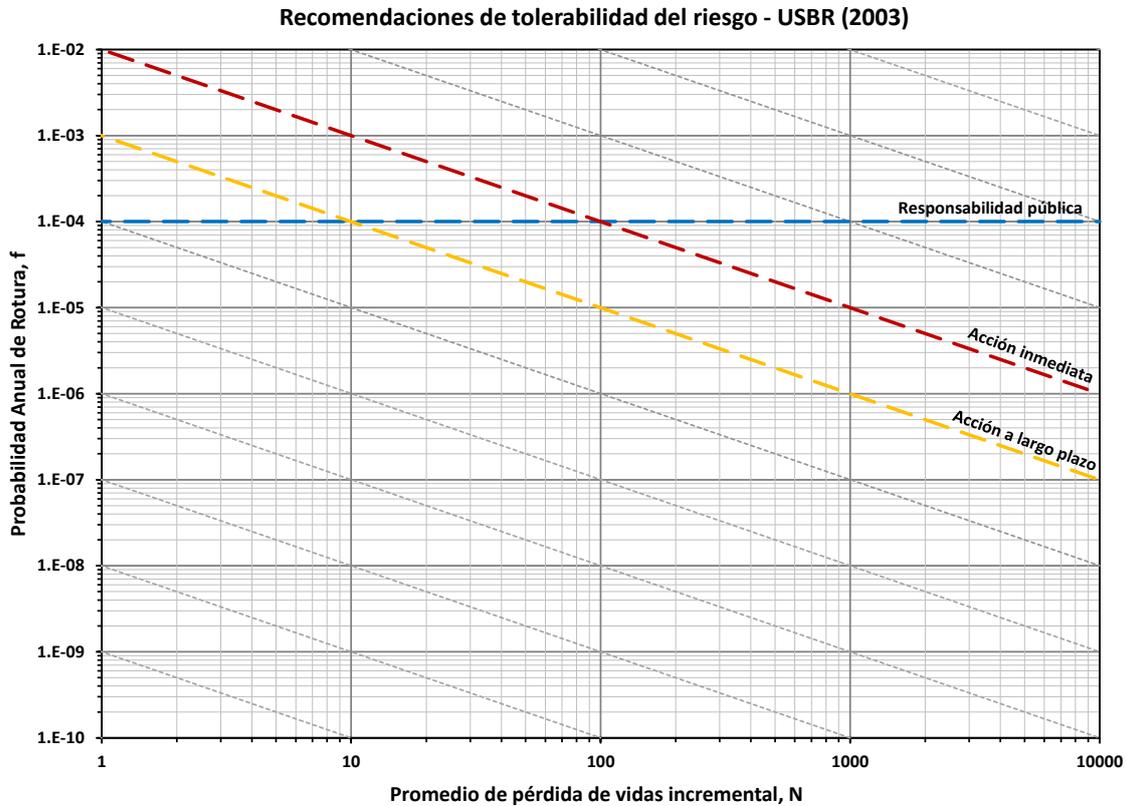


Figura 3: Recomendaciones de tolerabilidad de riesgo propuestas por el USBR en el año 2003 (Traducido de [30]).

- Bureau of Reclamation, Estados Unidos (USBR) 2011 [31]:

Estas nuevas recomendaciones están basadas también en un gráfico fN. En ellas se mantienen las limitaciones sobre la probabilidad de fallo anual de 10^{-4} y la limitación sobre el riesgo incremental de 10^{-3} vidas/año. Estas limitaciones delimitan dos regiones. En la zona superior, cuanto más supera el riesgo estas recomendaciones más justificadas están las medidas de reducción de riesgo y la reducción de su incertidumbre. En cambio, en la zona inferior, cuanto más alejada esta la presa de estas recomendaciones, menos justificadas están las medidas de reducción de riesgo.

Además se establece una nueva limitación sobre las consecuencias, recomendando que si la pérdida de vidas media en una presa es superior a 1000 vidas, es necesario analizar detenidamente estos riesgos y asegurar que se cumple el criterio ALARP. Este criterio se explica al final de este apartado. Las diferentes zonas de tolerabilidad introducidas por estas recomendaciones se muestran en la Figura 4.

Recomendaciones de tolerabilidad del riesgo - USBR (2011)

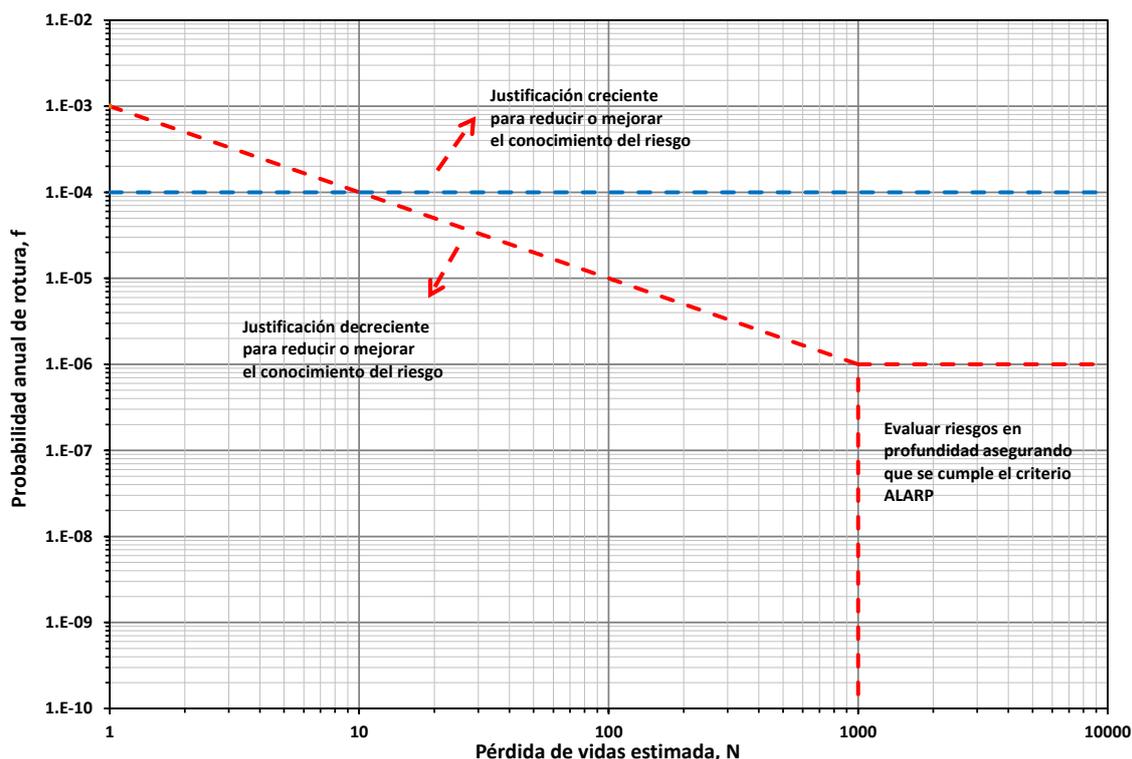


Figura 4: Recomendaciones de tolerabilidad de riesgo propuestas por el USBR en el año 2011 (Traducido de [31]).

- Comité Australiano de Grandes Presas (ANCOLD) [1]:

Las recomendaciones de tolerabilidad de riesgo adoptados por dicho organismo y que, en la práctica, corresponden con los adoptados para tolerabilidad de riesgos en la mayoría de industrias peligrosas, se basan en la probabilidad acumulada anual de excedencia de cierto valor de las consecuencias (en términos de vidas humanas). Para presas nuevas, se recomiendan unas recomendaciones más restrictivos que para presas ya construidas.

Este tipo de recomendaciones de tolerabilidad se representa en gráficos FN, en los que la situación de una presa es representada por una curva y no por un único punto. En estos gráficos, el eje horizontal representa las consecuencias (N) y el eje vertical representa la probabilidad de excedencia de dichas consecuencias (F). En la Figura 5 se muestran las recomendaciones de tolerabilidad propuestas por este organismo en un gráfico FN.

Recomendaciones de tolerabilidad del riesgo - ANCOLD

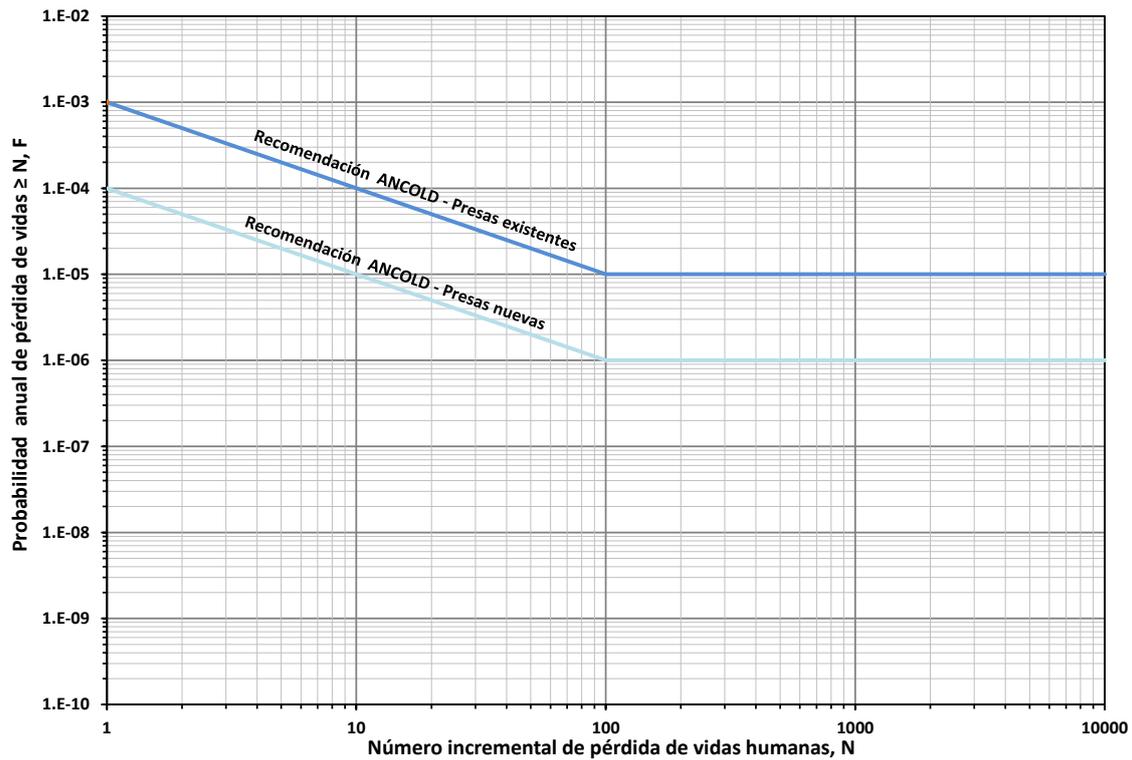


Figura 5: Recomendaciones de tolerabilidad de riesgo propuestas por el ANCOLD (Traducido de [1]).

- Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE) [21]:

El Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos propone una recomendación de tolerabilidad de riesgo basados en los criterios del USBR, el ANCOLD y el NSW [22] aportando una limitación adicional a las máximas consecuencias tolerables. Esta limitación se muestra en el gráfico FN de la Figura 6.

Además, el USACE también introduce otra recomendación de tolerabilidad sobre el riesgo individual, que debe ser menor a 10^{-4} . Esta limitación se muestra en la Figura 7.

Para la gestión de presas que cumplen las anteriores recomendaciones de tolerabilidad (por lo tanto, su riesgo puede definirse como tolerable), se aplica el criterio ALARP. El nombre de este criterio proviene del inglés, *As Low As Reasonably Practicable*, es decir, tan bajo como sea razonablemente posible. Según este criterio, los riesgos tolerables se asumen únicamente si su reducción resulta impracticable o si el coste necesario para ello es desproporcionado en comparación con la mejora de seguridad alcanzada [3].

Recomendaciones de tolerabilidad del riesgo - USACE

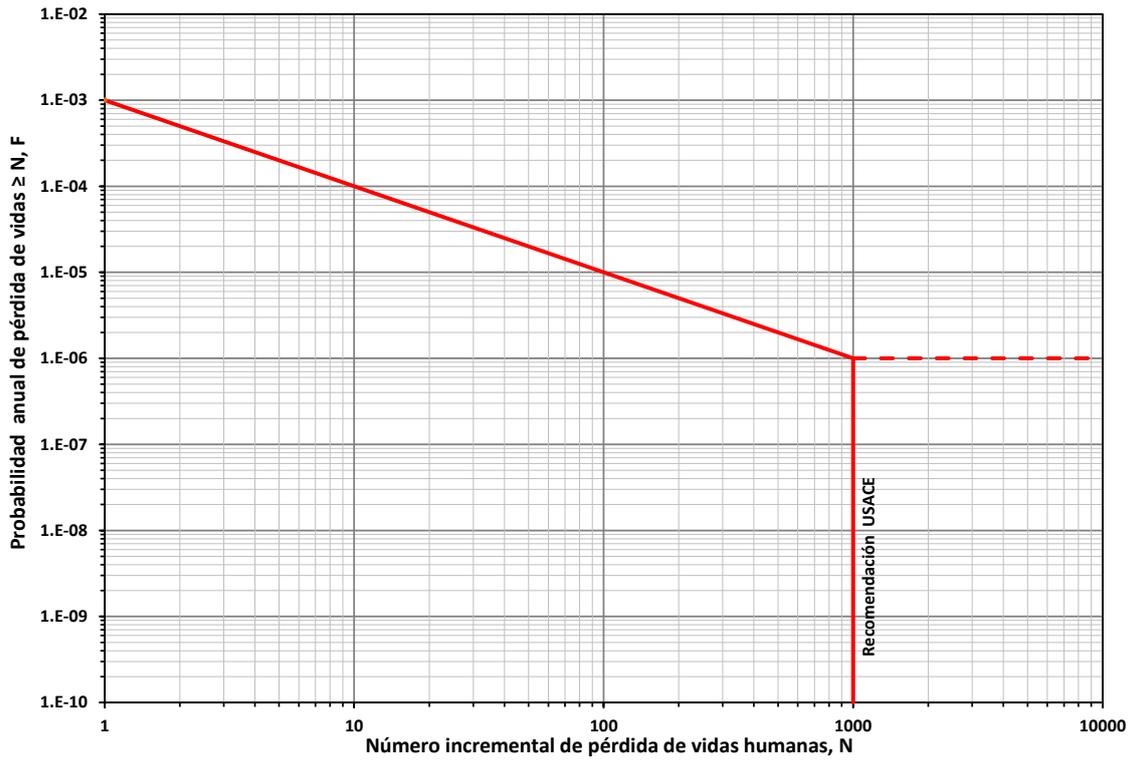


Figura 6: Recomendaciones de tolerabilidad de riesgo social propuesta por el USACE (Traducido de [21]).

Recomendaciones de tolerabilidad de riesgo individual - USACE

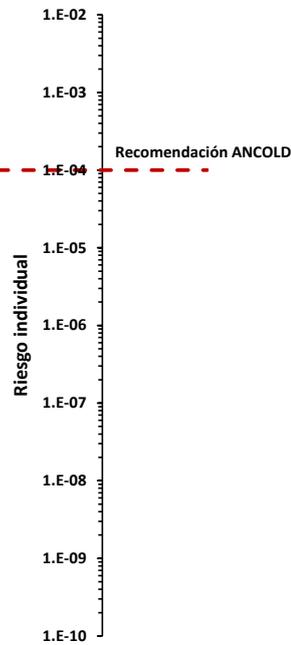


Figura 7: Recomendaciones de tolerabilidad de riesgo individual propuesta por el USACE (Traducido de [21]).

2.5 Medidas de reducción de riesgo

El planteamiento de medidas de reducción de riesgo es el siguiente paso del Análisis de Riesgo, tanto para las presas que no cumplen las recomendaciones de tolerabilidad como para las presas con riesgos tolerables según el criterio ALARP.

Mediante la modificación del modelo de riesgo, es posible estimar el efecto sobre el riesgo de la presa de diferentes medidas planteadas. Para ello, es necesario analizar cómo afecta cada medida a los diferentes nodos del modelo y recalcular el riesgo a partir del modelo modificado. Las medidas pueden reducir la magnitud de las cargas que debe resistir la presa, mejorar la respuesta del sistema antes éstas cargas y/o disminuir las consecuencias de la rotura.

Existe una gran variedad de medidas que pueden ser implementadas para mejorar la seguridad de una presa. Estas medidas pueden ser divididas en estructurales y no estructurales. En la Figura 8 se muestra un resumen no exhaustivo de algunas de las medidas de reducción de riesgo más empleadas.



Figura 8: Resumen de algunas de las medidas de reducción de riesgo para presas más empleadas.

Por un lado, algunas de las medidas estructurales más frecuentes son:

- Mejora del estado del cuerpo de presa: Dentro de este grupo se incluyen todas las medidas que suponen una mejora de la capacidad resistente de la estructura. Algunos ejemplos son la mejora de la impermeabilidad del paramento aguas arriba, la reducción de filtraciones y/o de fisuras mediante inyecciones y la mejora de la impermeabilidad del núcleo. Este tipo de medidas contribuye a la mejora de la respuesta del sistema frente a las solicitaciones.
- Mejora del estado de la cimentación y/o estribos: Algunos ejemplos de este tipo de medidas son las inyecciones para garantizar la estabilidad de la cerrada y/o mejorar su impermeabilidad y la mejora del sistema de drenaje para evitar la aparición de altas subpresiones en la cimentación. Este tipo de medidas también contribuye a la mejora de la respuesta del sistema frente a las solicitaciones.
- Aumento de la cota de coronación: Este tipo de medidas consiste en aumentar el nivel de coronación, por ejemplo mediante la construcción de un pretil, para disminuir la probabilidad de sobrevertido en la presa.
- Aumento de la capacidad de desagüe: Mediante estas medidas se pretende reducir las cargas que debe soportar la presa durante una avenida. Se incluyen dentro de este grupo la instalación de un nuevo órgano de desagüe, el rebaje del labio del aliviadero o el aumento del número de vanos.
- Mejora de la fiabilidad de los órganos de desagüe: Este tipo de medidas está encaminado a mejorar la operatividad de los órganos de desagüe, y por lo tanto, a reducir las cargas que debe soportar la presa. Algunos ejemplos son la mejora del abastecimiento eléctrico, la reparación de los accionamientos o la sustitución de compuertas.
- Mejora de la obra civil de los órganos de desagüe: Estas medidas están encaminadas a evitar un fallo relacionado con estos elementos de la presa. Por ejemplo, dentro de este grupo se incluye el recrecido de cajeros del canal de descarga de un aliviadero o la reparación del cuenco amortiguador. En general, estas medidas mejoran la respuesta del sistema ante las cargas.

Por otro lado, algunas de las medidas no estructurales más habituales son:

- Implantación de resguardos: La implantación de resguardos en el embalse reduce la probabilidad de niveles altos en el momento de ocurrencia del evento hidrológico o sísmico, y por lo tanto, disminuye las solicitaciones que debe soportar la presa.

- Optimización de las reglas de operación de los órganos de desagüe: Estas reglas de gestión en avenidas pueden ser modificadas para minimizar el riesgo de inundación aguas abajo.
- Mejora del sistema de auscultación: La mejora del conocimiento del comportamiento de la presa permite detectar la ocurrencia de potenciales modos de fallo y evitar su ocurrencia. Por lo tanto, este grupo de medidas mejora la respuesta del sistema.
- Implantación del Plan de Emergencia: Mediante este plan se mejora el aviso a la población y la coordinación entre las diferentes administraciones y los servicios de emergencia. Por lo tanto, permite reducir la pérdida de vidas en el caso de rotura de la presa.
- Formación de la población aguas abajo: Si las personas que viven aguas abajo de la presa conocen cómo deben actuar si se produce una inundación, la pérdida de vidas puede ser reducida de forma significativa. Este tipo de formación se puede llevar a cabo mediante folletos, simulacros, reuniones de grupo...
- Modificación del planeamiento urbano: Variar los planes urbanísticos de las poblaciones aguas abajo para evitar la construcción en zonas inundables puede reducir significativamente las consecuencias de una inundación.
- Mejora en las operaciones de mantenimiento: Una mejora en los medios y las actividades realizadas en el mantenimiento diario de la presa puede producir una disminución de su probabilidad de fallo.

2.6 La gestión de medidas de reducción de riesgo

2.6.1 Introducción

El Análisis de Riesgos es una herramienta útil para racionalizar y justificar las inversiones en seguridad de presas y comprender los riesgos que estas estructuras representan [12]. Dentro de la metodología de Análisis de Riesgo, el proceso de establecer recomendaciones para apoyar la toma de decisiones se realiza tras efectuar los cálculos de riesgo para la situación actual del sistema.

Como se ha indicado en el apartado anterior, estos resultados de riesgo son evaluados a partir de recomendaciones de tolerabilidad internacionales. En primer lugar, se realiza una evaluación del riesgo a partir de recomendaciones de tolerabilidad internacionales. Cumpla o no la presa estas recomendaciones, el siguiente paso consiste en plantear posibles medidas de reducción de riesgo en el sistema presa-embalse, analizando cómo cada una de ellas afecta a los datos introducidos en el modelo. De esta forma, se vuelve a calcular el riesgo de la presa para las diferentes situaciones obtenidas al implantar cada una de las medidas planteadas.

A partir de los resultados de riesgo de las diferentes medidas se establece una secuencia de priorización de medidas hasta que la presa se encuentre dentro de las recomendaciones de tolerabilidad y se asegure que cumple el criterio ALARP. Esta secuencia de priorización no es una secuencia fija que deba seguirse detalladamente, tan solo son recomendaciones basadas en los resultados de riesgo para la gestión de la presa. Para definir la secuencia real de implantación de medidas afectarán otros aspectos administrativos, económicos, sociales y ambientales.

En cualquier caso, la gestión de la seguridad de la presa no acaba cuando esta secuencia de medidas es implantada, ya que los procesos de degradación y envejecimiento de la estructura pueden producir un aumento del riesgo. Además, nuevos procesos pueden ocurrir que muestren la posible aparición de nuevos modos de fallo. Por este motivo, es necesario seguir un proceso de actualización de los modelos de riesgo y planteamiento de nuevas medidas para realizar una gestión continua del riesgo. De esta forma, se consigue un proceso continuo de gestión de la seguridad del sistema presa-embalse, tal y como se muestra en la Figura 9.

Además, este proceso continuo tiene claros efectos beneficiosos sobre la gestión y el mantenimiento de la presa, ya que los datos procedentes del Análisis de Riesgo muestran qué partes de la presa requieren una mayor atención. Los resultados obtenidos también proporcionan información útil para mejorar los principales documentos del Archivo Técnico, como el Plan de Emergencia, las Revisiones de Seguridad y las Normas de Explotación.



Figura 9: Proceso de gestión continua de la seguridad del sistema presa-embalse mediante el Análisis de Riesgo (Traducido de [9]).

Los principales organismos internacionales han establecido diferentes recomendaciones para la gestión de medidas y obtener secuencias de implementación. Estas recomendaciones suelen estar basadas en principios de reducción de riesgo. A continuación se resumen las indicaciones de los principales organismos internacionales relacionados con presas para la gestión de su riesgo.

2.6.2 Gestión de medidas según el HSE

Las indicaciones del Health and Safety Executive (HSE) de Reino Unido para la gestión del riesgo han sido obtenidas del documento “Reducing risks, protecting people” (2001) [13]. Este documento fue precursor explicando cómo deben definirse diferentes estrategias de gestión de riesgo. Según este organismo, la toma de decisiones respecto a medidas de reducción de riesgo debe apoyarse en tres principios:

- Principio de equidad: Todas las personas tienen derecho a cierto nivel de protección. En la práctica, se introduce estableciendo una limitación sobre el riesgo individual. Este principio se recomienda que predomine en la zona no tolerable.
- Principio de utilidad: Se recomienda utilizar criterios basados en la comparación entre el riesgo reducido por las medidas y sus costes. De esta forma, se asegura que los costes de una medida están compensados por sus beneficios. Se recomienda que este principio sea el predominante en la zona tolerable.
- Principio tecnológico: Un nivel de prevención de riesgo es satisfactorio cuando todas las posibles medidas existentes para su control han sido implementadas, independientemente de las circunstancias.

Respecto a su aplicación práctica, se recomienda la obtención de indicadores de riesgo numéricos basados en estos principios para priorizar entre medidas. Además, la

aplicación de medidas debe basarse en los conceptos de riesgo no tolerable y riesgo tolerable y el criterio ALARP.

Por último, se recomienda apoyar la toma de decisiones con Análisis Coste-Beneficio, especialmente cuando estos se encuentran dentro de la zona tolerable.

2.6.3 Gestión de medidas según el ANCOLD

Según el documento “*Guidelines on Risk Assessment*” (2003) [1] del Australian National Committee on Large Dams (ANCOLD) para formular una estrategia de implementación de medidas de seguridad en un grupo de presas se recomienda seguir tres principios:

- **Prioridad:** Para definir el orden de implementación se recomienda dar prioridad a los riesgos más altos. El riesgo sobre la pérdida de vidas debe prevalecer sobre el resto de riesgos.
- **Urgencia:** Para estimar la rapidez con la que las medidas deben ser implementadas se aconseja tener en cuenta por cuánto los riesgos exceden las recomendaciones de tolerabilidad.
- **Mejora progresiva:** Es recomendable definir etapas en la priorización de medidas si esto ayuda a reducir lo máximo posible el riesgo con los recursos disponibles.

Se aconseja revisar el plan de implementación de medidas continuamente para añadir nueva información y actualizar la situación de riesgo de las presas.

Como criterio de priorización se recomienda el indicador de riesgo CSLS cuando la presa se encuentra en la zona no tolerable y el ACSLS para la zona tolerable, donde se evalúa el criterio ALARP. Estos dos indicadores miden la eficiencia de las medidas para reducir el riesgo y son tratados en más detalle en el Apartado 3.3.

El Boletín 112 del ANCOLD [6], contiene un ejemplo de priorización de medidas en un conjunto de presas a partir de indicadores de riesgo. En este ejemplo se prioriza entre 23 medidas estructurales en 17 grandes presas. Para ello se ha estimado el efecto de cada una de estas medidas sobre el riesgo y se han priorizado las medidas en dos grupos:

- Un primer grupo en el que la priorización se ha realizado minimizando la relación entre el coste de la medida y la reducción del riesgo social (indicador CSLS). Esta priorización se ha aplicado a las primeras 8 medidas, hasta alcanzar un nivel de riesgo social tolerable. Esta es la zona de medidas que requieren más urgencia.
- Un segundo grupo en el que la priorización se ha realizado maximizando la relación entre el coste de la medida y la reducción del riesgo económico (indicador coste/beneficio). Esta priorización se ha realizado para todas las medidas restantes.

En la Figura 10 se muestra la comparación entre la variación en el riesgo de la secuencia de priorización obtenida mediante este método y de la secuencia de priorización que se obtendría sin tener en cuenta los resultados de riesgo.

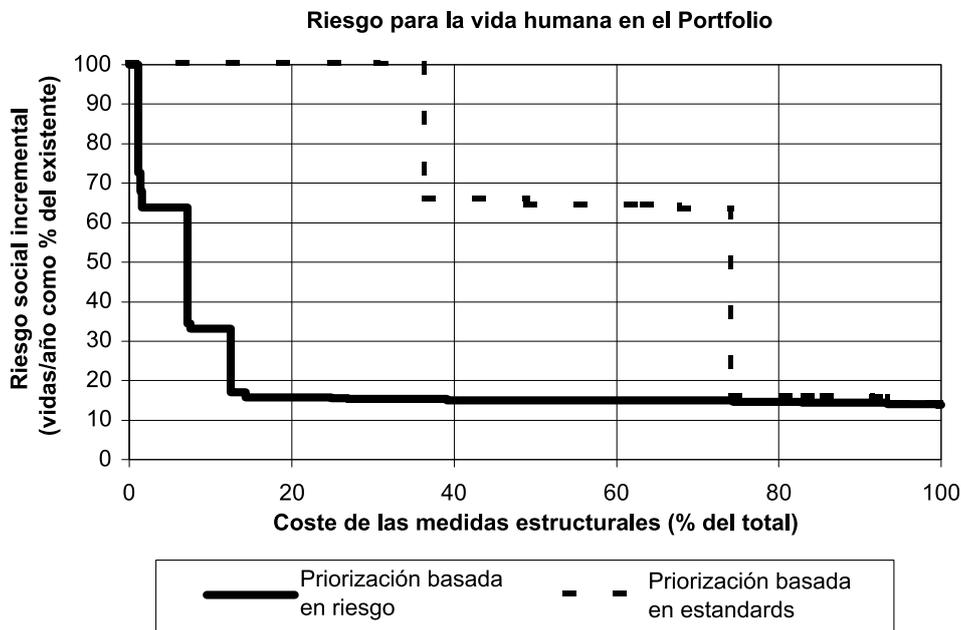


Figura 10: Secuencias de implementación de medidas planteadas en el grupo de presas del SA WATER (Traducido de [6]).

2.6.4 Gestión de medidas según el ICOLD

En el Boletín 130 (2005) del International Commission on Large Dams (ICOLD) [14] se especifican dos principios que deben guiar la aplicación de criterios de tolerabilidad y la gestión del riesgo:

- **Equidad:** El derecho individual y social a ser protegido y el derecho a que el interés de todos sea tratado con justicia.
- **Eficiencia:** La necesidad de la sociedad de distribuir y usar los recursos disponibles para alcanzar el máximo beneficio.

Según este documento, estos principios compiten normalmente entre ellos, por lo que es necesario encontrar un balance entre ambos que realice la gestión del riesgo y establecer criterios de tolerabilidad adecuados.

2.6.5 Gestión de medidas según el USACE

En el año 2005, el United States Army Corps of Engineers (USACE) comenzó un proceso de análisis preliminar del riesgo de 568 presas y otras 108 estructuras con el fin de definir las medidas necesarias de reducción de riesgo. Este proceso se denomina Screening Portfolio Risk Analysis (SPRA) [20]. A partir de los resultados de riesgo se definieron cinco categorías (Dam Safety Action Classification (DSAC)) que son empleadas como base para informar sobre la necesidad de implantación de medidas de reducción de riesgo:

- Categoría I: Urgente e ineludible. La progresión hacia el fallo está actualmente teniendo lugar durante la situación normal o el riesgo por el fallo de la presa es extremadamente elevado.
- Categoría II: Urgente. La probabilidad de fallo de esta presa es muy alta para garantizar la seguridad pública o el riesgo asociado al fallo de la presa es muy elevado.
- Categoría III: Alta prioridad. El riesgo de fallo de la presa es moderadamente alto según la información disponible.
- Categoría IV: Prioridad. Según la información disponible, el riesgo de la presa es bajo aunque puede incumplir alguna de las recomendaciones de tolerabilidad del USACE.
- Categoría V: Normal. El riesgo de la presa es considerado tolerable, por lo que se considera que la presa es suficientemente segura.

2.6.6 Gestión de medidas según el USBR

Las recomendaciones del United States Bureau of Reclamation (USBR) se encuentran recogidas en el documento “*Dam Safety Public Protection Guidelines*” (2011) [31]. En este documento se recomienda realizar la priorización de medidas separando las presas en cinco grupos denominados DSPR (Dam Safety Priority Ranking). Estos grupos se definen a partir de los resultados de riesgo y su incertidumbre asociada:

- Prioridad inmediata: Esta categoría incluye las presas con una alta probabilidad de fallo o riesgo social y con baja incertidumbre sobre este riesgo. En estas presas es necesario plantear medidas de reducción de riesgo que actúen rápidamente y que deben ser combinadas con medidas de reducción de riesgo más a largo plazo.
- Prioridad urgente: Esta categoría incluye las presas con una alta probabilidad de fallo o riesgo social pero con una incertidumbre alta sobre este riesgo. En estos casos es conveniente combinar la aplicación de medidas con estudios que permitan evaluar este riesgo con una menor incertidumbre.
- Prioridad entre alta y moderada: Para presas que se encuentren cercanas a las recomendaciones de tolerabilidad de riesgo y con moderada incertidumbre sobre este riesgo. En este caso se plantean medidas siempre que sean razonables y estén justificadas en términos de riesgo.
- Prioridad entre baja y moderada: Para presas con probabilidad de fallo y riesgo relativamente bajos pero con una alta incertidumbre. En este tipo de presas las medidas deben estar centradas en reducir la incertidumbre respecto al riesgo.
- Prioridad baja: Para presas con probabilidad de fallo y riesgo relativamente bajos y con baja incertidumbre. En estas presas se recomienda únicamente seguir con las actividades habituales de gestión y auscultación.

Este sistema de clasificación es la base en este organismo para priorizar medidas, aunque otros aspectos pueden condicionar esta priorización como los costes y los recursos disponibles a lo largo del tiempo.

2.6.7 Conclusiones

Tras analizar las recomendaciones para la gestión de medidas de reducción de riesgo de diversos organismos internacionales, se han alcanzado las siguientes conclusiones:

- Diversos organismos internacionales recomiendan asistir la toma de decisiones en seguridad de presas mediante resultados de riesgo. Cabe destacar que los resultados de riesgo son un apoyo a la toma de decisiones, pero también hay que tener en cuenta otros factores y a las partes implicadas.
- En general, en las recomendaciones para guiar la toma de decisiones predominan dos principios: eficiencia o utilidad y equidad. Este último está más justificado cuando los riesgos se encuentran por encima de la zona tolerable. Ambos principios pueden entrar en conflicto, siendo necesario el desarrollo de indicadores de riesgo que permitan un equilibrio entre ambos.
- Varios organismos destacan la necesidad de relacionar los resultados de riesgo con la planificación de medidas, dando mayor urgencia cuando los riesgos son más elevados.

Además, aunque los diferentes organismos explican de forma teórica cómo debe realizarse esta gestión del riesgo y qué principios deben guiarla, no se han encontrado muchos ejemplos prácticos donde se haya definido una secuencia de implementación de medidas a partir de indicadores de riesgo para un conjunto real de presas. Este hecho puede estar producido por la inexistencia de una herramienta sencilla y sistemática que permita definir estas secuencias de implementación a partir de los resultados de riesgo.

3. PROCESO DE GESTIÓN DE MEDIDAS BASADO EN PRINCIPIOS DE PRIORIZACIÓN E INDICADORES DE RIESGO

3.1 Introducción

En este trabajo se propone un proceso a partir de los resultados de riesgo que permite obtener secuencias de implantación de medidas de una forma objetiva y clara. Este proceso está basado en principios de reducción de riesgo y en indicadores de riesgo. En la Figura 11 se muestra gráficamente el proceso seguido.

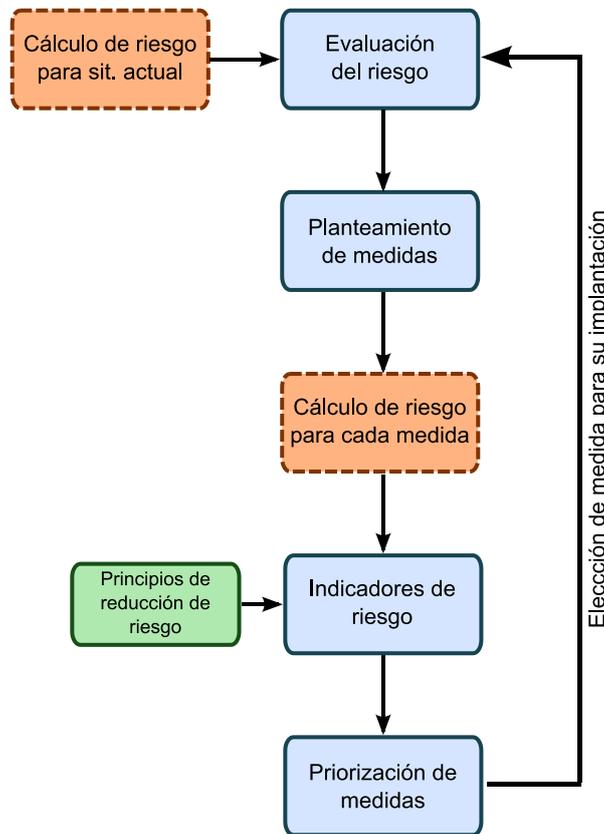


Figura 11: Proceso de toma de decisiones a partir de los resultados de riesgo.

En primer lugar, se realiza una evaluación del riesgo a partir de recomendaciones de tolerabilidad internacionales. Cumpla o no la presa estas recomendaciones, el siguiente paso consiste en plantear posibles medidas de reducción de riesgo en el sistema presa-embalse, analizando cómo cada una de ellas afecta a los datos introducidos en el modelo. De esta forma, se vuelve a calcular el riesgo de la presa para las diferentes situaciones obtenidas al implantar cada una de las medidas planteadas.

A partir de los resultados de riesgo se calculan para cada una de las medidas diferentes indicadores de riesgo que permiten realizar una priorización de las medidas. Estos indicadores están basados en principios de reducción de riesgo y son analizados con más detalle en el Apartado 3.3. Además, estos indicadores permiten ver si se cumple el criterio ALARP para todas las medidas propuestas en presas con un riesgo tolerable.

Los resultados de la priorización recomiendan qué medida puede ser implantada, según los resultados de riesgo. De esta forma, se vuelve a repetir el proceso, realizando

una nueva evaluación del riesgo y planteando nuevas medidas de reducción del riesgo. Este proceso se repite hasta que la presa cumple las recomendaciones de tolerabilidad y el criterio ALARP. El resultado final es una secuencia de implantación de medidas.

El proceso anterior puede ser extrapolado con la misma estructura para la gestión de un grupo de presas, priorizando en cada paso entre las medidas propuestas de todas las presas y decidiendo qué medida se implanta. La secuencia de implantación de medidas queda definida cuando todas las presas cumplen las recomendaciones de tolerabilidad y el criterio ALARP.

En cualquier caso cabe destacar que las secuencias de implementación de medidas obtenidas con este proceso son simplemente un apoyo para la toma de decisiones en seguridad de presas, ya que también hay que considerar otros aspectos que pueden condicionar las medidas que son implantadas.

3.2 Principios de priorización de medidas

3.2.1 Introducción

Como indican los principales organismos internacionales, la gestión de medidas de reducción de riesgo está basada en la definición de principios generales de priorización, que indican cómo debe realizarse este proceso y qué medidas deben priorizarse respecto al resto. A partir de los principios utilizados por algunos de los principales organismos de gestión de la seguridad de presas, en esta tesina se emplean dos principios de priorización de medidas: eficiencia y equidad.

Como se explica en el apartado anterior, cada principio de priorización está ligado al cálculo de diferentes indicadores de riesgo, que son aplicados como criterio para priorizar entre las diferentes medidas estudiadas. De esta forma, a través de los indicadores de riesgo pueden obtenerse diferentes secuencias de implementación de medidas basados en uno o varios principios de priorización.

3.2.2 Principio de eficiencia

Este principio surge debido al hecho de que la sociedad tiene recursos limitados, por lo que estos deben ser repartidos de la forma más eficiente posible.

En cada paso, la medida elegida es la que produce una mayor disminución del riesgo a un menor coste, es decir, la que produce un gasto del dinero más eficiente. Este suele ser el principio predominante cuando la presa cumple las recomendaciones de tolerabilidad.

En este documento, la eficiencia se ha dividido en dos partes:

- Eficiencia social: Cuando el riesgo que se analiza es el riesgo social, es decir, el riesgo en pérdida de vidas/año.
- Eficiencia económica: Cuando se analiza la reducción del riesgo económico, es decir, se define la estrategia más ventajosa desde el punto de vista económico. Este tipo de eficiencia solo debe predominar cuando la presa cumple las recomendaciones de tolerabilidad [2], ya que en otro caso el riesgo social es más importante que el económico.

Además, los indicadores calculados a partir del principio de eficiencia también pueden ser utilizados para ver si se cumple el criterio ALARP, y por lo tanto, si la implantación de las medidas está justificada.

Como se verá en los resultados del caso de estudio, la aplicación de este principio tiende a priorizar las medidas que producen una reducción del riesgo con un bajo coste, por ejemplo pequeñas actuaciones que rebajan la probabilidad de los modos de fallo con un mayor riesgo.

3.2.3 Principio de equidad

Este principio se basa en el derecho de todas las personas a tener un cierto nivel de protección. Su aplicación se realiza a través del riesgo individual, que como se define en el Apartado 2.1 es la probabilidad de que al menos una persona pierda su vida por el fallo de la presa.

En grandes presas, el riesgo individual suele ser equivalente a la probabilidad de rotura, ya que una rotura de la presa seguramente produciría que al menos una persona pierda su vida. Esta suposición no es en principio aplicable en presas sin poblaciones aguas abajo y en pequeños azudes, ya que la rotura de la presa no tiene por qué producir pérdida de vidas y por lo tanto, el riesgo individual y la probabilidad de rotura no son equivalentes.

La aplicación de este principio solo debe predominar cuando el riesgo individual producido por alguna de las presas analizadas se encuentra por encima de la recomendación de tolerabilidad para este riesgo (normalmente 10^{-4}). Por este motivo, cuando se aplica este principio, la priorización suele realizarse en dos etapas: una primera etapa donde se aplican las medidas que reducen la probabilidad de fallo por debajo de la recomendación fijada y una segunda donde se aplica únicamente el principio de eficiencia.

En caso de hacer equivalente el riesgo individual y la probabilidad de fallo, este principio prioriza las medidas que reducen esta probabilidad. Esta disminución puede realizarse reduciendo las cargas sobre la presa mediante la mejora de compuertas, la implantación de resguardos... o mejorando la respuesta de las presas antes estas cargas. En cambio, este principio no prioriza las medidas que únicamente disminuyen las consecuencias, como los Planes de Emergencia y los programas de formación a la población.

3.3 Indicadores de riesgo para la priorización de medidas

3.3.1 Introducción

Los indicadores de riesgo permiten analizar matemáticamente los resultados de riesgo para cada medida. Estos indicadores se obtienen a partir del efecto de la medida sobre el riesgo en la presa y sus costes de implantación y mantenimiento. Cada indicador está basado en uno o varios principios de priorización, por lo que el indicador utilizado como criterio de priorización muestra que principios se están siguiendo. El resultado del indicador de cada medida es utilizado como criterio de priorización para elegir una medida en cada paso de implementación, tal y como se muestra en la Figura 11.

En general, en la gestión habitual de actuaciones para un conjunto de presas se combinan los principios de eficiencia y equidad, por lo que es conveniente utilizar diferentes indicadores para tener en cuenta ambos principios.

Los indicadores presentados a continuación provienen principalmente de la tesis doctoral del Dr. Serrano-Lombillo [24] y del ANCOLD para la gestión de medidas en presas [1]. En este documento, se ha realizado una labor de recopilación de estos indicadores y se han ordenado y homogeneizado para relacionarlos con los principios de reducción de riesgo y poder utilizarlos en la priorización de medidas.

3.3.2 Cost per Statistical Life Saved (CSLS)

Este indicador [1] se traduce como el coste por vida estadística salvada, e indica cuánto cuesta evitar cada pérdida de vida por fallo de la presa al aplicar cada medida. Cuando más bajo es el valor de este indicador más conveniente es la medida. Su valor se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$CSLS = \frac{C_a}{r_v(CB) - r_v(MED)} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde $C_a (MED)$ es el coste anualizado de la medida e incluye sus costes de implantación anualizados a lo largo de la vida útil, los costes de mantenimiento anual y los posibles cambios en los costes de operación de la presa que supone la implantación de esta medida.

El CSLS representa costes respecto a reducción del riesgo social, por lo que el valor mínimo de este indicador representa qué medida emplea los recursos disponibles de forma más eficaz. Por lo tanto, este indicador representa el principio de eficiencia social. Además de la seguridad de presas [1], este indicador es utilizado para la priorización de medidas de reducción de riesgo en otros campos como la industria aeronáutica [29], la medicina [19], la contaminación de suelos [18] y la seguridad vial [8].

3.3.3 Adjusted Cost per Statistical Life Saved (ACSLs)

Este indicador (coste ajustado por vida estadística salvada) [1] tiene la misma estructura que el CSLs pero introduce un ajuste sobre el coste anualizado para considerar la reducción que la implementación de la medida tiene sobre el riesgo económico. Se calcula a partir de la Ecuación 7.

$$ACSLs = \frac{C_a - (r_\epsilon(CB) - r_\epsilon(MED))}{r_v(CB) - r_v(MED)} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde $r_\epsilon(CB)$ es el riesgo económico de la presa en el caso base y $r_\epsilon(MED)$ es el riesgo económico al implantar la medida.

Como en el caso anterior, representa el principio de eficiencia, aunque para costes ajustados, por lo que tiene en cuenta la eficiencia social y la económica. Tanto este indicador como el CSLs son utilizados por diversos organismos para la priorización de medidas de reducción de riesgo [1] [2].

El ACSLS también es utilizado para aplicar el criterio ALARP [3], indicando cuando la aplicación de una medida no es eficiente si ya se cumplen las recomendaciones de tolerabilidad. Esta evaluación se realiza comparando el valor obtenido para el ACSLS con el valor de una pérdida de vida en la zona de estudio (en inglés, Value Per Fatality (VPF)). La división entre este el ACSLS y el VPF se denomina razón de desproporcionalidad (R).

Tras estimar el valor económico de una pérdida de vida (VPF), el ANCOLD [1], establece la justificación de una medida para presas justo por debajo de las recomendaciones de tolerabilidad a partir de los siguientes valores del ACSLS:

- Entre 0 y 5 MA\$ la medida se encuentra muy fuertemente justificada.
- Entre 5 y 20 MA\$ la medida se encuentra fuertemente justificada.
- Entre 20 y 100 MA\$ la medida se encuentra moderadamente justificada.
- Más de 100 MA\$ la medida está pobremente justificada.

Con el fin de poder aplicar estos valores en España, estos límites han sido traducidos a millones de euros y han sido actualizados a valor presente a través del IPC en España [15], obteniendo los siguientes valores de referencia para el CSLs:

- Entre 0 y 5.1 M€ la medida se encuentra muy fuertemente justificada.
- Entre 5.1 y 20.5 M€ la medida se encuentra fuertemente justificada.
- Entre 20.5 y 102.4 M€ la medida se encuentra moderadamente justificada.
- Más de 102.4 M€ la medida está pobremente justificada.

En algunos casos, puede ocurrir que el coste anualizado sea menor que la reducción producida sobre el riesgo económico, obteniendo por lo tanto un ACSLS negativo. En estos casos, se considera que la medida es rentable por sí sola sin tener en cuenta la reducción del riesgo social [3]. En este documento, cuando esto ocurre y con el único

fin de poder priorizar medidas, se ha modificado este indicador, perdiendo su significado como coste. El ACSLS ha pasado a calcularse multiplicando por la reducción del riesgo social según la siguiente fórmula:

$$ACSLS = (C_a - (r_\epsilon(CB) - r_\epsilon(MED))) \cdot (r_v(CB) - r_v(MED)) \quad \text{con ACSLS} < 0 \quad \text{Ecuación 8}$$

3.3.4 Social Risk Decrease Index (SRDI)

Este indicador permite elegir en cada paso la medida que produce una mayor disminución del riesgo social. El nombre y la estructura de este indicador se han definido en este documento para homogeneizar con el resto de indicadores, siendo mejor cuando menor es el valor de este indicador. Este indicador se calcula con la siguiente ecuación:

$$SRDI = \frac{1}{r_v(CB) - r_v(MED)} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde $r_v(CB)$ es el riesgo en vidas de la presa en el caso base y $r_v(MED)$ es el riesgo en vidas al implantar la medida.

En cierta medida, este criterio tiene en cuenta la eficiencia social, ya que en cada paso busca reducir lo máximo el riesgo social, aunque no tiene en cuenta el coste de la medida.

Al definir la secuencia de implementación de medidas, en cada paso se elige la medida con un valor mínimo de este indicador, y que por lo tanto, produce la mayor disminución del riesgo social.

3.3.5 Failure Probability Decrease Index (FPDI)

Este indicador permite elegir en cada paso la medida que produce una mayor disminución en la probabilidad de rotura de la presa. Por lo tanto, es un criterio basado únicamente en el principio de equidad, ya que su objetivo es disminuir lo máximo posible el riesgo individual, que en grandes presas, suele ser equivalente a la probabilidad de fallo.

Como en el caso anterior, el nombre y la estructura de este indicador se han definido para homogeneizar con el resto de indicadores, siendo mejor cuando menor es el valor de este indicador. Este indicador se calcula con la siguiente fórmula:

$$FPDI = \frac{1}{p_f(CB) - p_f(MED)} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde $p_f(CB)$ es la probabilidad de fallo de la presa en el caso base y $p_f(MED)$ es la probabilidad de fallo al implantar la medida.

Al definir la secuencia de implementación de medidas, en cada paso se elige la medida con un valor mínimo de este indicador, y que por lo tanto, produce la mayor disminución de la probabilidad de fallo.

3.3.6 Cost per Statistical Failure Prevented (CSFP)

Este indicador [24] se traduce como el coste por fallo estadístico prevenido, e indica cuánto cuesta evitar el fallo de la presa con cada medida. Cuando más bajo es el valor de este indicador más conveniente es la medida. Este indicador se calcula con la Ecuación 11.

$$CSFP = \frac{C_a}{p_f(CB) - p_f(MED)} \quad \text{Ecuación 11}$$

Este indicador combina costes con probabilidad de fallo, por lo que tiene en cuenta los principios de eficiencia social y equidad, especialmente este último. Por este motivo, en la bibliografía [24], se recomienda aplicar este indicador en dos etapas:

- En la primera etapa, si la probabilidad de fallo de algunas presas se encuentra por encima de un determinado umbral (en general, 10^{-4}), la priorización se realiza únicamente para las medidas que reducen la probabilidad de fallo de estas presas. En cada paso, se elige la medida con un valor más bajo del indicador CSFP. En esta primera etapa predomina la equidad, aunque también se tiene en cuenta la eficiencia al introducir el coste de la medida en la fórmula.
- En la segunda etapa, cuando la probabilidad de fallo se encuentra por debajo del umbral definido, se prioriza con todas las medidas disponibles a partir del criterio ACSLS. Por lo tanto, únicamente se tiene en cuenta el principio de eficiencia.

3.3.7 Adjusted Cost per Statistical Failure Prevented (ACSFP)

Este indicador (coste ajustado por fallo estadístico prevenido) [24] tiene la misma estructura que el CSFP pero introduce un ajuste sobre el coste anualizado para considerar la reducción que la implementación de la medida tiene sobre el riesgo económico. Se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$ACSFP = \frac{C_a - (r_\epsilon(CB) - r_\epsilon(MED))}{p_f(CB) - p_f(MED)} \quad \text{Ecuación 12}$$

Este indicador tiene en cuenta los principios de eficiencia (tanto social como económica) y equidad, especialmente este último. Además, también se recomienda su aplicación en dos etapas [24], una primera basada en equidad y otra centrada en eficiencia.

Como con el ACSLS, en algunos casos, puede ocurrir que el coste anualizado sea menor que la reducción producida sobre el riesgo económico, obteniendo por lo tanto un ACSFP negativo. En este documento, cuando esto ocurre y con el único fin de poder priorizar medidas, se ha modificado este indicador, perdiendo su significado como coste. El ACSFP ha pasado a calcularse multiplicando por la reducción del riesgo social según la siguiente fórmula:

$$ACSFP = (C_a - (r_\epsilon(CB) - r_\epsilon(MED))) \cdot (p_f(CB) - p_f(MED)) \quad \text{con } ACSFP < 0 \quad \text{Ecuación 13}$$

En estos casos, este resultado se utiliza únicamente a efectos de priorizar medidas, pero el ACSFP pierde su significado como coste.

3.3.8 Economical Risk Decrease Index (ERDI)

Este indicador permite elegir en cada paso la medida que produce una mayor disminución del riesgo económico. El nombre y la estructura de este indicador se han definido en este documento para homogeneizar con el resto de indicadores, siendo mejor cuando menor es el valor de este indicador. Este indicador se calcula con la siguiente ecuación:

$$ERDI = \frac{1}{r_\epsilon(CB) - r_\epsilon(MED)} \quad \text{Ecuación 14}$$

En cierta medida, este criterio tiene en cuenta la eficiencia económica, ya que en cada paso busca reducir lo máximo el riesgo económico, aunque no tiene en cuenta el coste de la medida.

3.3.9 Cost-Benefit Ratio (CBR)

Este indicador permite elegir en cada paso la medida cuyos costes son más bajos respecto a los beneficios que supone su implantación por la reducción del riesgo económico producida. Por este motivo, este indicador elige en cada paso la medida que es más eficiente económicamente. Este indicador se calcula con la siguiente ecuación:

$$CBR = \frac{C_a}{r_\epsilon(CB) - r_\epsilon(MED)} \quad \text{Ecuación 15}$$

Normalmente este indicador se define como beneficios dividido por coste [3], pero en este caso se ha modificado para su homogeneización con el resto de indicadores, siendo mejor cuanto más bajo es su valor.

3.3.10 Equity Weighted Adjusted Cost per Statistical Life Saved (EWACSLs)

El EWACSLs ha sido desarrollado [24] para poder combinar de una forma flexible los principios de eficiencia y equidad en un solo indicador. Como su nombre indica, se calcula a partir del ACSLS corrigiéndolo para tener en cuenta el criterio de equidad. Este indicador se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$EWACSLs = \frac{ACSLs}{\left(\frac{\max(p_f(CB), 10^{-4})}{\max(p_f(MED), 10^{-4})} \right)^n} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde n es un parámetro que permite dar más importancia a la eficiencia o a la equidad en la priorización. Si el valor de n es muy alto, el principio de priorización

predominante es la equidad mientras que si es muy bajo predomina la eficiencia. El indicador EWACSLs, tiene unidades económicas como el ACSLS.

Además, si la probabilidad de fallo de la presa es menor a 10^{-4} , el único principio predominante es la eficiencia (a través del ACSLS), ya que el denominador de la fórmula es igual a 1. De esta forma, se produce de forma directa el funcionamiento en dos etapas que se suele forzar al aplicar el ACSFP y el CSFP.

En los casos que se obtiene un ACSLS negativo y con el único fin de poder priorizar entre estas medidas, el EWACSLs se calcula multiplicando por el factor de equidad según la siguiente fórmula:

$$EWACSLs = ACSLS \cdot \left(\frac{\max(p_f(CB), 10^{-4})}{\max(p_f(MED), 10^{-4})} \right)^n \quad \text{con } ACSLS < 0 \quad \text{Ecuación 17}$$

En estos casos, como con el ACSLS, este resultado se utiliza a efectos de priorizar medidas, pero el EWACSLs pierde su significado como coste.

Al definir la secuencia de implementación de medidas, en cada paso se elige la medida con un valor mínimo de este indicador, y que por lo tanto, produce la mayor disminución del riesgo social.

3.3.11 Resumen

| Nombre | Fórmula | Principios | Fuente |
|---------|---|--|--------|
| CSLS | $\frac{C_a}{r_v(CB) - r_v(MED)}$ | Eficiencia social | [1] |
| ACSLs | $\frac{C_a - (r_\epsilon(CB) - r_\epsilon(MED))}{r_v(CB) - r_v(MED)}$ | Eficiencia social y económica | [1] |
| SRDI | $\frac{1}{r_v(CB) - r_v(MED)}$ | Eficiencia social | - |
| FPDI | $\frac{1}{p_f(CB) - p_f(MED)}$ | Equidad | - |
| CSFP | $\frac{C_a}{p_f(CB) - p_f(MED)}$ | Equidad | [24] |
| ACSFP | $\frac{C_a - (r_\epsilon(CB) - r_\epsilon(MED))}{p_f(CB) - p_f(MED)}$ | Equidad, Eficiencia económica | [24] |
| ERDI | $\frac{1}{r_\epsilon(CB) - r_\epsilon(MED)}$ | Eficiencia económica | - |
| CBR | $\frac{C_a}{r_\epsilon(CB) - r_\epsilon(MED)}$ | Eficiencia económica | [3] |
| EWACSLs | $\frac{ACSLs}{\left(\frac{\max(p_f(CB), 10^{-4})}{\max(p_f(MED), 10^{-4})}\right)^n}$ | Equidad, Eficiencia social y económica | [24] |

Tabla 1: Resumen de indicadores de riesgo.

3.4 Gráficos de variación del riesgo

Los gráficos de variación son una representación de los resultados obtenidos cuando se define una secuencia de implementación de medidas. En estos gráficos se muestra como varía el riesgo o la probabilidad de fallo en función del número de medidas implantadas o del coste de estas medidas. En la Figura 12 se presenta un ejemplo de este tipo de curvas.

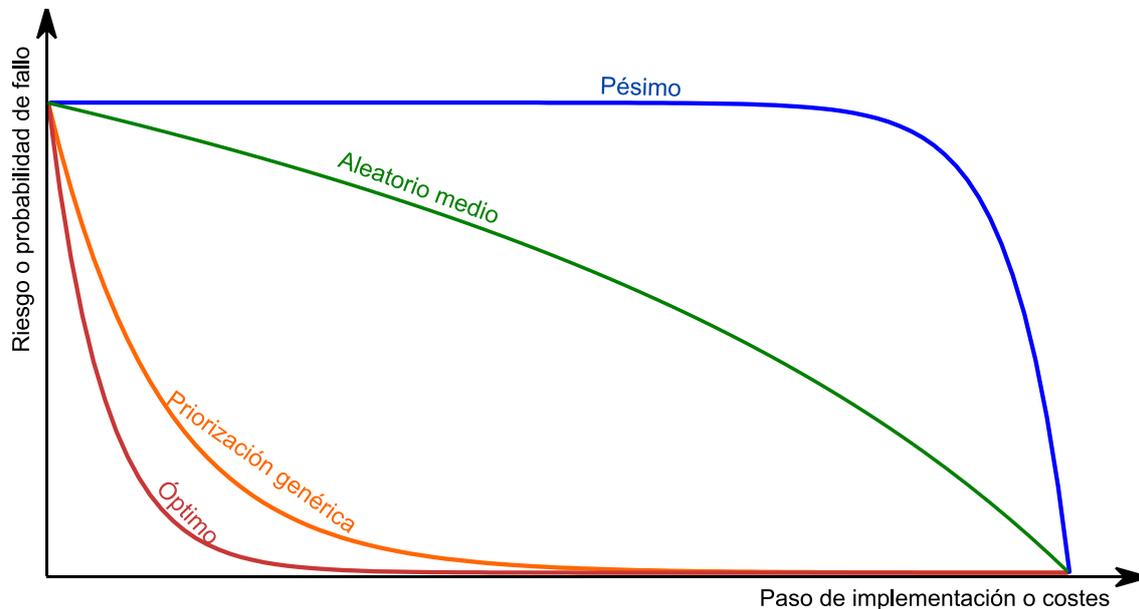


Figura 12: Representación genérica de un gráfico de variación representando cuatro casos diferentes de priorización.

En esta figura, cada línea representa la variación de riesgo en un caso de priorización diferente. En este tipo de gráficos, la mejor priorización es la que antes se aproxime al eje X, es decir, la que produzca una disminución del riesgo o la probabilidad con un menor coste o un menor número de medidas implantadas. En la Figura 12 se representan cuatro casos diferentes:

- **Priorización genérica:** Representa una forma común que suelen tener las secuencias de implementación de medidas obtenidas al aplicar un indicador de riesgo cuando son representadas en este tipo de gráficos.
- **Óptimo:** Según los ejes definidos en el gráfico de variación, existe un indicador de riesgo que produce la secuencia de implementación de medidas óptima para este gráfico. Esta secuencia es la que produce una mayor disminución del riesgo o la probabilidad de fallo con un menor coste o número de pasos. En la Tabla 2 se define que indicador produce la secuencia óptima para cada tipo de gráfico de variación. Como se muestra en esta tabla, cada indicador produce la secuencia óptima en un tipo de gráfico de variación.

| EJE X | EJE Y | Indicador óptimo |
|--|-----------------------|------------------|
| Paso de implementación | Probabilidad de fallo | FPDI |
| | Riesgo social | SRDI |
| | Riesgo económico | ERDI |
| Coste de medidas anualizado | Probabilidad de fallo | CSFP |
| | Riesgo social | CSLS |
| | Riesgo económico | CBR |
| Coste de medidas anualizado y ajustado | Probabilidad de fallo | ACSPF |
| | Riesgo social | ACSL |

Tabla 2: Indicador que produce la secuencia óptima de implementación de medidas según los ejes del gráfico de variación.

- **Pésimo:** Esta es la forma habitual que tienen las curvas en este tipo de gráficos cuando al definir la secuencia de priorización se elige la medida con un valor más alto del indicador de riesgo óptimo, es decir, la menos adecuada según este indicador. Entre esta curva y la curva óptima se encuentran los gráficos de variación de todas las posibles secuencias de implementación de medidas.
- **Aleatorio medio:** Esta curva representa la curva promedio habitual de estas curvas de variación cuando no se sigue ningún indicador de riesgo para definir la secuencia de implementación de medidas, sino que la medida se elige en cada caso de forma aleatoria.

Cabe destacar que todas las curvas tienen el mismo punto de inicio (situación actual del grupo de presas) y el mismo punto final (situación de todas las presas al implantar todas las medidas de reducción de riesgo propuestas), ya que no se está decidiendo qué medidas implantar sino su orden. Tan solo aparecen algunas pequeñas diferencias en el punto final cuando se utilizan restricciones en la priorización, como se muestra en el Apartado 4.4.

3.5 Análisis de la bondad de la priorización

La bondad de una determinada secuencia de implementación de medidas en un grupo de presas varía según el principio de priorización con el que se compare. Una secuencia muy adecuada desde el punto de vista de la eficiencia puede no serlo desde el punto de vista de la equidad. En general, una secuencia será mejor que otra si reduce el riesgo más rápido (en un menor número de pasos, con un menor coste o en un menor tiempo). A continuación se analiza cómo se han obtenido los índices de bondad para los principios propuestos.

- **Equidad:** La secuencia óptima según este principio la define la que produce una mayor disminución de la probabilidad de fallo con un menor coste de implantación de medidas. Por este motivo, se ha planteado el siguiente índice de bondad:

$$IB_{EQ} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \Delta C(i) \cdot (\log(p_f(i)) - \log(p_f(fin)))}{C_T \cdot (\log(p_f(ini)) - \log(p_f(fin)))} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde N es el número de pasos de la secuencia, $p_f(i)$ es la probabilidad de fallo para el paso i de la secuencia de implementación, $p_f(ini)$ es la probabilidad de fallo inicial, $p_f(fin)$ es la probabilidad de fallo del último punto de la secuencia, $\Delta C(i)$ es el aumento en el coste anualizado producido al implantar la medida i y C_T es el coste anualizado total de implantar todas las medidas.

Si las primeras medida de la secuencia tienen un coste 0 y producen que la probabilidad de fallo alcance la probabilidad final, el numerador es igual a 0, por lo que el índice de bondad vale 1. En cambio, si la probabilidad de fallo es igual a la inicial para todo el coste de las medidas, el denominador y el numerador son iguales, por lo que el índice de bondad vale 0.

Las diferencias de la secuencia respecto a la probabilidad de fallo final se toman a partir de los logaritmos. Si no se utilizan logaritmos, predominaría en el índice de bondad la zona inicial con riesgos más altos y el resto de la secuencia tendría muy poca influencia sobre el índice de bondad, aunque la probabilidad de fallo se reduzca varios órdenes de magnitud en esta parte de la secuencia.

- **Eficiencia social:** La secuencia óptima según este principio la define la que produce una mayor disminución del riesgo social con un menor coste. Por este motivo, se ha planteado el siguiente índice de bondad:

$$IB_{EFS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \Delta C(i) \cdot (\log(r_v(i)) - \log(r_v(fin)))}{C_T \cdot (\log(r_v(ini)) - \log(r_v(fin)))} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde N es el número de pasos de la secuencia, $r_v(i)$ es el riesgo social para el paso i de la secuencia de implementación, $r_v(ini)$ es el riesgo social inicial y $r_v(fin)$ es el riesgo social del último punto de la secuencia.

Si las primeras medida de la secuencia tienen un coste 0 y producen que el riesgo alcance el riesgo final, el numerador es igual a 0, por lo que el índice de bondad vale 1. En cambio, si el riesgo social es igual al inicial para todo el coste de las medidas, el denominador y el numerador son iguales, por lo que el índice de bondad vale 0.

Las diferencias de la secuencia respecto al riesgo social final se toman también en este caso a partir de los logaritmos.

- Eficiencia económica: La secuencia óptima según este principio la define la que produce una mayor disminución del riesgo económico con un menor coste. El índice de bondad planteado es equivalente al planteado para la eficiencia social pero sustituyendo el riesgo social por riesgo económico:

$$IB_{EFE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \Delta C(i) \cdot (\log(r_{\epsilon}(i)) - \log(r_{\epsilon}(fin)))}{C_T \cdot (\log(r_{\epsilon}(ini)) - \log(r_{\epsilon}(fin)))}$$

Ecuación 20

Donde N es el número de pasos de la secuencia, $r_{\epsilon}(i)$ es el riesgo económico para el paso i de la secuencia de implementación, $r_{\epsilon}(ini)$ es el riesgo económico inicial, $r_{\epsilon}(fin)$ es el riesgo económico del último punto de la secuencia.

El significado de los índices de bondad planteados puede ser interpretado utilizando gráficos de variación, a partir de las áreas definidas en la Figura 13.

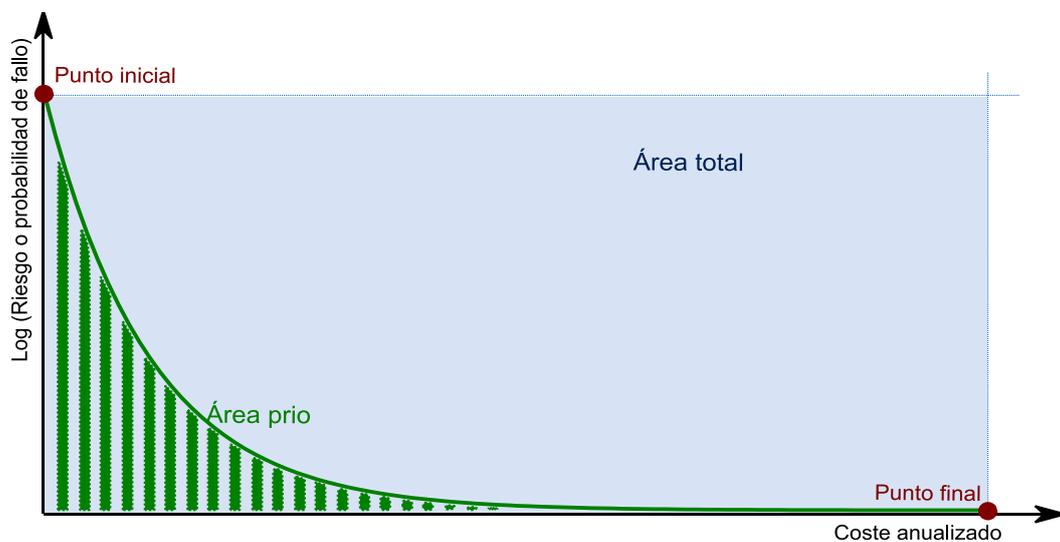


Figura 13: Definición de áreas en los gráficos de variación para definir el índice de bondad.

El numerador de los índices planteados es igual al área bajo la curva mostrada en la figura anterior (Área prio) y el denominador es igual al área total del rectángulo definido por el punto inicial y el punto final de las secuencias de medidas. De esta forma, los índices de bondad planteados son igual a:

$$IB = \left(1 - \frac{A_{prio}}{A_{total}}\right)$$

Ecuación 21

El valor de este índice es 0 cuando el área bajo la curva de variación es igual al área total y es de 1 cuando esta área es 0.

Para cada principio analizado, se utilizan unas variables diferentes en los ejes del gráfico de variación que permite esta interpretación gráfica de los índices de bondad:

- **Equidad:** En este caso, el gráfico que permite esta interpretación gráfica es el que representa en el eje X el coste anualizado y en el eje Y la probabilidad de fallo. En el resto del documento se denomina a este gráfico, gráfico de variación de la equidad. Como se muestra en la Tabla 2, el indicador que produce una secuencia óptima en este gráfico es el CSFP, por lo que la secuencia definida por este indicador será la que tenga un índice de bondad de equidad más elevado.
- **Eficiencia social:** El gráfico que permite esta interpretación gráfica es el que representa en el eje X el coste anualizado y en el eje Y el riesgo social. En el resto del documento se denomina a este gráfico, gráfico de variación de la eficiencia social. Como se muestra en la Tabla 2, el indicador que produce una secuencia óptima en este gráfico es el CSLS, por lo que la secuencia definida por este indicador será la que tenga un índice de bondad de eficiencia social más elevado.
- **Eficiencia económica:** Por último, el gráfico de variación de la eficiencia económica es el que representa en el eje X el coste anualizado y en el eje Y el riesgo económico. Como se muestra en la Tabla 2, el indicador que produce una secuencia óptima en este gráfico es el CBR, por lo que la secuencia definida por este indicador será la que tenga un índice de bondad de eficiencia económica más elevado.

3.6 La influencia del factor tiempo en la priorización de medidas

Una secuencia de implementación de medidas en un conjunto de presas puede variar enormemente cuando es llevada a la práctica al tener en cuenta el tiempo por algunos de los siguientes motivos:

- Plazos de implantación: Por este plazo se entiende la diferencia de tiempo entre que el organismo gestor decide que una medida es necesaria hasta que esta medida está completamente implantada. Este plazo está influenciado por diversos aspectos:
 - Aspectos administrativos: Este plazo puede estar determinado por el tiempo necesario para realizar diversos procedimientos como reunir el dinero necesario para la medida, encontrar y contratar una empresa que construya o implemente la medida si es necesario, solicitud y aprobación de permisos necesarios, etc.
 - Aspectos técnicos: Cada medida requiere unos ciertos plazos de obtención de materiales y maquinaria y procedimientos de construcción que debe ser tenido en cuenta. Estos aspectos son especialmente determinantes en muchas medidas estructurales.
 - Aspectos sociales: Por un lado, algunas medidas de reducción de riesgo que pueden ser socialmente polémicas pueden requerir más tiempo para comunicar sus ventajas a la población y discutir sus inconvenientes. Además, en medidas relacionadas con la formación a la población, debe tenerse en cuenta el tiempo necesario para conseguir que la población se encuentre formada adecuadamente y no solo el tiempo de construcción de las instalaciones necesarias. También hay que considerar los plazos necesarios para los procesos de participación pública.
 - Aspectos económicos: El valor del dinero va variando a lo largo del tiempo, lo que puede influenciar la secuencia de implementación de medidas óptima. Aspectos como la tasa de descuento, la inflación y el plazo de amortización tienen efecto sobre cómo las medidas son implantadas.
- Presupuesto máximo: Normalmente, el organismo gestor tiene unos recursos limitados repartidos a lo largo del tiempo para medidas que mejoren la seguridad de las presas, por ejemplo mediante un presupuesto anual. Este es un condicionante muy importante para definir una secuencia de implementación de medidas a lo largo del tiempo, ya que el coste de las medidas implantadas está limitado por este aspecto.
- Situaciones con riesgos muy altos: En estos casos, la urgencia para implementar las medidas puede ser primordial, por lo que los procedimientos de emergencia condicionan cómo las medidas deben ser implementadas a lo largo del tiempo.
- Otros motivos que pueden determinar la gestión de las medidas.

Por lo tanto, una medida que puede ser la idónea desde el punto de vista únicamente de los indicadores de riesgo, puede no serlo si se tiene en cuenta otros aspectos como su plazo de implantación.

Del procedimiento de priorización de medidas a lo largo del tiempo se deriva otro factor que puede determinar la secuencia de implementación: el horizonte de decisión. Este tiempo es el plazo de tiempo para el que se quiere minimizar el riesgo. Por ejemplo, si se analiza una situación de emergencia este horizonte de decisión es muy corto (horas), mientras que en la gestión del riesgo de una gran presa, este tiempo puede ser mucho mayor (años). En muchos casos, este tiempo puede estar determinado por aspectos administrativos, como años horizonte de un plan hidrológico, planes directores o legislaturas. Cuando se define este tiempo, debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Horizontes de decisión cortos llevan a peores situaciones a largo plazo, ya que se decide qué medidas implantar en un período corto sin buscar el riesgo más bajo como resultado final.
- Además, horizontes de decisión cortos llevan a desechar medidas que requieren un mayor plazo de implantación pero pueden ser muy beneficiosas para la seguridad de la presa.
- Por otro lado, horizontes de decisión largos conllevan una mayor incertidumbre asociada la situación de las presas, ya que no se sabe qué puede ocurrir en el futuro.
- Utilizar un horizonte de decisión largo supone una mayor complejidad de los cálculos, ya que existe un mayor número de combinaciones de medidas que pueden ser implementadas en este período.
- Por último, si se quiere realizar una gestión de forma continua de la seguridad de las presas, es necesario revisar los modelos de riesgo con cierta periodicidad, por lo que horizontes de decisión largos pueden llevar a tomar decisiones respecto a modelos de riesgo desactualizados.

Cada horizonte de decisión produce una secuencia diferente de implementación de medidas. Los gráficos de variación de riesgo producidos por estas secuencias suelen cruzarse entre ellos a lo largo del tiempo para diferentes horizontes de decisión, tal y como se muestra en la Figura 14. En general, este hecho es debido a que cada secuencia minimiza el riesgo para un determinado momento, por lo que tiene el mínimo riesgo en ese momento, aunque en un período posterior puede haber otra secuencia que produzca un mínimo riesgo, obteniendo un cruce en el gráfico de variación. Por lo tanto, el horizonte de decisión requiere una discusión previa, ya que tiene una gran influencia en los resultados obtenidos, produciendo diferentes secuencias de implementación de medidas y distintos gráficos de variación que se van cortando a lo largo del tiempo.

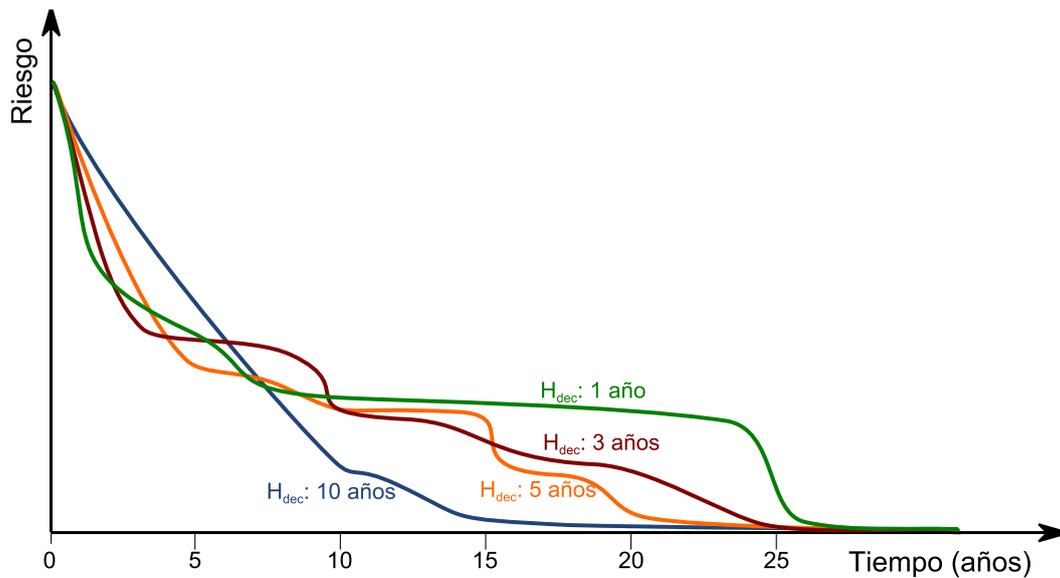


Figura 14: Ejemplo de gráficos de variación de riesgo a lo largo del tiempo para diferentes horizontes de decisión.

En un caso real, los resultados obtenidos y la elección de medidas son procesos más complejos, siendo este horizonte de decisión uno de los elementos que más deben discutirse cuando se realiza este tipo de análisis. En general, es recomendable analizar las secuencias obtenidas con diferentes horizontes de decisión para elegir este tiempo correctamente. Por supuesto, también hay que tener en cuenta los horizontes de decisión reales en el organismo gestor de las presas, para reflejar lo más fielmente posible la realidad. El horizonte de decisión no es un valor puramente numérico como puede ser un intervalo de discretización, sino que debe reflejar cómo se está llevando a cabo la toma de decisiones.

En una situación de emergencia, el horizonte de decisión lo marca el tiempo disponible antes de que se produzca la situación no deseada, ya que no tiene sentido considerar medidas que no puedan evitar esta situación o disminuir sus consecuencias. En general, el tipo de medidas que requieren un menor tiempo y que suelen ser priorizadas en situaciones de emergencia son cambios en la operación de la presa y medidas de preparación de la evacuación de la población aguas abajo [2].

En este trabajo, se presenta una herramienta de partida para definir secuencias de implementación de medidas a lo largo del tiempo basándose en la herramienta de priorización desarrollada. A diferencia de la herramienta de priorización según indicadores de riesgo, la herramienta de priorización en el tiempo se trata de una versión inicial para orientar futuras investigaciones. Debe ser mejorada introduciendo diferentes aspectos que pueden condicionar la implementación de medidas en el tiempo. Además, debe estudiarse cómo evaluar los resultados obtenidos a partir de principios de eficiencia y equidad a lo largo del tiempo. La herramienta de priorización en el tiempo planteada se describe en el Apartado 4.5.

4. HERRAMIENTA DE PRIORIZACIÓN DE MEDIDAS

4.1 Introducción

En este apartado se presenta la estructura de la herramienta desarrollada para realizar la priorización de medidas a partir de indicadores de riesgo. Esta herramienta se ha desarrollado a partir del software iPresas [25] para la elaboración y cálculo de modelos de riesgo. Por este motivo, los cálculos realizados por esta herramienta parten de los modelos de riesgo desarrollados con este software para todas las presas y sistemas cuyas medidas son priorizadas. Los modelos deben haber sido elaborados para calcular el riesgo de la situación actual y de todas las medidas de reducción de riesgo propuestas. A partir de estos modelos, la herramienta desarrollada se compone de dos partes:

- Por un lado, se ha desarrollado una herramienta que permite calcular todas las posibles combinaciones de medidas en cada modelo de riesgo. Esta es la parte de la herramienta que supone mayores tiempos de cálculo.
- Por otro lado, se ha programado una herramienta que permite obtener una priorización de todas las medidas analizadas para el conjunto de presas. Esta secuencia de implementación de medidas se obtiene a partir de todos los cálculos de combinaciones de medidas para cada modelo de riesgo obtenidos con la primera herramienta. Para realizar esta priorización es necesario definir un criterio de priorización a partir de un indicador de riesgo, tal y como se ha mostrado en la Figura 11.

Además, de estas dos herramientas para la realización de estos cálculos puede ser interesante definir algunas restricciones para la priorización, que por ejemplo fuercen a que una medida se implante antes que otra o permitan definir la primera medida de la secuencia. En la Figura 15 se muestra un esquema de todas las diferentes partes de la herramienta desarrollada.

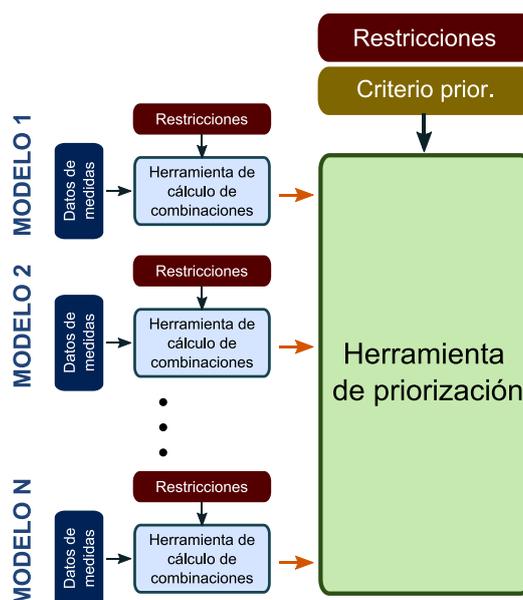


Figura 15: Esquema de la herramienta general para la priorización de medidas.

4.2 Herramienta para el cálculo de combinaciones de medidas

Esta herramienta permite calcular todas las combinaciones de medidas que se encuentran definidas en un modelo de riesgo. Estas combinaciones de medidas proporcionan los datos de riesgos necesarios para la ejecución de la herramienta de priorización de medidas.

Para el desarrollo de esta herramienta se ha adoptado la hipótesis de que cuando dos medidas son implantadas en una presa, el resultado final es el mismo independientemente del orden seguido en la implantación. Es decir, si en una presa por ejemplo se plantea la implantación de resguardos y la mejora de compuertas, el resultado final en la presa es el mismo independientemente de qué medida de las dos se haya implantado antes. Esta hipótesis se cumple en todos los casos analizados, aunque podría haber algún caso en que dos medidas actúen sobre la misma parte de la presa y esta hipótesis no se cumple. En este caso, habría que contemplar un mayor número de combinaciones de medidas, complicando algo el algoritmo de priorización.

A partir de esta hipótesis, el número de combinaciones de medidas que se obtiene es de 2^N , donde N es el número de medidas propuestas en el modelo de riesgo. De esta forma, si en un modelo de riesgo se plantean 4 medidas, el número de combinaciones es de 16, tal y como se muestra en la Figura 16.

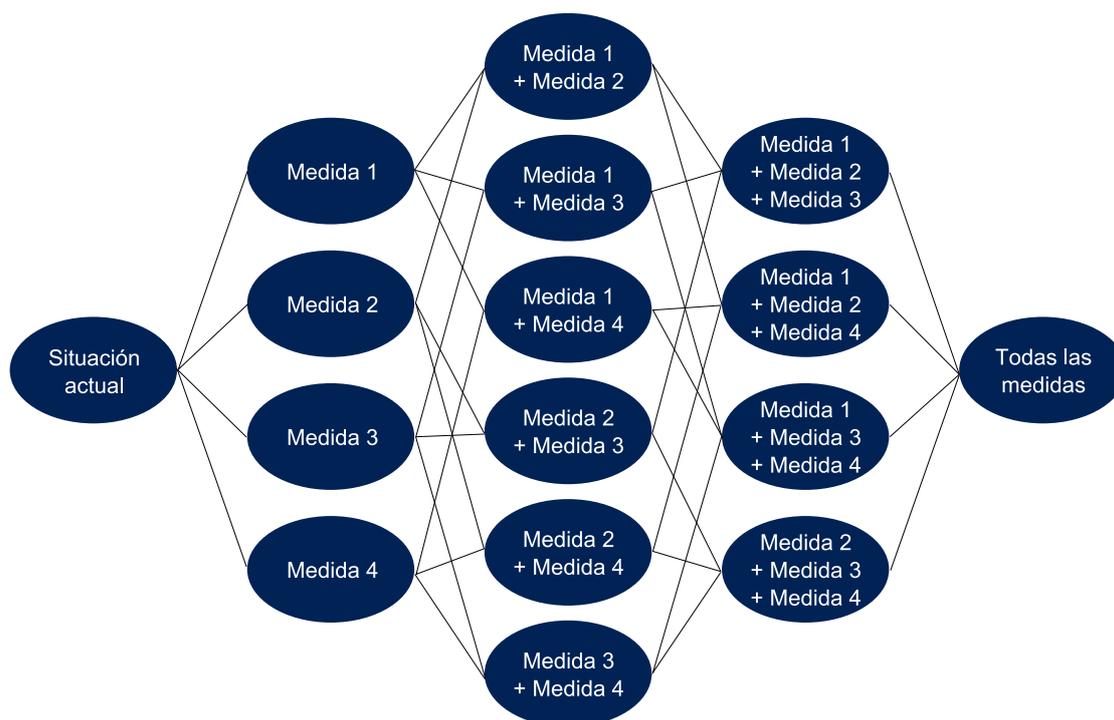


Figura 16: Combinaciones de medidas para un modelo de riesgo con cuatro medidas.

Cada una de estas combinaciones de medidas supone el cálculo del modelo de riesgo, con estas medidas implantadas. Por ello, esta es la parte de la herramienta que requiere unos mayores tiempos de cálculo. Estos tiempos dependen de la complejidad

del modelo de riesgo y por lo tanto, del tiempo necesario para su cálculo. Este tiempo puede variar desde unos pocos segundos a varios días.

Como se explica en el Apartado 2.3 un modelo de riesgo puede representar una presa o un sistema de presas, permitiendo en este último caso analizar el efecto de las medidas en una presa sobre el resto de presas del sistema [26]. En el caso de tener un sistema de presas, el tiempo de cálculo de las combinaciones de medidas suele ser mayor, por el mayor número de medidas (ya que se analizan en el modelo las combinaciones de medidas de todas las presas del sistema) y por los mayores tiempos de cálculo del modelo de riesgo (ya que un modelo de sistema suele ser más complejo que el de una presa individual).

En cualquier caso, el cálculo de combinaciones solo es necesario realizarlo una vez para las medidas propuestas en cada modelo de riesgo. A partir de estos cálculos, es posible realizar todas las priorizaciones de medidas deseadas, modificando los criterios de priorización y las restricciones, sin tener que volver a realizar el cálculo de combinaciones de medidas. El hecho de realizar antes todos los cálculos de riesgo hace que la herramienta sea más versátil y rápida para priorizar según diferentes criterios.

En el Anejo 1 se encuentra el algoritmo empleado para el cálculo de combinaciones de medidas en un modelo de riesgo. Este algoritmo se encuentra programado en Python 2.7 [23] y se basa en la utilización de un software de diseño de modelos de riesgo y cálculo de riesgo denominado iPresas [25]. El complemento a este software desarrollado obtiene un listado de las combinaciones de medidas que se van a calcular, y para cada una de ellas modifica las variables del modelo de riesgo para introducir el efecto de cada medida. A continuación, ejecuta este software y obtiene los resultados del modelo de riesgo, generando un archivo de resultados para cada combinación de medidas.

Cada medida modifica una variable del modelo de riesgo. Los efectos de cada medida sobre todos los nodos del modelo de riesgo se hacen depender de esta variable. Estas variables tienen un valor para la situación actual y otro para la implantación de la medida. Se elige un valor u otro según la medida se encuentre en la combinación de medidas o no. En la Figura 17 se encuentra un ejemplo de cómo se define el valor de estas variables.

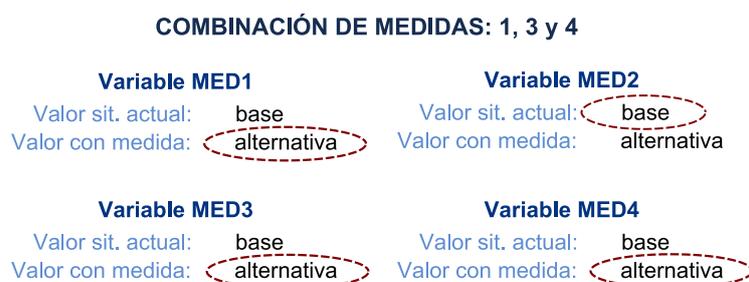


Figura 17: Ejemplo de elección de valores de variables para un modelo con cuatro medidas.

Esta parte de la herramienta se ha integrado dentro de la interfaz gráfica del software iPresas, permitiendo que una vez se encuentra definido el modelo de riesgo y sus variables, pueda realizarse de forma automática el cálculo de combinaciones de medidas. En la Figura 18 se muestra la interfaz gráfica de este software con un modelo de riesgo y en la Figura 19 se muestra la opción del menú de análisis que permite calcular de forma automática estas combinaciones de medidas.

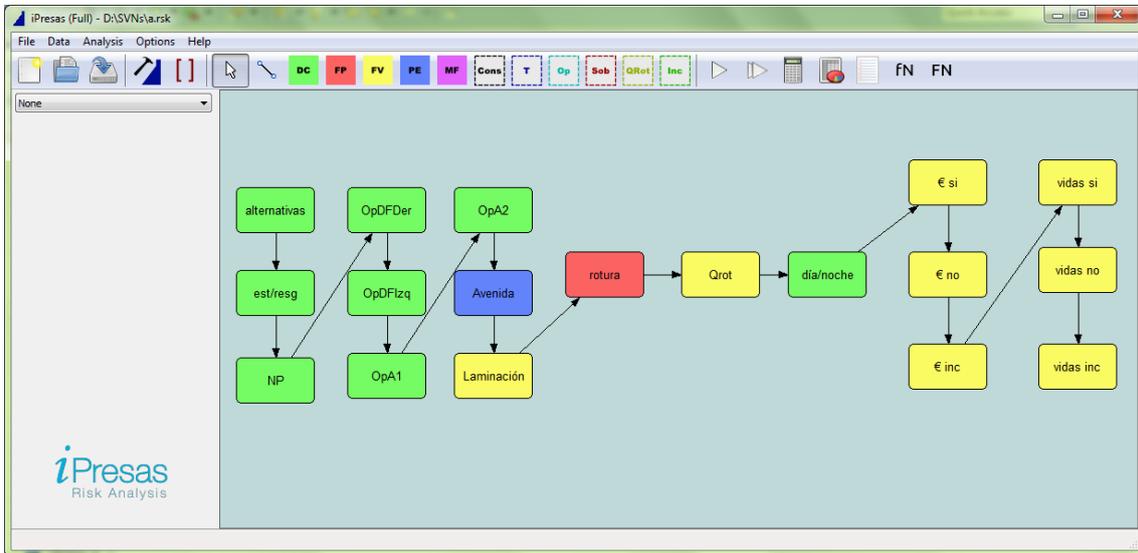


Figura 18: Interfaz gráfica del software iPresas con el módulo de cálculo de combinaciones.

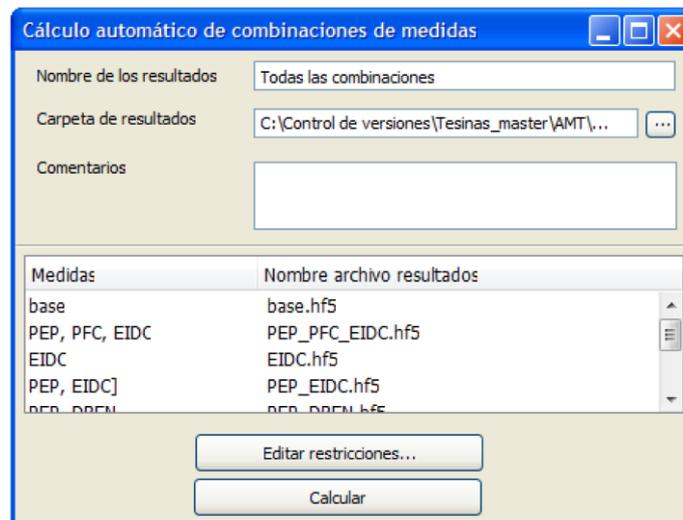


Figura 19: Diálogo del software iPresas que permite el cálculo automático de combinaciones de medidas.

4.3 Herramienta para establecer la priorización de medidas

Esta es la parte principal de la herramienta de gestión de actuaciones en seguridad de presas y permite definir una secuencia de implementación de medidas en un conjunto de presas a partir de los resultados de riesgo obtenidos con la herramienta explicada en el apartado anterior.

El primer paso para realizar esta secuencia es definir un criterio de priorización que permita elegir en cada paso la medida a implantar. Este criterio de priorización consiste en minimizar alguno de los indicadores de riesgo presentados en el Apartado 3.3 y que están basados en principios de priorización de medidas. Según el indicador de riesgo elegido como criterio, la priorización se realizará teniendo más en cuenta unos principios u otros.

A partir de este criterio se empieza a definir la secuencia de implementación de medidas. En un primer paso, este criterio se calcula para todas las medidas planteadas, eligiendo la medida con un valor más bajo de este criterio. El siguiente paso de la secuencia se obtiene al estimar el indicador para todas las medidas que aún no han sido elegidas, sabiendo que la situación de partida para el cálculo del indicador en cada presa incluye las medidas ya elegidas en la secuencia. Así, se sigue consecutivamente calculando los indicadores de riesgo para todas las medidas no implantadas en cada paso hasta obtener la secuencia completa de implantación de medidas. Cabe destacar que una vez calculadas todas las combinaciones en la parte anterior de la herramienta, el cálculo de secuencias de priorización es mucho más rápido.

En la Figura 20 se muestra de forma gráfica un ejemplo de aplicación del procedimiento de priorización.

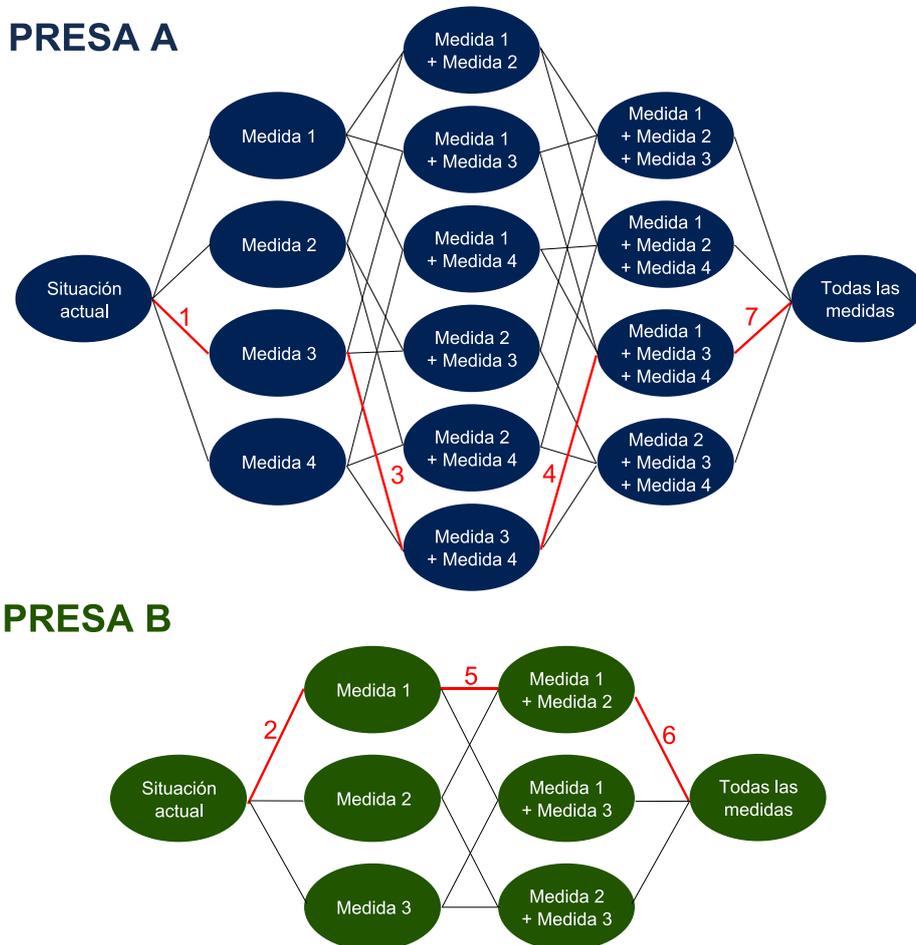
En este ejemplo se quieren priorizar las medidas de reducción de riesgo de dos presas, la presa A con cuatro medidas y la presa B con 3 medidas. En primer lugar, se ha realizado el cálculo de combinaciones, obteniendo 16 archivos de resultados para la presa A y 8 archivos para la presa B.

A continuación, se obtiene el indicador de riesgo seleccionado para las siete medidas posibles a partir de los archivos de resultados de la situación actual de cada presa y los correspondientes a cada una de las medidas. La medida con un menor valor del indicador es la medida 3 de la presa A, que es la primera medida de la secuencia de implementación.

El siguiente paso es calcular de nuevo los indicadores de riesgo para las seis medidas que quedan sin elegir. Para realizar este cálculo con las medidas de la presa A se utiliza como situación base el archivo de riesgo para la medida 3 y como situación con medida el archivo para la medida 3 con la medida analizada. En el segundo paso, la medida con un menor valor del indicador es la medida 1 de la presa B.

De igual forma, el siguiente paso es obtener los indicadores de riesgo para las medidas que quedan sin elegir, sabiendo que ahora la situación de partida para la presa B es con la medida 1 implantada. Siguiendo este procedimiento hasta que todas las medidas han sido elegidas se

obtiene la secuencia de implementación para las siete medidas, tal y como se muestra en la Figura 20.



Opciones en cada paso:

| | | | | | | |
|---|---|--|--|--|--|--|
| Paso 1 A: Medida 1 A: Medida 2 A: Medida 3 A: Medida 4 B: Medida 1 B: Medida 2 B: Medida 3 | Paso 2 A: Medidas 1 y 3 A: Medidas 2 y 3 A: Medidas 4 y 3 B: Medida 1 B: Medida 2 B: Medida 3 | Paso 3 A: Medidas 1 y 3 A: Medidas 2 y 3 A: Medidas 4 y 3 B: Medidas 1 y 2 B: Medidas 1 y 3 | Paso 4 A: Medidas 1, 3 y 4 A: Medidas 2, 3 y 4 B: Medidas 1 y 2 B: Medidas 1 y 3 | Paso 5 A: Todas las medidas B: Medidas 1 y 2 B: Medidas 1 y 3 | Paso 6 A: Todas las medidas B: Todas las medidas | Paso 7 A: Todas las medidas |
|---|---|--|--|--|--|--|

Secuencia de implantación:

1. **A: Medida 3** 2. **B: Medida 1** 3. **A: Medida 4** 4. **A: Medida 1** 5. **B: Medida 2** 6. **B: Medida 3** 7. **A: Medida 2**

Figura 20: Ejemplo de aplicación del procedimiento de priorización de medidas en dos presas.

Además, al elegir la medida en cada paso también hay que tener en cuenta algunas restricciones a la priorización que pueden haberse definido, como fijar el paso de implementación de una medida o forzar a que una medida se implemente antes que otra. En el siguiente apartado se analiza qué tipos de restricciones se pueden introducir y cómo afectan para definir la secuencia de implementación de medidas.

En el Anejo 1 se muestra la parte central del código en Python 2.7 empleado por esta herramienta para definir las secuencias de medidas. Esta herramienta de priorización se puede ejecutar a través de la interfaz gráfica desarrollada. En la Figura 21 se muestra una visión general de esta interfaz gráfica.

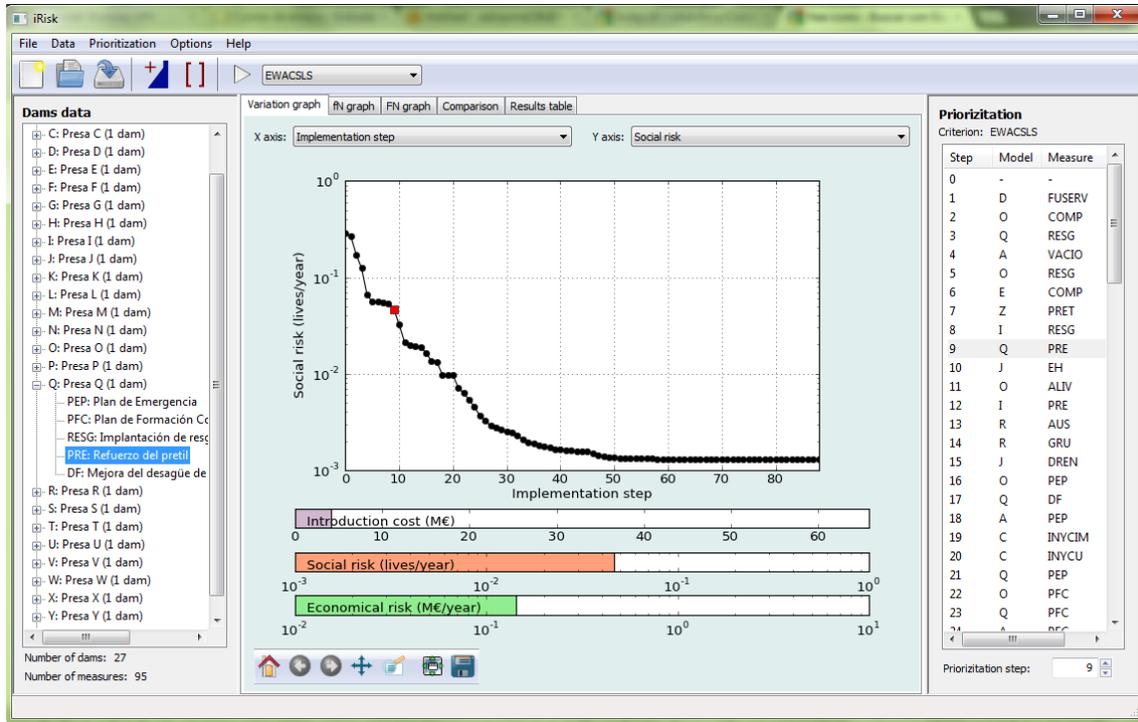


Figura 21: Interfaz gráfica de la herramienta de priorización de medidas.

Esta interfaz gráfica está formada por tres ventanas diferentes:

- Ventana de datos de presas: A partir de esta ventana se introducen los datos de las presas y las medidas propuestas en cada una de ellas. Los datos necesarios más importantes son los costes, las restricciones entre medidas y la ruta a los archivos de resultados de combinaciones calculados previamente.
- Ventana de priorización: En esta ventana se muestra en una tabla la secuencia de implementación de medidas obtenida a partir del criterio de priorización elegido.
- Ventana de resultados: En esta ventana se muestra de forma gráfica los resultados de la secuencia de priorización de medidas. Alguno de los gráficos mostrados son el gráfico de variación para los ejes seleccionados, el gráfico fN de todas las presas viendo la variación de cada una y también el gráfico FN. También se permite la comparación entre dos pasos diferentes de la priorización y obtener una tabla que muestra todos los resultados obtenidos.

4.4 Restricciones a la priorización

Las restricciones permiten modificar la secuencia de implementación de medidas para introducir condicionantes que pueden darse en la gestión real de medidas. Las restricciones que pueden ser introducidas en esta herramienta:

- **Restricción de orden:** Permite forzar a que una medida deba ser implementada antes que otra. De esta forma, se asegura que aparezca antes en la secuencia de implementación de medidas. Un ejemplo de utilización de esta condición es que sea necesario desarrollar un Plan de Emergencia en la presa antes de realizar un Plan de Formación Continua a la población.
- **Restricción excluyente:** Es utilizada para medidas que son mutuamente excluyentes, es decir, que la implementación de cualquiera de ellas evita que se pueda realizar la otra. Un ejemplo son instalar compuertas de tipo Taintor e instalar compuertas de tipo vagón en el aliviadero.
- **Restricción eliminativa:** Esta restricción aparece cuando la aplicación de una medida produce que no se pueda realizar otra, pero no la implementación de la segunda sí que permite la aplicación de la primera. Un ejemplo es poner en fuera de servicio una presa y una mejora en la fiabilidad de las válvulas de su desagüe de fondo. Poner en fuera de servicio la presa produce que no tenga sentido mejorar la fiabilidad de las válvulas, pero esta mejora de la fiabilidad no implica que más adelante no pueda plantearse poner en fuera de servicio la presa.
- **Restricción de agrupación:** Mediante esta restricción se permite que dos medidas puedan ser implementadas de forma conjunta en un mismo paso de la secuencia de implementación de medidas, teniendo en cuenta el efecto y el coste de ambas para el cálculo de los indicadores de riesgo. Un ejemplo de esta restricción es obligar a que los Planes de Emergencia de dos presas distintas sean implantados al mismo tiempo.
- **Restricción de posición global:** Permite definir el paso de la secuencia de priorización en el que se implementa una medida en concreto. Este paso se refiere a la secuencia obtenida con todas las medidas del conjunto de presas. Esta restricción puede servir por ejemplo para definir que una medida sea la primera en la secuencia, debido a que su implantación está a punto de llevarse a cabo.
- **Restricción de posición relativa:** Esta restricción es utilizada para definir la posición de una medida respecto a las otras medidas de la misma presa. Por ejemplo, puede servir para definir que una medida sea la primera que sea implementada en una presa.
- **Restricción exclusiva:** Permite eliminar una medida del análisis para que no aparezca en la secuencia de implementación de medidas. Esta condición puede

ser aplicada por ejemplo en medidas que tras realizar un análisis preliminar, se ha concluido que son muy poco viables.

Además del efecto que estas restricciones tienen sobre la secuencia obtenida en la priorización de medidas, también permiten reducir el número de combinaciones que debe ser calculado. Esto es debido a que cuando estas condiciones son definidas entre medidas de un mismo modelo de riesgo, algunas de las combinaciones de medidas dejan de tener sentido.

Como ejemplo, en la Tabla 3 se muestra qué combinaciones de medidas dejan de ser calculadas cuando se establece cada tipo de restricción sobre una medida A y una medida B para una presa con tres medidas (A, B y C).

| | Orden <i>A antes que B</i> | Excluyente <i>A y B excluyentes</i> | Eliminativa <i>A elimina a B</i> | Agrupación <i>A y B agrupadas</i> | Posición <i>Posición A = 1</i> | Exclusiva <i>A excluida</i> |
|----------------------|--------------------------------------|---|--|---|--|---------------------------------------|
| | Sin medidas | Sin medidas | Sin medidas | Sin medidas | Sin medidas | Sin medidas |
| Combinaciones | A | A | A | A | A | A |
| | B | B | B | B | B | B |
| | C | C | C | C | € | C |
| | AB | AB | AB | AB | AB | AB |
| | BC | BC | BC | BC | BC | BC |
| | AC | AC | AC | AC | AC | AC |
| | ABC | ABC | ABC | ABC | ABC | ABC |

Tabla 3: Combinaciones de medidas que dejan de ser calculadas (tachadas y en rojo) según el tipo de restricción establecida en una presa con tres medidas (A, B y C).

El efecto concreto de cada tipo de restricción sobre las dos partes de la herramienta desarrollada se muestra en el código de programación del Anejo 1.

4.5 Cálculo de itinerarios de implantación de medidas en el tiempo

En este apartado se presenta una herramienta inicial para obtener secuencias de implementación de medidas a lo largo del tiempo. La principal diferencia en la herramienta de priorización de medidas teniendo en cuenta el tiempo respecto a la herramienta anterior es que no se define una medida idónea en cada paso de una secuencia sino una combinación de medidas idónea en un período de tiempo. Este período de tiempo viene marcado por el horizonte de decisión. Por lo tanto, en cada paso del proceso se analizan todas las posibles combinaciones de medidas y se elige la combinación idónea que puede ser implantada en este período. En esta herramienta, para evaluar si una combinación de medidas puede ser implantada en un período de tiempo se han establecido dos condiciones:

- Plazo de implementación: Todas las medidas de la combinación tienen que poder ser implementadas en el período analizado, por lo que el plazo de implementación de todas las medidas tiene que ser menor que el horizonte de decisión.
- Presupuesto disponible: La suma de los costes de implantación de todas las medidas debe ser menor que el dinero disponible para implantar medidas en seguridad de presas durante el período de análisis. Esta condición se ha introducido a partir de un presupuesto máximo anual. El dinero que no se gasta en un período queda disponible para futuras medidas.

Cuando no existen combinaciones de medidas que cumplen estas condiciones además de las restricciones establecidas en el apartado anterior, el horizonte de decisión se aumenta en un año. De esta forma, se tienen en cuenta medidas que no han sido consideradas por su elevado plazo de implementación y se aumenta el presupuesto disponible. En la Figura 22 se muestra un esquema de cómo funciona la herramienta desarrollada.

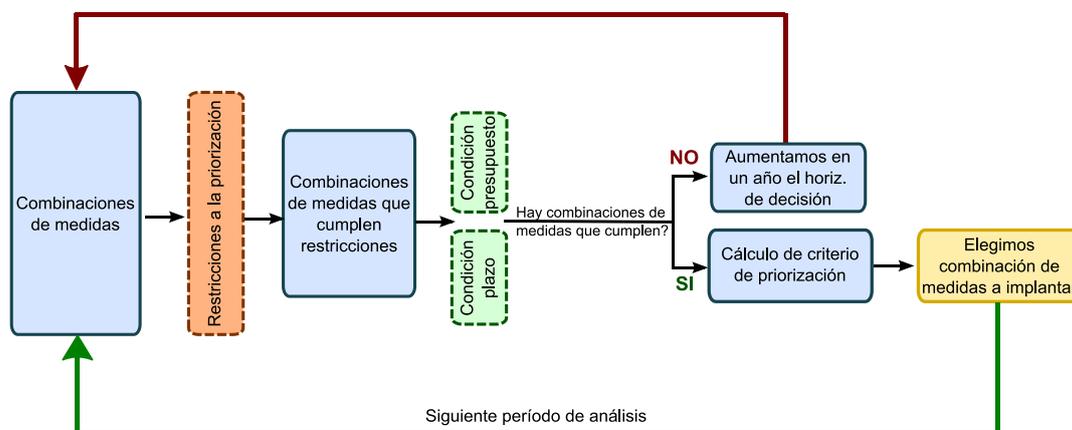


Figura 22: Esquema del procedimiento seguido por la herramienta de priorización de medidas en el tiempo.

Con el fin de explicar el funcionamiento de esta herramienta, se plantea el siguiente ejemplo:

En este ejemplo se quiere definir la mejor secuencia de priorización de medidas en un conjunto de presas a lo largo del tiempo. El presupuesto anual para implantar estas medidas de reducción de riesgo es de 200.000 €. El riesgo inicial en el conjunto de presas es de 10^{-3} vidas/año. Como criterio de priorización se ha elegido reducir en cada intervalo de tiempo este riesgo social. Para reducir este riesgo se plantean 3 posibles medidas cuyos datos se muestran en la Tabla 4. Como simplificación, se ha considerado que el efecto sobre el riesgo de implantar dos medidas es igual a la multiplicación de los efectos de implantar cada una de ellas por separado.

| Medida | Plazo de implantación | Coste (M€) | Efecto sobre el riesgo |
|--------|-----------------------|------------|------------------------|
| 1 | 2 años | 0.3 | Divide por 2 |
| 2 | 3 años | 0.7 | Divide por 5 |
| 3 | 3 años | 0.6 | Divide por 4 |

Tabla 4: Datos de las medidas propuestas en el ejemplo.

En primer lugar, se realiza un primer análisis con un horizonte de decisión de **2 años**. El dinero disponible en este período para implantar medidas es de 400.000 €. Las posibles combinaciones de medidas que pueden ser implantadas se muestran en la Tabla 5.

| Combinación | Plazo de implantación | Coste (M€) | Efecto sobre el riesgo |
|-------------|-----------------------|----------------|------------------------|
| 1 | 2 años | 0.3 | Divide por 2 |
| 2 | 3 años | 0.7 | Divide por 5 |
| 3 | 3 años | 0.6 | Divide por 4 |
| 1+2 | 3 años | 1 | Divide por 10 |
| 2+3 | 3 años | 1.3 | Divide por 20 |
| 1+3 | 3 años | 0.9 | Divide por 8 |
| 1+2+3 | 3 años | 1.6 | Divide por 40 |

Tabla 5: Posibilidades de implantación de medidas en el paso 1 para el caso con horizonte de decisión de 2 años (en rojo se muestran las medidas que no cumplen las condiciones).

El coste de las medidas implantadas en cada combinación se ha obtenido como la suma del coste de todas las medidas de la combinación. El plazo es el máximo de los plazos de todas las medidas. Como se muestra en la tabla anterior, la única medida que se puede implantar es la medida 1, que es la primera medida de la secuencia, quedando 100,000 € que no se han gastado para medidas posteriores.

En el siguiente paso de la secuencia, no hay ninguna medida que pueda implantarse en el plazo de 2 años, por lo que se aumenta el horizonte de decisión a 3 años. El dinero disponible es de 700,000 € (600,000 € de los 3 años + 100,000€ que quedaban de antes). Las opciones posibles para este paso se muestran en la Tabla 6.

| Combinación | Plazo de implantación | Coste (M€) | Efecto sobre el riesgo |
|-------------|-----------------------|----------------|------------------------|
| 2 | 3 años | 0.7 | Divide por 5 |
| 3 | 3 años | 0.6 | Divide por 4 |
| 2+3 | 3 años | 1.3 | Divide por 20 |

Tabla 6: Posibilidades de implantación de medidas en el paso 1 para el caso con un horizonte de decisión de 2 años (en rojo se muestran las medidas que no cumplen las condiciones).

Puede implantarse la medida 2 o la medida 3, se elige la medida 2 porque produce una mayor reducción en el riesgo. Por último, en el siguiente período de decisión se implantaría la medida 3 con los 600,000€ disponibles, quedando la siguiente secuencia a lo largo del tiempo:

| Tiempo (años) | Dinero disponible (M€) | Medidas implantadas | Dinero restante (M€) | Riesgo (vidas/año) |
|---------------|------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 0 | 0 | - | 0 | 1.00E-03 |
| 2 | 0.4 | 1 | 0.1 | 5.00E-04 |
| 5 | 0.7 | 1+2 | 0 | 1.00E-04 |
| 8 | 0.6 | 1+2+3 | 0 | 2.50E-05 |

Tabla 7: Secuencia de implementación de medidas obtenida con un horizonte de decisión de 2 años.

El siguiente análisis se ha realizado con un horizonte de decisión de **3 años**. En este caso, el dinero disponible en el primer paso es de 600,000 €. Las posibles combinaciones de medidas que se pueden implantar en este tiempo son:

| Combinación | Plazo de implantación | Coste (M€) | Efecto sobre el riesgo |
|-------------|-----------------------|----------------|------------------------|
| 1 | 2 años | 0.3 | Divide por 2 |
| 2 | 3 años | 0.7 | Divide por 5 |
| 3 | 3 años | 0.6 | Divide por 4 |
| 1+2 | 3 años | 1 | Divide por 10 |
| 2+3 | 3 años | 1.3 | Divide por 20 |
| 1+3 | 3 años | 0.9 | Divide por 8 |
| 1+2+3 | 3 años | 1.6 | Divide por 40 |

Tabla 8: Posibilidades de implantación de medidas en el paso 1 para el caso con un horizonte de decisión de 3 años (en rojo se muestran las medidas que no cumplen las condiciones).

En este caso, se elige la medida 3, ya que produce una mayor reducción del riesgo en este periodo. El siguiente paso el dinero disponible es también de 600,000 € y las posibilidades de medidas son las que se muestran en la Tabla 9.

| Combinación | Plazo de implantación | Coste (M€) | Efecto sobre el riesgo |
|-------------|-----------------------|------------|------------------------|
| 1 | 2 años | 0.3 | Divide por 2 |
| 2 | 3 años | 0.7 | Divide por 5 |
| 1+2 | 3 años | 1 | Divide por 10 |

Tabla 9: Posibilidades de implantación de medidas en el paso 2 para el caso con un horizonte de decisión de 3 años (en rojo se muestran las medidas que no cumplen las condiciones).

En este paso se implanta la medida 1, ya que es la única combinación que cumple todos los requisitos. Por último, en el siguiente paso se implantaría la medida 2 con el dinero disponible. De esta forma, la secuencia de implementación de medidas obtenida es:

| Tiempo (años) | Dinero disponible (M€) | Medidas implantadas | Dinero restante (M€) | Riesgo (vidas/año) |
|---------------|------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 0 | 0 | - | 0 | 1.00E-03 |
| 3 | 0.6 | 3 | 0 | 2.50E-04 |
| 6 | 0.6 | 1+3 | 0.3 | 1.25E-04 |
| 9 | 0.9 | 1+2+3 | 0.2 | 2.50E-05 |

Tabla 10: Secuencia de implementación de medidas obtenida con un horizonte de decisión de 3 años.

En la Figura 14 se representa gráficamente como varía el riesgo a lo largo del tiempo para las dos secuencias obtenidas.

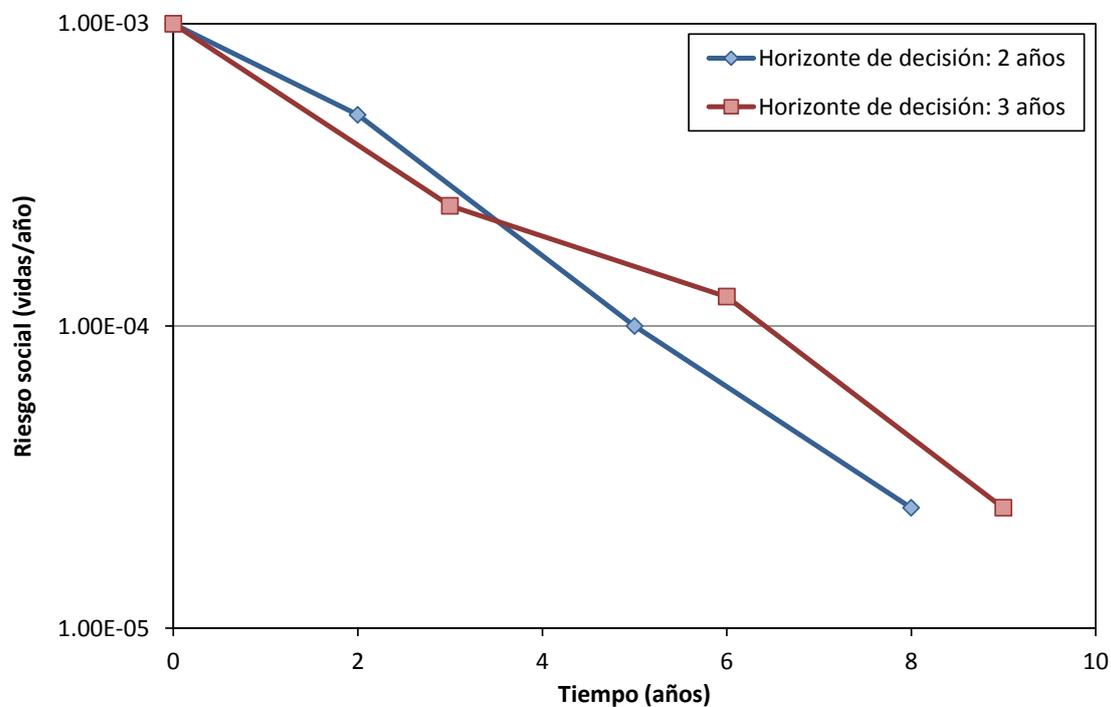


Figura 23: Variación en el tiempo del riesgo para las dos secuencias de implementación de medidas obtenidas.

Como se puede observar en el gráfico anterior, este ejemplo sencillo tiene como resultado dos secuencias de implementación completamente distintas para dos horizontes de decisión diferentes, lo que demuestra la necesidad de definir correctamente este tiempo.

El principal inconveniente de esta herramienta de priorización en el tiempo radica en la gran magnitud de los cálculos necesarios para evaluar todas las posibles combinaciones de medidas en cada intervalo de tiempo. Como se ha explicado en el Apartado 4.2, las posibles combinaciones de un grupo de medidas son 2^N , siendo N el número de medidas. En cada intervalo de tiempo, estas combinaciones deben evaluarse, analizando cuáles cumplen las restricciones y las condiciones al plazo de implementación y el presupuesto. Este hecho hace que sea imposible aplicar la metodología de forma directa, ya que los tiempos de cálculo son demasiado elevados. Por este motivo, se han establecido dos restricciones para reducir el número de combinaciones de medidas que son evaluadas en cada paso:

- Establecer un número máximo de medidas anual: Esta restricción permite reducir de forma importante el número de combinaciones analizadas, ya que no se evalúan las combinaciones con un elevado número de medidas. Además, tiene muy poco efecto sobre las secuencias de implementación definidas, ya que este límite ya es establecido de forma indirecta a través del presupuesto máximo anual. Por lo tanto, esta restricción limita el número de cálculos necesarios pero no suele tener un efecto sobre los resultados de forma importante.
- Limitar cuáles son las medidas que pueden ser implementadas en cada intervalo de tiempo: Mediante esta restricción, se consigue que en lugar de calcular todas las posibles combinaciones de todas las posibles medidas, se calculen solo las combinaciones para un determinado grupo de medidas. Para definir este grupo de medidas, se ha realizado una primera priorización sin tener en cuenta el tiempo para el criterio empleado (en este caso, el SRDI). A partir de estos resultados, se ha elegido en cada intervalo el grupo de medidas no implantado que se encuentra en los primeros lugares de esta priorización. El número de medidas de este grupo se ha determinado como la suma de tres factores:
 - Número de medidas ya implantadas.
 - Número máximo de medidas en el intervalo de tiempo.
 - Número de medidas de margen que se quiere analizar: Cuanto mayor es este número, mayor es el tiempo de cálculo necesario.

Para entender cómo se aplican estas dos limitaciones en el cálculo se ha desarrollado el siguiente ejemplo:

Disponemos de un conjunto de 15 medidas (numeradas de la 1 a la 15). Se desea establecer su secuencia de implementación el tiempo. Para ello, se utiliza como criterio de priorización la minimización del riesgo social (indicador SRDI). Se ha tomado un horizonte de decisión de 2

años y un máximo de medidas anual de 3. Además, se ha elegido un número de medidas de margen para analizar de 2.

En primer lugar se ha realizado una priorización según el criterio definido, las medidas han quedado ordenadas según se muestra en la Figura 24.

En el primer intervalo de tiempo se ha realizado la priorización y se ha obtenido que la combinación de medidas idónea para este intervalo es la compuesta por las medidas 1 y 3.

A continuación se analiza que combinaciones de medidas deben evaluarse en el segundo intervalo. El número máximo de medidas en cada combinación viene definido por el número máximo de medidas anual y en este caso es de 6 (3 medidas x 2 años). Por lo tanto, solo se evaluarán las combinaciones con 6 medidas o menos.

El siguiente paso es estudiar sobre qué medidas se calculan las combinaciones. Estas medidas serán las primeras de la secuencia de priorización según el criterio MSRD. El número de medidas viene determinado por la suma del número de medidas ya implantadas (2), el número máximo de medidas (6) y el número de medidas de margen (2). Por lo tanto, se evaluarán las combinaciones de las diez primeras medidas de la secuencia de priorización excepto las medidas 1 y 3 que ya han sido implantadas. En la Figura 24 se muestra este razonamiento de forma gráfica.

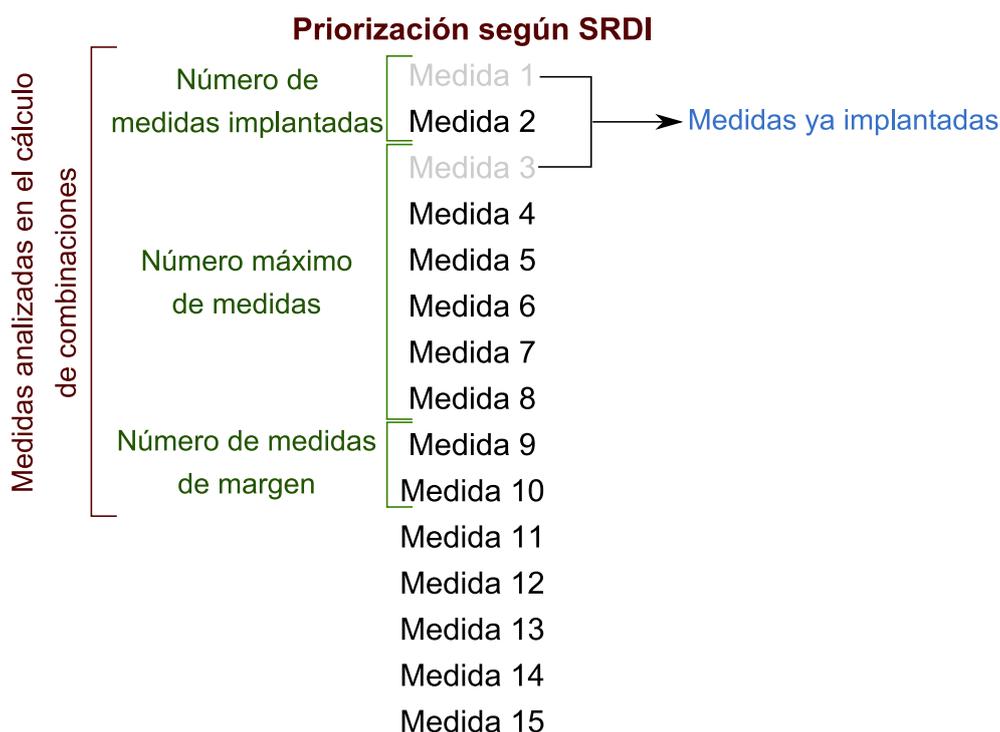


Figura 24: Medidas analizadas en el cálculo de combinaciones del segundo paso de la priorización del ejemplo.

En cualquier caso, cabe destacar que esta herramienta de priorización en el tiempo se trata de una versión inicial para enfocar el problema y entender la complejidad que conlleva la toma de decisiones a lo largo del tiempo. En un futuro, sería recomendable

introducir un mayor número de aspectos técnicos, administrativos, sociales y económicos que pueden determinar como las medidas son implantadas a lo largo del tiempo. Además, también sería adecuado introducir el efecto sobre la secuencia de implementación de tener presas con un elevado riesgo y que requieren medidas de relativa urgencia. De esta forma podría gestionarse de forma conjunta la reducción de riesgo a corto plazo (medidas de urgencia) con la reducción de riesgo a largo plazo.

Por otro lado, la interfaz gráfica de esta herramienta aún no ha sido desarrollada y su procedimiento de cálculo debe ser mejorado para reducir los tiempos de cálculo necesarios.

5. CASO DE ESTUDIO: PRIORIZACIÓN DE MEDIDAS EN LA GESTIÓN DE UN CONJUNTO DE 27 PRESAS

5.1 Descripción del caso de estudio

La herramienta desarrollada para la gestión de actuaciones ha sido aplicada en un conjunto de 27 presas de un mismo titular. Este caso de estudio es un grupo de presas real y las medidas planteadas están siendo estudiadas actualmente para mejorar su seguridad. Por ello, es una clara muestra de la aplicación de la herramienta en la gestión de la seguridad de un conjunto de presas.

Se trata de un grupo muy heterogéneo de presas, que incluye presas de diferente edad y tamaño. Además, una de las presas se encuentra actualmente en construcción. La Tabla 11 muestra un resumen de las principales características de las presas analizadas.

| Principales características de las presas del caso de estudio | |
|---|---|
| Tipologías | 15 Gravedad |
| | 4 Azudes |
| | 3 Bóveda |
| | 3 Materiales sueltos |
| | 2 Arco |
| Año de construcción | Desde 1923 hasta en construcción actualmente |
| Altura de presa | Desde 100.6 m hasta 11.6 m |
| Volumen del embalse | Desde 641 hm ³ hasta 0.2 hm ³ |

Tabla 11: Resumen de las principales características de las 27 presas analizadas.

Para utilizar la herramienta desarrollada en la gestión de la seguridad se parte de los resultados obtenidos al realizar un proceso completo de Análisis de Riesgo en cada una de las presas. Dentro de este proceso, se ha realizado durante varios años un análisis de todos los aspectos referentes a la seguridad de la presa, siguiendo el procedimiento que muestra en el Apartado 2.2 y se han planteado posibles medidas de reducción de riesgo para cada una de las presas.

Como resultado de este análisis se han obtenido 26 modelos de riesgo desarrollados con el software iPresas [25], para la elaboración y cálculo de modelos de riesgo. Estos modelos de riesgo corresponden cada uno a cada una de las presas, excepto uno de ellos que analiza el riesgo de dos presas de forma conjunta. Estas dos presas se encuentran en el mismo sistema. En la Figura 25 se muestra un ejemplo de uno de los modelos de riesgo elaborados mediante el software iPresas.

Para la explicación de los resultados de este caso de estudio, cada uno de los modelos se ha nombrado mediante una letra (de la A a la Z). De igual forma, cada una de las presas se ha nombrado con la letra correspondiente a su modelo, excepto las presas

del modelo de riesgo del sistema, que se han nombrado como Z1 y Z2, ya que el modelo del sistema es el modelo Z.

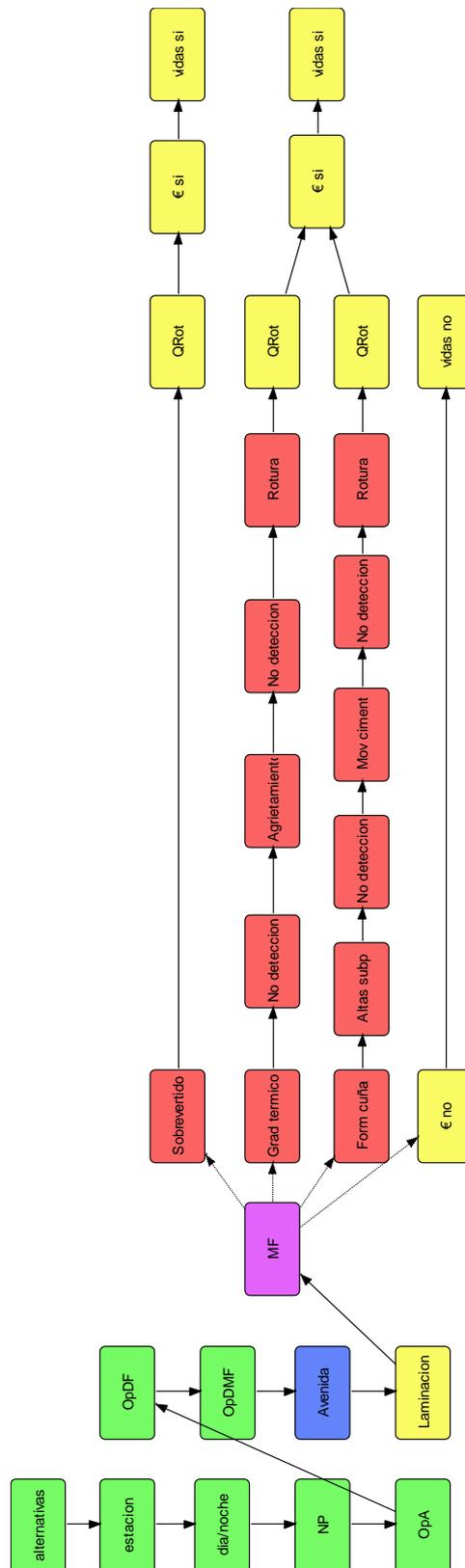


Figura 25: Modelo de riesgo de la presa G.

En total, se han planteado 95 medidas en las 27 presas analizadas. En la Tabla 12 se muestra un resumen de las medidas de reducción de riesgo planteadas. Como se puede observar en esta tabla, existe una gran variación en las medidas propuestas, tanto estructurales como no estructurales. Además en el Anejo 2 se encuentra una descripción detallada de las medidas planteadas en cada una de las presas y el efecto que tienen sobre el modelo de riesgo y en los resultados.

| Medidas estructurales | | Medidas no estructurales | |
|--|-----------|---|-----------|
| Mejora de la fiabilidad de los órg. de desagüe | 8 | Plan de Emergencia | 23 |
| Actuaciones de mejora de la cimentación | 8 | Programa de Formación Continua a la población | 23 |
| Actuaciones de mejora del cuerpo de presa | 8 | Mejora del sistema de auscultación | 5 |
| Sustitución/rehabilitación de elem. desagüe | 5 | Implantación de resguardos | 3 |
| Refuerzo del pretil de coronación | 3 | Mantener el embalse prácticamente vacío | 1 |
| Aumento de capacidad de aliviadero | 2 | Mantener compuertas del aliviadero abiertas | 1 |
| Construcción de un nuevo desagüe | 2 | | |
| Instalación de compuertas en el aliviadero | 1 | | |
| Rehabilitación del cuenco amortiguador | 1 | | |
| Dejar fuera de servicio la presa | 1 | | |
| TOTAL: | 39 | TOTAL: | 56 |
| TOTAL: 95 medidas | | | |

Tabla 12: Resumen de las medidas de reducción de riesgo analizadas en las 27 presas.

5.2 Resultados de aplicación de medidas

En primer lugar, se ha analizado la situación de partida de riesgo para todas las presas analizadas. Para analizar este riesgo se han representado todas las presas en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR, y que se muestra en la Figura 26.

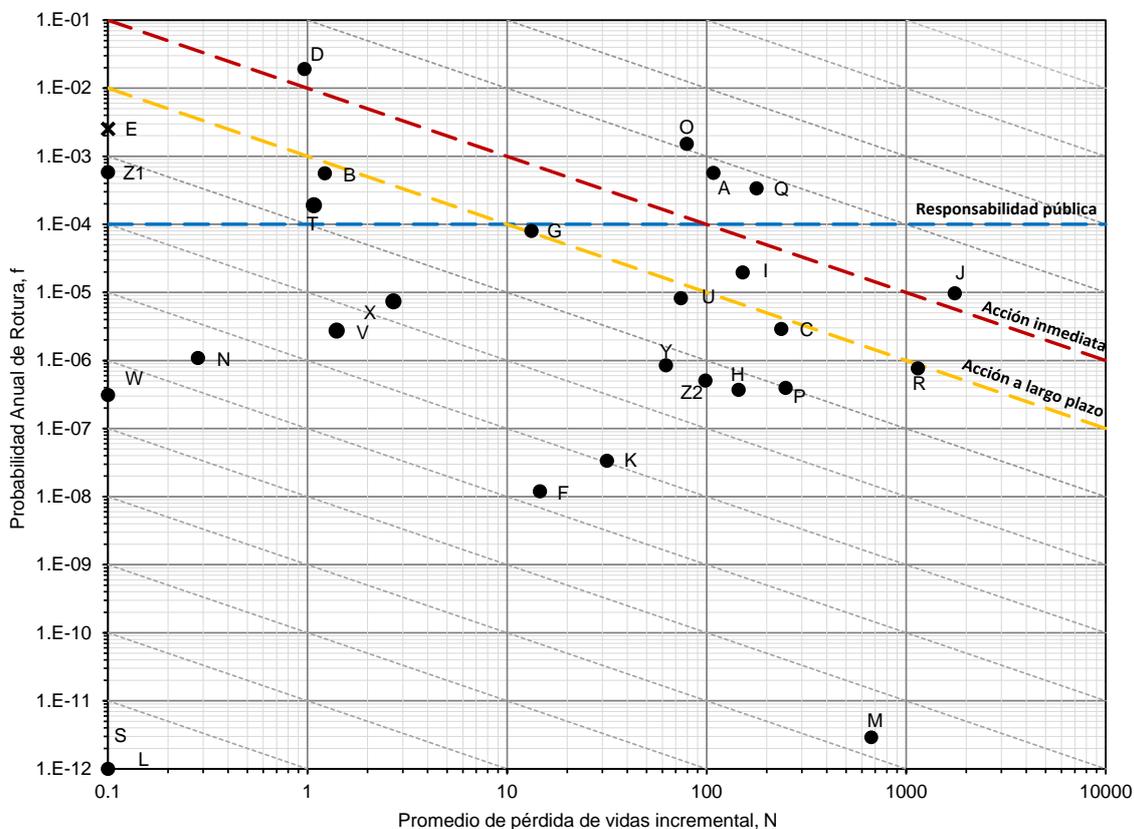


Figura 26: Resultados de riesgo de las 27 presas analizadas para la situación inicial, representados en el gráfico de tolerabilidad del USBR (2003).

Como se puede observar en esta figura, la situación actual de estas presas respecto a las recomendaciones de tolerabilidad es que:

- En las presas D, O, A, Q y J el riesgo social se encuentra por encima de la recomendación de tolerabilidad de acción inmediata.
- En las presas I y G el riesgo social se encuentra por encima de la recomendación de tolerabilidad de acción inmediata.
- En las presas B, T, E y Z1 la probabilidad de fallo se encuentra por encima del límite de responsabilidad pública.
- En las presas U, C, N, W, K, F, Z2, H, Y, X, V, P y M el riesgo es tolerable.
- En las presas S y L el riesgo es despreciable respecto al resto de presas. Por este motivo, las medidas propuestas en estas presas estarán al final de las secuencias de priorización de medidas.

A continuación, se ha calculado la situación final de todas las presas tras aplicar todas las medidas de reducción de riesgo propuestas. El resultado obtenido se muestra en la Figura 27.

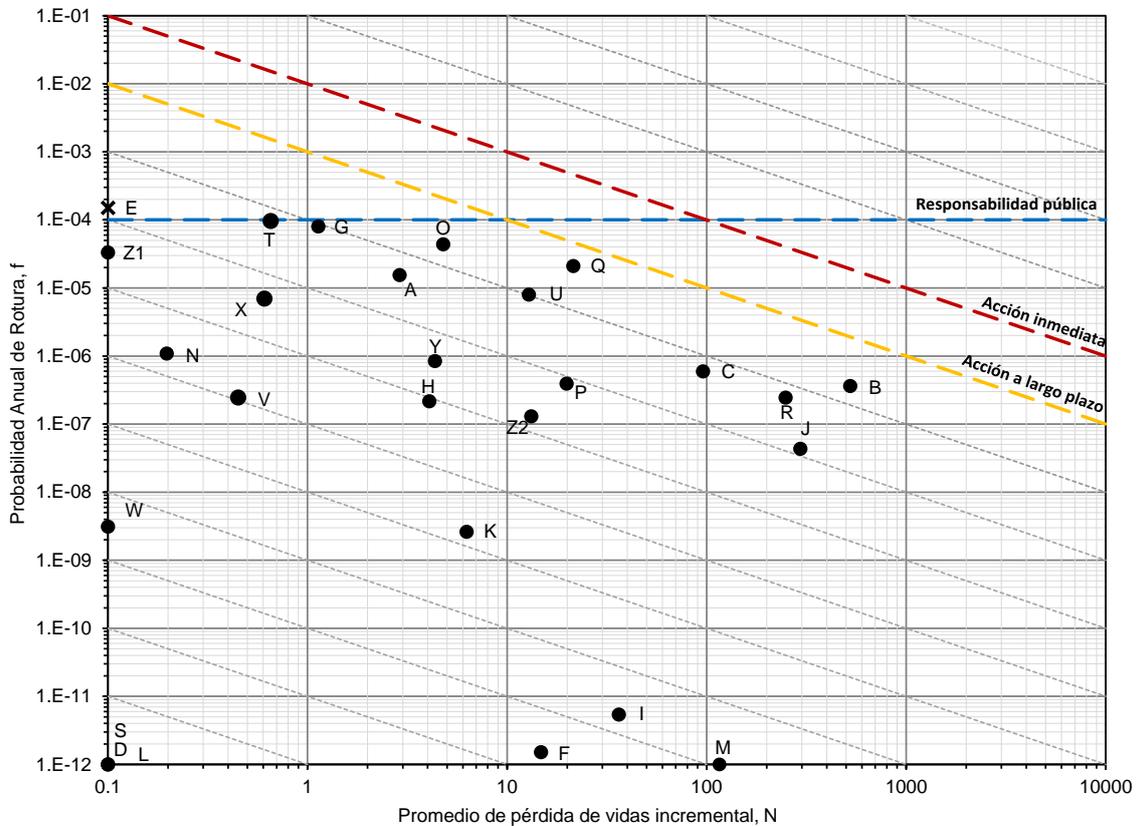


Figura 27: Resultados de riesgo de las 27 presas analizadas tras aplicar todas las medidas, representados en el gráfico de tolerabilidad del USBR (2003).

Como se puede observar en el gráfico anterior, al aplicar todas las medidas propuestas todas las presas quedan por debajo de las recomendaciones de tolerabilidad. La única excepción es la presa E, que es la única del grupo de presas que no está clasificada como tipo A. Esta presa incumple la recomendación para la probabilidad de fallo, aunque esta recomendación está basada en limitar el riesgo individual. Como se explica en el Apartado 3.2.3 el riesgo individual y la probabilidad de fallo no son equivalentes si la rotura de la presa no tiene una alta probabilidad de producir pérdida de vidas, como ocurre para las presas no clasificadas como tipo A. Por este motivo, esta recomendación de tolerabilidad no es directamente aplicable a la presa E, debido a que su rotura no tiene una alta probabilidad de producir pérdida de vidas.

5.3 Resultados de priorización de medidas

5.3.1 Introducción de datos en la herramienta de gestión

En primer lugar, tal y como se explica en el Apartado 4.2., se han calculado las diferentes combinaciones de medidas para cada una de las presas. Para ello, se parte de los 26 modelos de riesgo del grupo de presas y se ha empleado el software iPresas [25]. En la Tabla 13 se encuentra un resumen del número de combinaciones calculado para cada presa (condicionado por las restricciones introducidas entre medidas) y los tiempos de cálculo necesarios.

| Presa | Medidas | Combinaciones de medidas | Tiempo de cálculo por combinación |
|-------|---------|--------------------------|-----------------------------------|
| A | 6 | 48 | 2 h |
| B | 3 | 6 | 1.5 min |
| C | 5 | 24 | 11 min |
| D | 7 | 72 | 10 s |
| E | 2 | 4 | 10 min |
| F | 3 | 8 | 15 s |
| G | 3 | 6 | 1 h |
| H | 2 | 4 | 15 min |
| I | 6 | 48 | 20 s |
| J | 3 | 8 | 10 min |
| K | 3 | 6 | 20 min |
| L | 1 | 2 | 5 min |
| M | 4 | 12 | 7 min |
| N | 2 | 3 | 30 s |
| O | 5 | 24 | 15 min |
| P | 3 | 6 | 2 min |
| Q | 5 | 24 | 45 s |
| R | 4 | 12 | 1.25 h |
| S | 3 | 6 | 15 s |
| T | 4 | 12 | 15 s |
| U | 3 | 6 | 1 h |
| V | 3 | 6 | 1.25 h |
| W | 3 | 6 | 3 s |
| X | 3 | 6 | 15 min |
| Y | 3 | 6 | 30 min |
| Z | 6 | 48 | 6 h |

Tabla 13: Resumen de número de combinaciones calculadas en los 26 modelos de riesgo.

A partir de estos resultados, se han introducido los datos de cada presa y sus medidas en la herramienta de priorización desarrollada para obtener las diferentes secuencias de implementación de medidas. Los principales datos introducidos son:

- Datos sobre el modelo de riesgo: Nombre, número de presas y variables que definen la rotura y las consecuencias.
- Datos sobre las medidas: Nombre, coste de implantación, coste de mantenimiento, vida útil y tasa de descuento para anualizar los costes.
- Resultados de riesgo para cada combinación de medidas en cada presa, obtenidos mediante el software iPresas.
- Restricciones entre medidas: En total, se han establecido 28 restricciones entre las medidas introducidas. En este caso, el tipo de restricciones introducidas no condicionan la posición concreta de ninguna medida y están basadas en cómo se relacionan las medidas entre sí. Estas restricciones también han sido utilizadas para reducir el número de combinaciones de medidas calculado. En la Tabla 14 se muestra un resumen de los tipos de restricciones elegidas.

| | |
|----------------------------|-----------|
| Restricciones de orden | 21 |
| Restricciones eliminativas | 7 |
| TOTAL: | 28 |

Tabla 14: Resumen restricciones introducidas en los 26 modelos de riesgo.

En la Figura 28 se muestra el aspecto de la herramienta al introducir todos los datos para cada una de las presas analizadas.

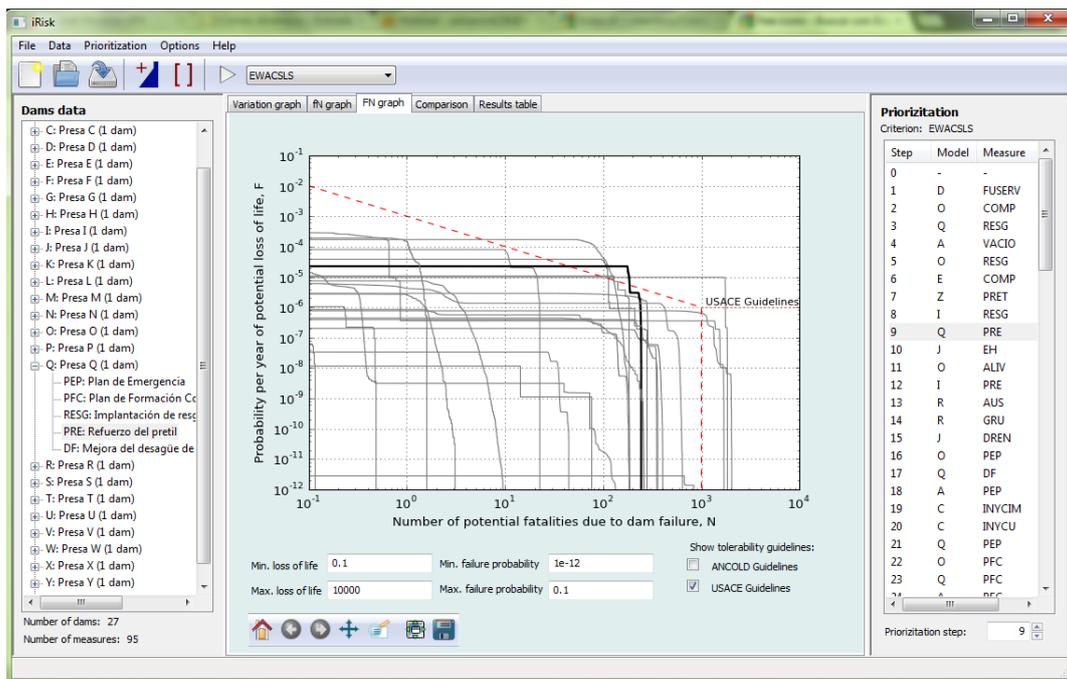


Figura 28: Interfaz gráfica de la herramienta de priorización de medidas.

A partir de estos datos introducidos, se ha pasado a calcular las diferentes secuencias de implementación de medidas para cada uno de los criterios de priorización.

5.3.2 Obtención de secuencias de implementación aleatorias

En primer lugar, con el fin de poder evaluar las secuencias de implementación obtenidas mediante la aplicación de los diferentes criterios de priorización, se ha calculado una secuencia que defina un caso aleatorio medio. Este caso representa los resultados de variación de riesgo promedio cuando no se sigue ningún indicador de riesgo para definir la secuencia de implementación de medidas, sino que la medida se elige en cada paso de forma aleatoria.

Para la obtención de este caso aleatorio medio, se han obtenido 1000 secuencias de priorización distintas. Obteniendo el promedio de variación del riesgo de todas estas secuencias para cada paso de implementación, se obtiene el caso aleatorio medio. En la Figura 29 se muestran los resultados obtenidos en el gráfico de variación del principio de eficiencia.

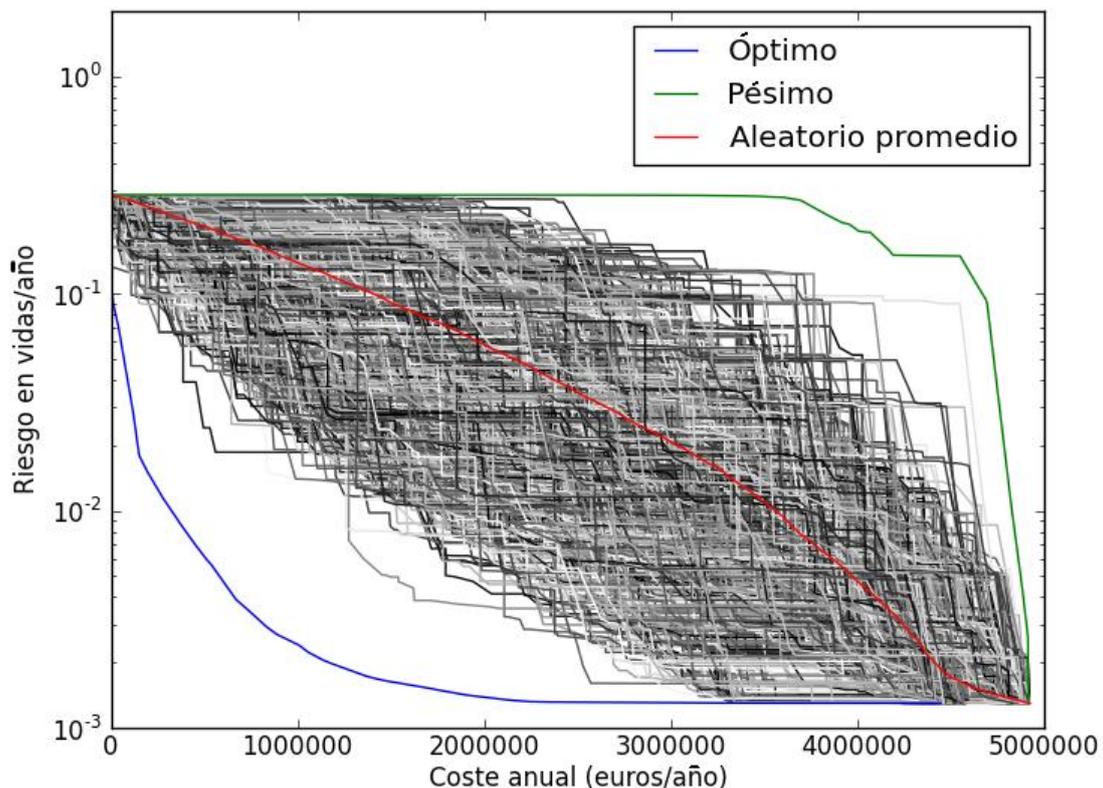


Figura 29: Resultado de los 1000 casos aleatorios calculados y del caso aleatorio medio representados en el gráfico de variación del principio de eficiencia social.

5.3.3 Resultados con diferentes indicadores de riesgo

El siguiente paso ha sido obtener la secuencia de priorización de medidas utilizando como criterio de priorización cada uno de los indicadores de riesgo definidos en el Apartado 3.3. Los indicadores de riesgo utilizados son:

- Cost per Statistical Life Saved (CSLS).
- Adjusted Cost per Statistical Life Saved (ACSL).
- Social Risk Decrease Index (SRDI).
- Failure Probability Decrease Index (FPDI).
- Cost per Statistical Failure Prevented (CSFP).
- Adjusted Cost per Statistical Failure Prevented (ACSFP).
- Economical Risk Decrease Index (ERDI).
- Cost-Benefit Ratio (CBR).
- Una combinación del ACSFP con probabilidades de rotura mayores que 10^{-4} y ACSLS cuando son menores a este valor.
- Equity Weighted Adjusted Cost per Statistical Life Saved (EWACSL) con un valor del parámetro n de 1.

A partir de estos indicadores se han obtenido diferentes secuencias de implementación de medidas para el grupo de presas analizado. En el Anejo 3 se muestran los resultados detallados obtenidos para cada uno de estos indicadores de riesgo.

Como se explica en el Apartado 3.3., cada uno de estos indicadores de riesgo está basado en uno o varios principios de priorización de medidas. Para evaluar como siguen cada principio de priorización las secuencias de implementación obtenidas se han utilizado los gráficos de variación y los índices de bondad, explicados en el Apartado 3.4 y el Apartado 3.5. En la Figura 30, la Figura 31 y la Figura 32 se muestran los gráficos de variación de los principios de eficiencia social, eficiencia económica y equidad respectivamente.

Como se puede observar, en cada gráfico el indicador que produce una secuencia mejor (mayor reducción del riesgo con menos coste) es diferente. En el gráfico de eficiencia social, la secuencia óptima la define el indicador CSLS, en el gráfico de eficiencia económica el CBR y en el gráfico de equidad el CSFP. Además, en cada uno de estos gráficos se ha obtenido la secuencia pésima de implementación, eligiendo en cada paso la medida que tenga un valor más alto del indicador que produce la secuencia óptima. Estas secuencias también se muestran en los gráficos de variación obtenidos.

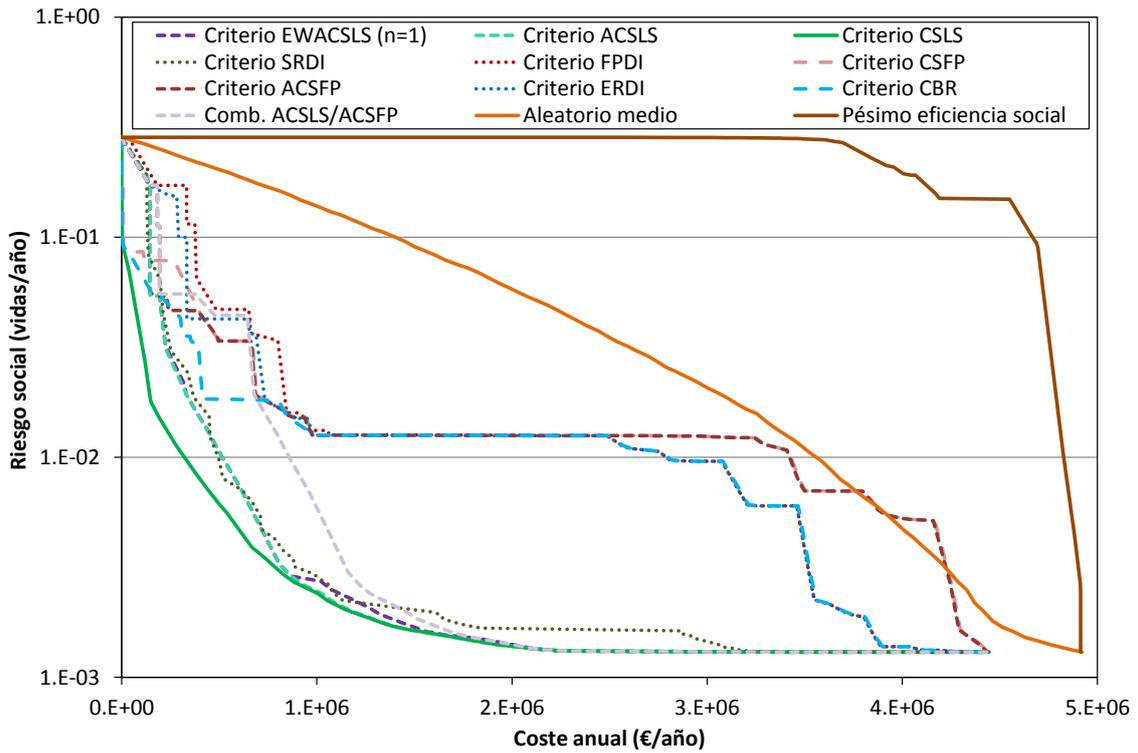


Figura 30: Secuencias de implementación para diferentes indicadores de riesgo en el gráfico de variación del principio de eficiencia social.

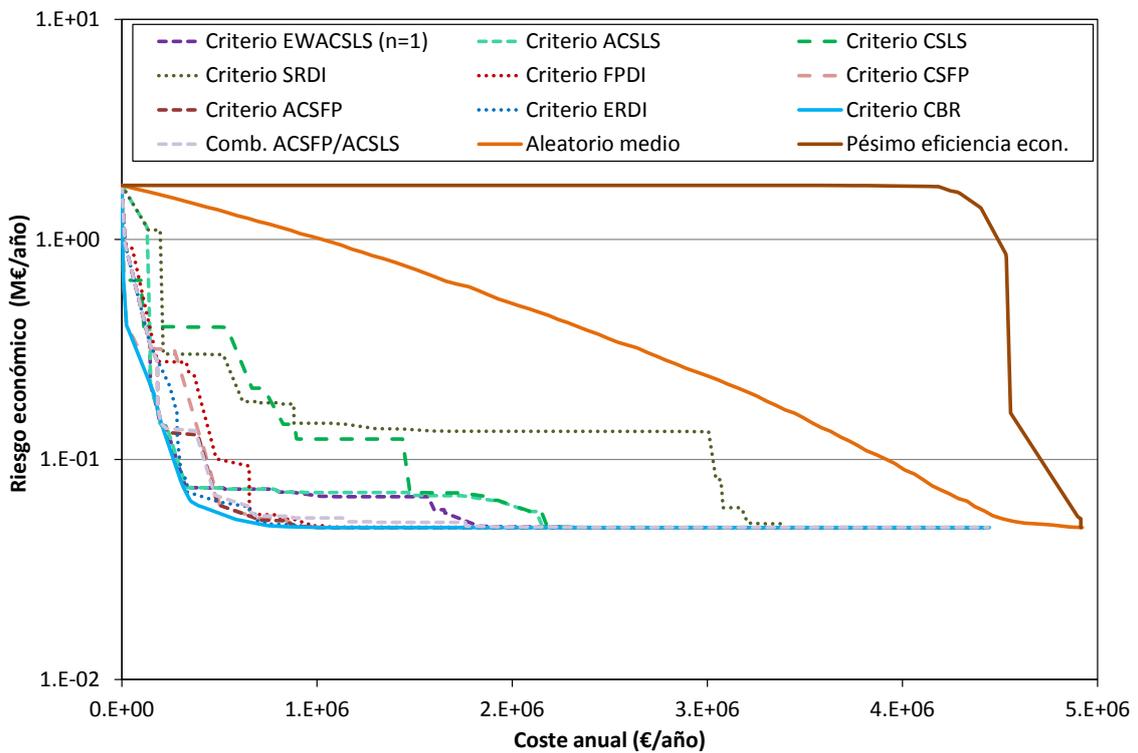


Figura 31: Secuencias de implementación para diferentes indicadores de riesgo en el gráfico de variación del principio de eficiencia económica.

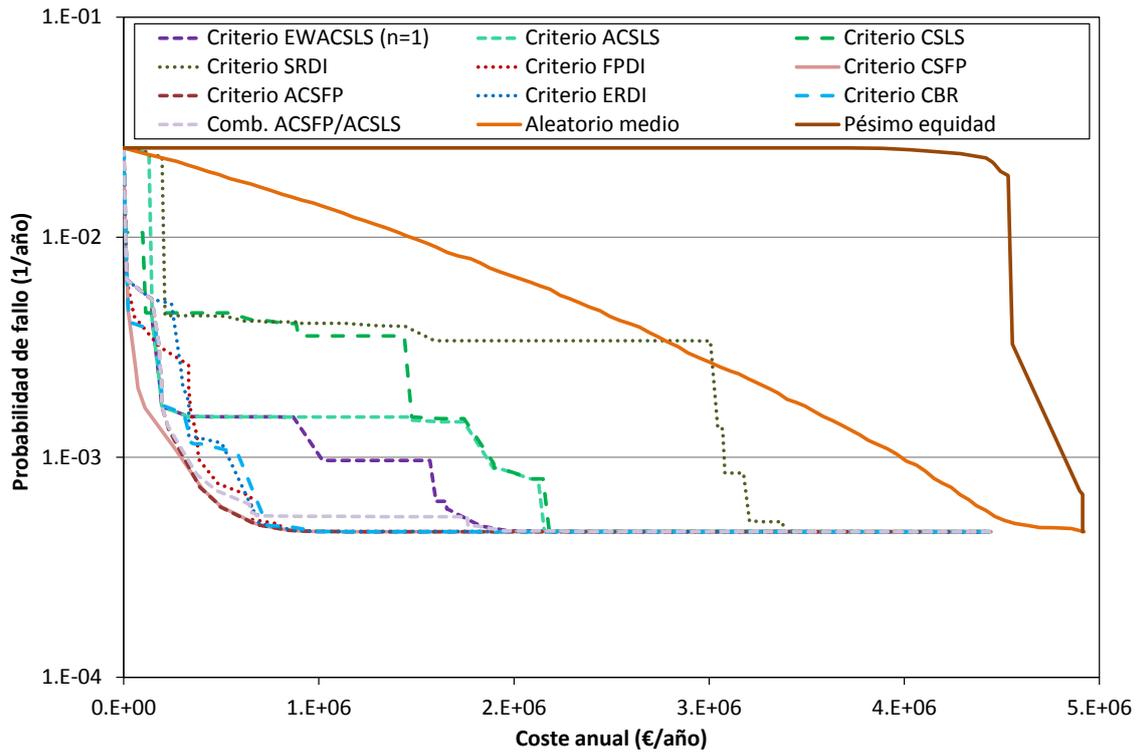


Figura 32: Secuencias de implementación para diferentes indicadores de riesgo en el gráfico de variación del principio de equidad.

Con el fin de analizar de forma numérica la bondad de cada secuencia de implementación para cada uno de los principios de priorización definidos, se han utilizado los índices de bondad definidos en el Apartado 3.5. Estos índices muestran numéricamente cuanto sigue una secuencia un determinado principio de priorización. Los resultados obtenidos para los principios de priorización planteados se muestran en la Tabla 15.

| Indicador | IB Eficiencia econ. | IB Eficiencia social | IB Equidad |
|--------------------------|---------------------|----------------------|--------------|
| FPDI | 93.2% | 64.2% | 95.0% |
| CSFP | 94.7% | 61.2% | 96.7% |
| ACSFP | 95.0% | 60.9% | 95.8% |
| EWACSLs (n=1) | 93.4% | 89.2% | 89.8% |
| ACSLs | 92.2% | 89.5% | 85.4% |
| CSLS | 85.6% | 91.9% | 79.7% |
| SRDI | 76.8% | 87.7% | 64.9% |
| ERDI | 95.2% | 65.1% | 94.2% |
| CBR | 96.5% | 67.4% | 94.9% |
| ACSFP/ACSLs | 94.4% | 84.8% | 94.7% |
| Aleatorio medio | 46.6% | 42.4% | 46.0% |
| Pésimo eficiencia social | 5.6% | 3.6% | 9.9% |
| Pésimo eficiencia econ. | 5.3% | 37.3% | 4.3% |
| Pésimo equidad | 5.6% | 36.4% | 4.1% |

Tabla 15: Resultados del índice de bondad de los diferentes indicadores de riesgo para los principios de priorización introducidos.

Como se puede observar en esta tabla, los indicadores que producen mejores valores del índice de bondad de eficiencia social son el CSLS, el ACSLS y el EWACSLs. Los indicadores que producen una mayor eficiencia económica son el ERDI y el CBR. Por último, los indicadores que producen un mejor valor del índice de equidad son el FPDI, el CSFP y el ACSFP. En la Figura 33 se muestra gráficamente como varía el índice de bondad de cada principio para los diferentes indicadores de riesgo utilizados como criterio de priorización.

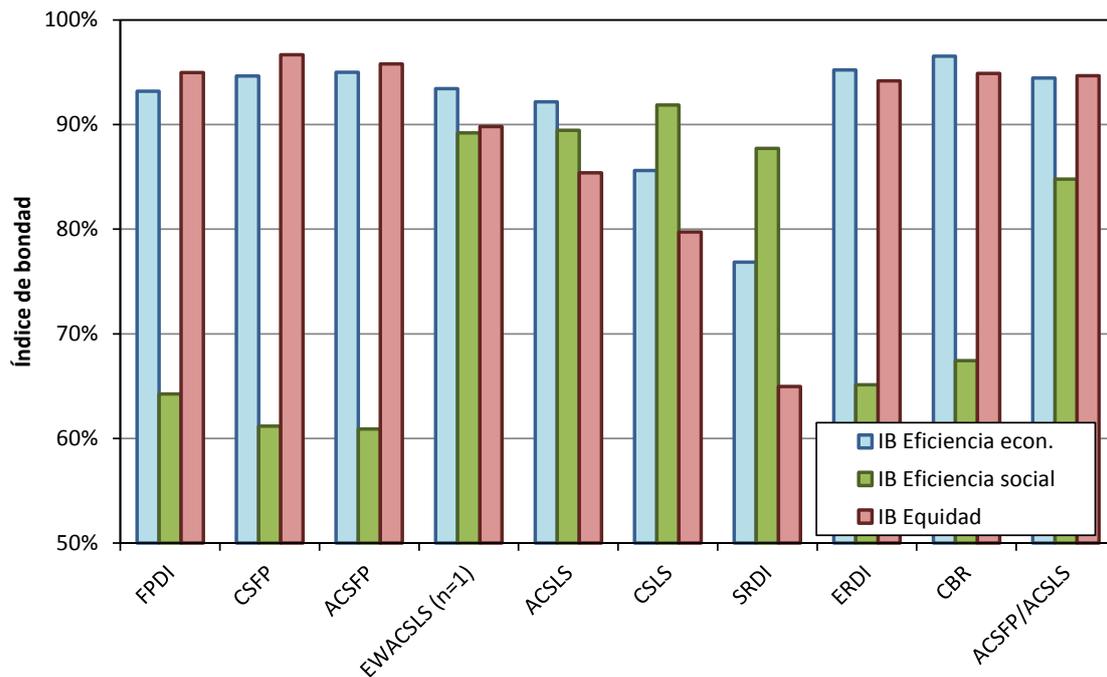


Figura 33: Variación de los índices de bondad para cada uno de los indicadores de riesgo.

Con el fin de comparar gráficamente cómo se combinan los principios de eficiencia social y equidad para cada indicador de riesgo, se han representado los índices de bondad obtenidos para los dos principios, como se muestra en la Figura 34. De igual forma, en la Figura 35 se muestra la comparación entre la eficiencia social y la eficiencia económica y en la Figura 36 se muestra la comparación entre la equidad y la eficiencia económica.

En estas figuras se puede observar cómo cada indicador produce mejores resultados para el índice de bondad de los principios en los que está basado. El EWACSL, que tiene en cuenta los tres principios analizados, produce un índice de bondad elevado para los tres casos.

Además, según los resultados obtenidos, los indicadores basados en equidad producen buenos resultados de eficiencia económica y viceversa. Esto es debido a que ninguna de las medidas introducidas produce cambios sobre los nodos de consecuencias económicas, por lo que las reducciones de la probabilidad de fallo producen un cambio de magnitud similar en el riesgo económico. Por ello, las secuencias definidas por los indicadores FPD y ERDI tienen índices de bondad muy similares.

Por otro lado, también puede observarse como el ACSFP y el ACSL tienen una mayor eficiencia económica que el CSFP y el CSL respectivamente, al incluir el riesgo económico en su formulación.

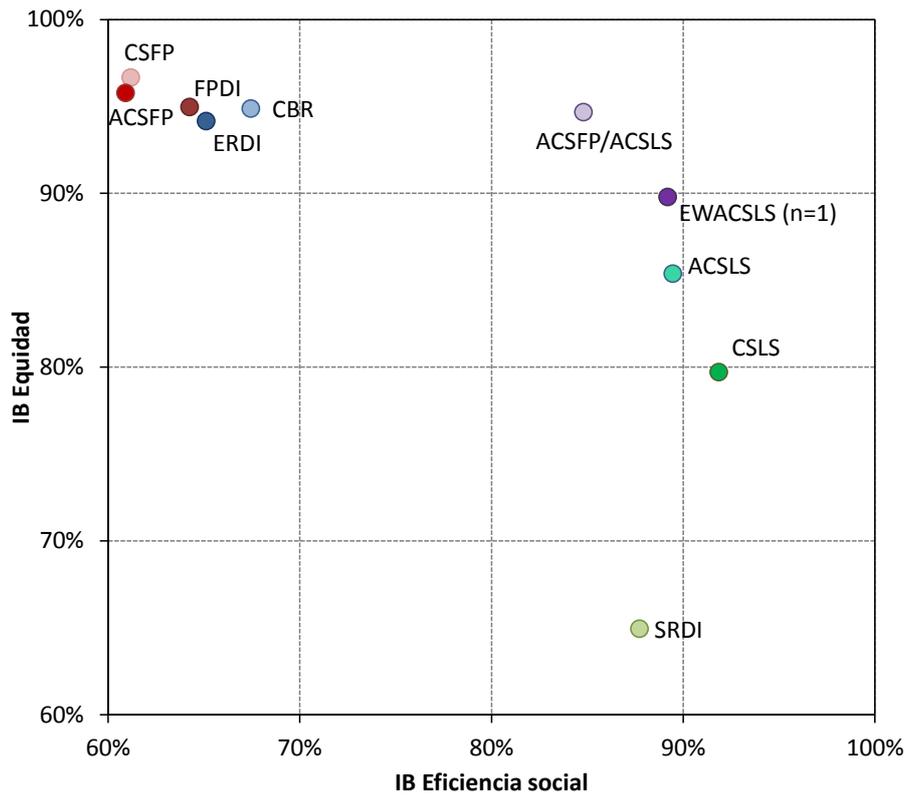


Figura 34: Comparación entre los índices de bondad de eficiencia social y equidad para cada uno de los indicadores de riesgo.

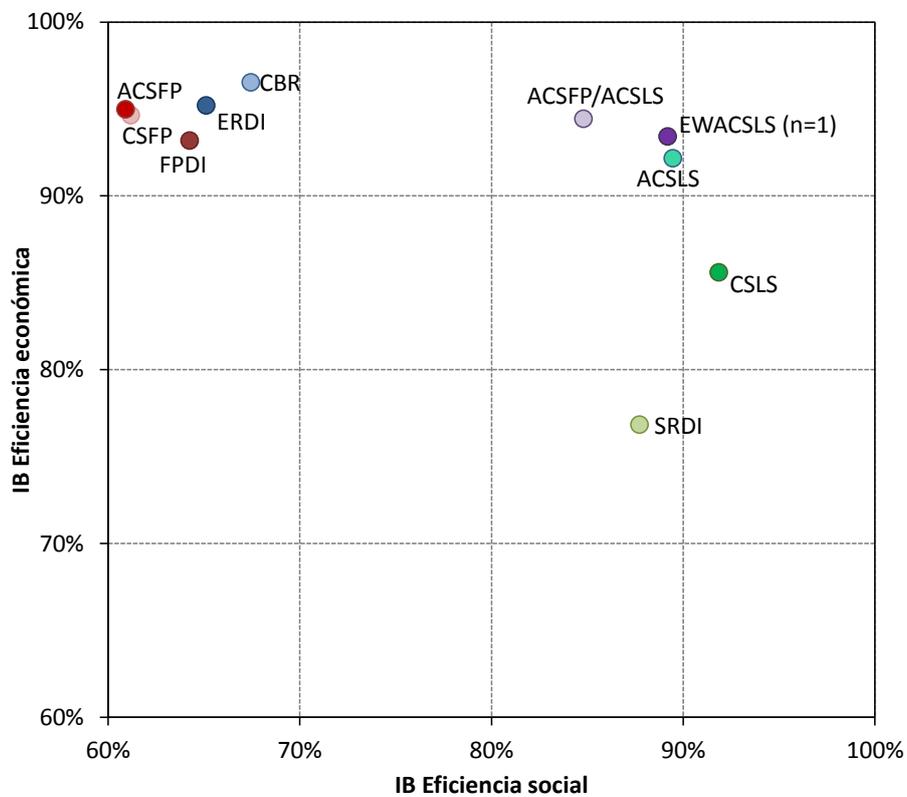


Figura 35: Comparación entre los índices de bondad de eficiencia social y económica para cada uno de los indicadores de riesgo.

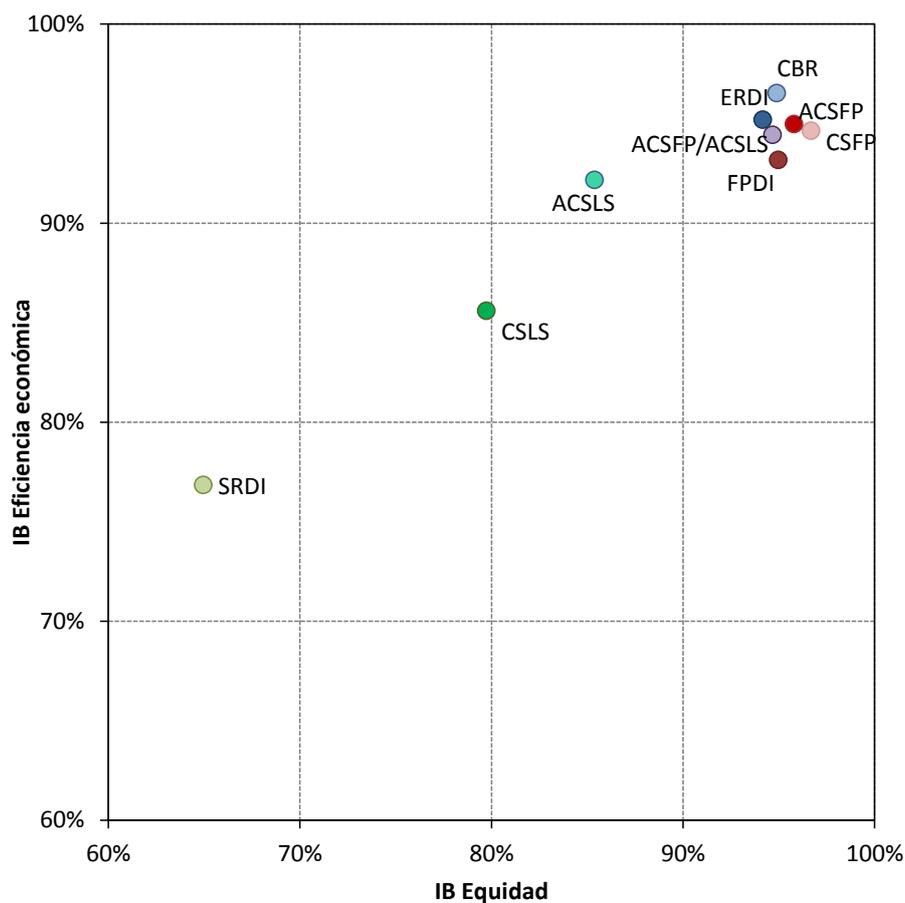


Figura 36: Comparación entre los índices de bondad de equidad y eficiencia económica para cada uno de los indicadores de riesgo.

5.3.4 Análisis detallado de los resultados con el indicador EWACSL

Se ha elegido la secuencia obtenida con el EWACSL y un valor de n de 1 para realizar un análisis más detallado de la secuencia de implementación de medidas. Se ha elegido este indicador porque permite obtener un equilibrio entre eficiencia y equidad. Esta secuencia se encuentra detallada en la Tabla 16 y la Tabla 17.

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo económico (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) | ACSLs (M€) | Cumple tolerabilidad? |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------|-----------------------|
| 0 | - | - | 0.000 | 2.55E-02 | 1.76E+00 | 2.85E-01 | - | - |
| 1 | D | FUSERV | 0.015 | 6.40E-03 | 9.61E-01 | 2.66E-01 | <0 | NO |
| 2 | O | COMP | 0.144 | 5.22E-03 | 3.32E-01 | 1.72E-01 | <0 | NO |
| 3 | Q | RESG | 0.144 | 4.95E-03 | 3.11E-01 | 1.24E-01 | <0 | NO |
| 4 | A | VACIO | 0.144 | 4.42E-03 | 3.03E-01 | 6.68E-02 | <0 | NO |
| 5 | O | RESG | 0.145 | 4.26E-03 | 2.20E-01 | 5.54E-02 | <0 | NO |
| 6 | E | COMP | 0.183 | 2.22E-03 | 1.67E-01 | 5.53E-02 | <0 | NO |
| 7 | Z | PRET | 0.194 | 1.73E-03 | 1.47E-01 | 5.53E-02 | <0 | NO |
| 8 | I | RESG | 0.194 | 1.72E-03 | 1.46E-01 | 5.39E-02 | <0 | NO |
| 9 | Q | PRE | 0.202 | 1.68E-03 | 1.43E-01 | 4.66E-02 | 0.65 | NO |
| 10 | J | EH | 0.224 | 1.67E-03 | 1.42E-01 | 3.22E-02 | 1.44 | NO |
| 11 | O | ALIV | 0.324 | 1.54E-03 | 7.58E-02 | 2.12E-02 | 3.06 | NO |
| 12 | I | PRE | 0.329 | 1.53E-03 | 7.50E-02 | 1.96E-02 | 2.44 | NO |
| 13 | R | AUS | 0.333 | 1.53E-03 | 7.47E-02 | 1.92E-02 | 10.09 | SI |
| 14 | R | GRU | 0.335 | 1.53E-03 | 7.45E-02 | 1.90E-02 | 10.95 | SI |
| 15 | J | DREN | 0.376 | 1.53E-03 | 7.44E-02 | 1.64E-02 | 15.76 | NO |
| 16 | O | PEP | 0.435 | 1.53E-03 | 7.44E-02 | 1.35E-02 | 20.29 | NO |
| 17 | Q | DF | 0.441 | 1.53E-03 | 7.43E-02 | 1.32E-02 | 20.70 | NO |
| 18 | A | PEP | 0.520 | 1.53E-03 | 7.43E-02 | 9.81E-03 | 23.14 | NO |
| 19 | C | INYCIM | 0.525 | 1.53E-03 | 7.34E-02 | 9.68E-03 | 27.65 | SI |
| 20 | C | INYCU | 0.525 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 9.65E-03 | 26.73 | SI |
| 21 | Q | PEP | 0.612 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 7.13E-03 | 34.60 | NO |
| 22 | O | PFC | 0.643 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 6.31E-03 | 36.65 | NO |
| 23 | Q | PFC | 0.687 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 5.32E-03 | 44.38 | NO |
| 24 | A | PFC | 0.727 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 4.53E-03 | 50.54 | SI |
| 25 | G | PEP | 0.779 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 3.66E-03 | 60.67 | NO |
| 26 | C | COMP | 0.809 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 3.26E-03 | 70.48 | SI |
| 27 | U | PEP | 0.869 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 2.88E-03 | 157.2 | SI |
| 28 | B | EIDC | 1.020 | 9.67E-04 | 6.80E-02 | 2.73E-03 | 992.3 | NO |
| 29 | U | PFC | 1.050 | 9.67E-04 | 6.80E-02 | 2.61E-03 | 232.6 | SI |
| 30 | G | PFC | 1.076 | 9.67E-04 | 6.80E-02 | 2.50E-03 | 250.7 | SI |
| 31 | Z | AUS | 1.089 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 2.47E-03 | 386.1 | SI |
| 32 | R | PEP | 1.169 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 2.29E-03 | 450.4 | SI |
| 33 | B | PEP | 1.267 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 2.07E-03 | 451.6 | SI |
| 34 | B | PFC | 1.317 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.95E-03 | 398.2 | SI |
| 35 | T | PEP | 1.357 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.88E-03 | 621.6 | NO |
| 36 | R | PFC | 1.398 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.82E-03 | 687.7 | SI |
| 37 | P | PEP | 1.445 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.76E-03 | 733.8 | SI |
| 38 | H | PFC | 1.475 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.72E-03 | 762.9 | SI |
| 39 | J | PEP | 1.525 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.66E-03 | 778.6 | SI |
| 40 | T | PFC | 1.545 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.63E-03 | 848.7 | NO |
| 41 | P | PFC | 1.569 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.61E-03 | 943.2 | SI |
| 42 | E | CUEN | 1.600 | 6.31E-04 | 5.91E-02 | 1.60E-03 | 3500 | NO |
| 43 | Y | PEP | 1.651 | 6.31E-04 | 5.91E-02 | 1.56E-03 | 1300 | SI |
| 44 | Z | DREN | 1.656 | 5.81E-04 | 5.70E-02 | 1.56E-03 | 1324 | SI |

Tabla 16: Primera parte de la secuencia de implementación de medidas obtenida con el indicador EWACSLs y un valor del parámetro n de 1.

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo económico (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) | ACSLs (M€) | Cumple tolerabilidad? |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------|-----------------------|
| 45 | A | AUS | 1.661 | 5.81E-04 | 5.70E-02 | 1.56E-03 | 1547 | SI |
| 46 | T | ALIV | 1.829 | 4.87E-04 | 4.98E-02 | 1.50E-03 | 3024 | NO |
| 47 | A | LALIV | 1.971 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.43E-03 | 1859 | SI |
| 48 | C | PEP | 2.052 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.38E-03 | 1906 | SI |
| 49 | C | PFC | 2.093 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.36E-03 | 1652 | SI |
| 50 | Y | PFC | 2.119 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.35E-03 | 2520 | SI |
| 51 | X | PEP | 2.155 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.34E-03 | 3470 | SI |
| 52 | X | PFC | 2.174 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.33E-03 | 3714 | SI |
| 53 | Z | PEP | 2.239 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.32E-03 | 5627 | SI |
| 54 | V | AUS | 2.294 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 | 15692 | SI |
| 55 | Z | PFC | 2.327 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 | 21638 | SI |
| 56 | I | DFI | 2.338 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 | 26923 | SI |
| 57 | K | COMP | 2.367 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.31E-03 | 29501 | SI |
| 58 | H | PIL | 3.394 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 77981 | SI |
| 59 | F | PEP | 3.411 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 1.22E+05 | SI |
| 60 | W | AUS | 3.417 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 1.97E+05 | SI |
| 61 | P | INY | 3.429 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 2.43E+05 | SI |
| 62 | X | DF | 3.515 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 2.67E+05 | SI |
| 63 | V | PEP | 3.580 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 4.43E+05 | SI |
| 64 | V | PFC | 3.613 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 3.37E+05 | SI |
| 65 | I | ALIV | 3.640 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 5.47E+05 | SI |
| 66 | Y | DC1 | 3.644 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 5.60E+05 | SI |
| 67 | K | PEP | 3.677 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 6.72E+05 | SI |
| 68 | N | PEP | 3.712 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 8.07E+05 | SI |
| 69 | N | PFC | 3.729 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 3.51E+05 | SI |
| 70 | K | PFC | 3.746 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 9.95E+05 | SI |
| 71 | F | DREN | 3.786 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 1.37E+06 | SI |
| 72 | Z | ALIV | 3.828 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 1.39E+06 | SI |
| 73 | G | INY | 3.834 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 9.05E+06 | SI |
| 74 | M | COMP | 3.855 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 1.12E+07 | SI |
| 75 | T | AUS | 3.860 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 1.78E+07 | SI |
| 76 | I | PEP | 3.908 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 1.14E+08 | SI |
| 77 | I | PFC | 3.932 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 1.13E+08 | SI |
| 78 | W | PEP | 3.985 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 3.17E+08 | SI |
| 79 | W | PFC | 4.011 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 3.13E+08 | SI |
| 80 | F | EH | 4.187 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 1.12E+09 | SI |
| 81 | M | PEP | 4.256 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 1.65E+09 | SI |
| 82 | M | PFC | 4.291 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 1.95E+09 | SI |
| 83 | M | INY | 4.297 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | 8.03E+10 | SI |
| 84 | S | DF | 4.301 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | INF | SI |
| 85 | S | PEP | 4.336 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | INF | SI |
| 86 | S | PFC | 4.353 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | INF | SI |
| 87 | L | PFC | 4.393 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | INF | SI |
| 88 | U | DC | 4.439 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 | INF | SI |

Tabla 17: Segunda parte de la secuencia de implementación de medidas obtenida con el indicador EWACSLs y un valor del parámetro n de 1.

En el Apartado A2.1 se encuentra la correspondencia entre los códigos utilizados en las tablas anteriores y cada una de las medidas. En total la secuencia tiene 88 medidas, ya que hay 7 medidas que han sido descartadas debido a las restricciones eliminativas. En las tablas anteriores se puede observar que a partir del paso 46 todas las medidas pasan a cumplir las recomendaciones de tolerabilidad excepto la medida E. Aunque estas recomendaciones no se aplican a esta presa como se explica en el Apartado 5.2. Además, en estas tablas también se muestra el valor del ACSLS. Como se puede

observar, el valor de este indicador es en general creciente según avanza la secuencia, es decir, cada vez las medidas implantadas son menos eficientes.

Además, cuando todas las presas cumplen las recomendaciones de tolerabilidad, es necesario analizar el valor del ACSLS para ver cuando las medidas propuestas están justificadas según el principio ALARP. En el Apartado 3.3.2 se han traducido al caso español los valores del ACSLS recomendados por el ANCOLD [1] para la justificación de medidas. Estos valores han sido representados gráficamente junto a la variación del ACSLS, obteniendo el gráfico que se muestra en la Figura 37.

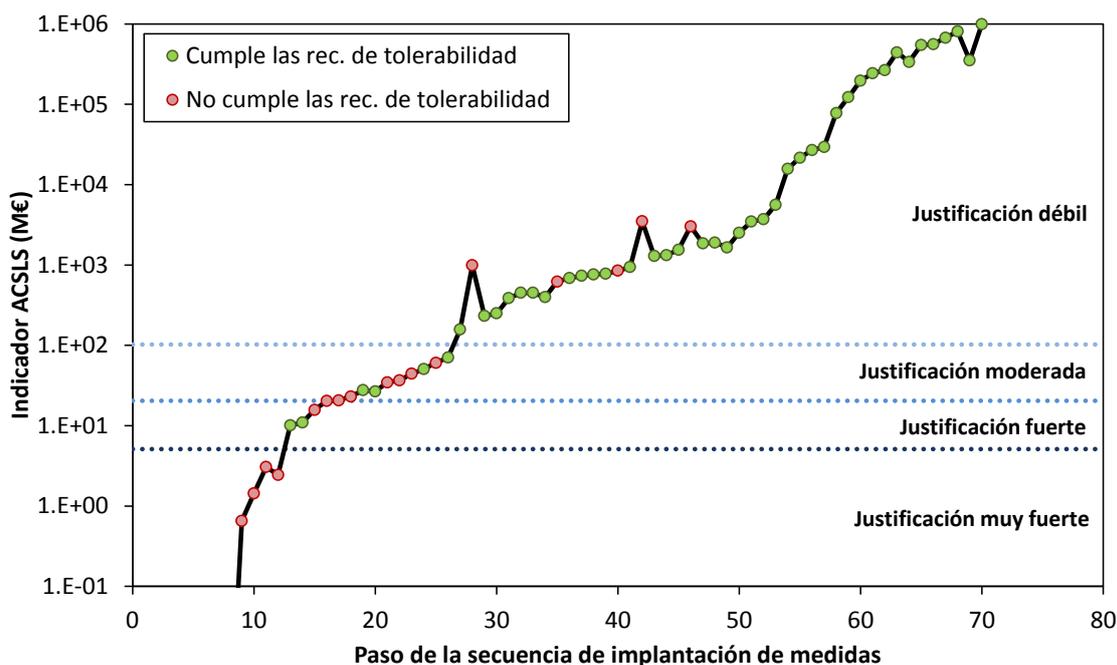


Figura 37: Variación del valor del ACSLS a lo largo de la secuencia de implementación de medidas.

A partir de este resultado podemos concluir que las medidas sobre presas que no cumplen las recomendaciones de tolerabilidad están justificadas para poder cumplir estas recomendaciones. La justificación de las medidas sobre presas que sí que cumplen estas restricciones (medidas en verde) depende del valor del ACSLS, tal y como se muestra en la Figura 37.

Con el fin de analizar detalladamente los resultados obtenidos con el indicador EWACSLs, se han obtenido diferentes secuencias de implementación de medidas para diferentes valores del parámetro n. En el Anejo 4 se muestran los resultados obtenidos para diferentes secuencias de implementación de medidas. Además, en la Figura 38, en la Figura 39 y en la Figura 40 se muestra como son las secuencias de implementación en los gráficos de variación de eficiencia social, eficiencia económica y equidad para los diferentes valores de n.

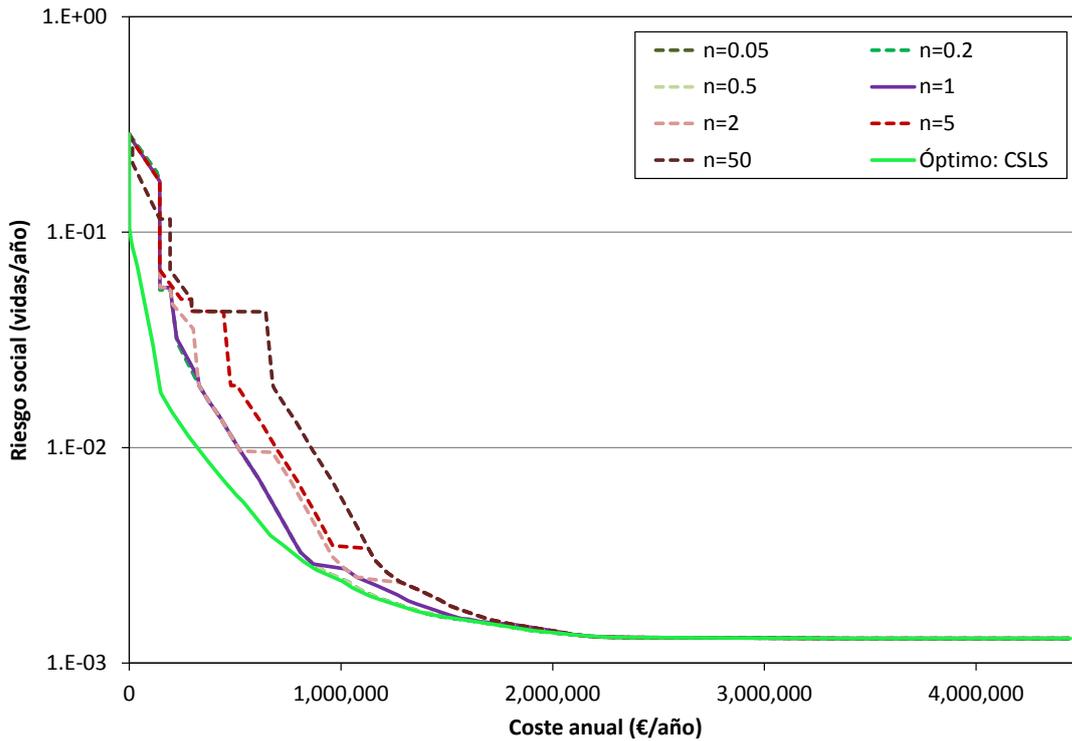


Figura 38: Secuencias de implementación para diferentes valores de n en el gráfico de variación del principio de eficiencia social.

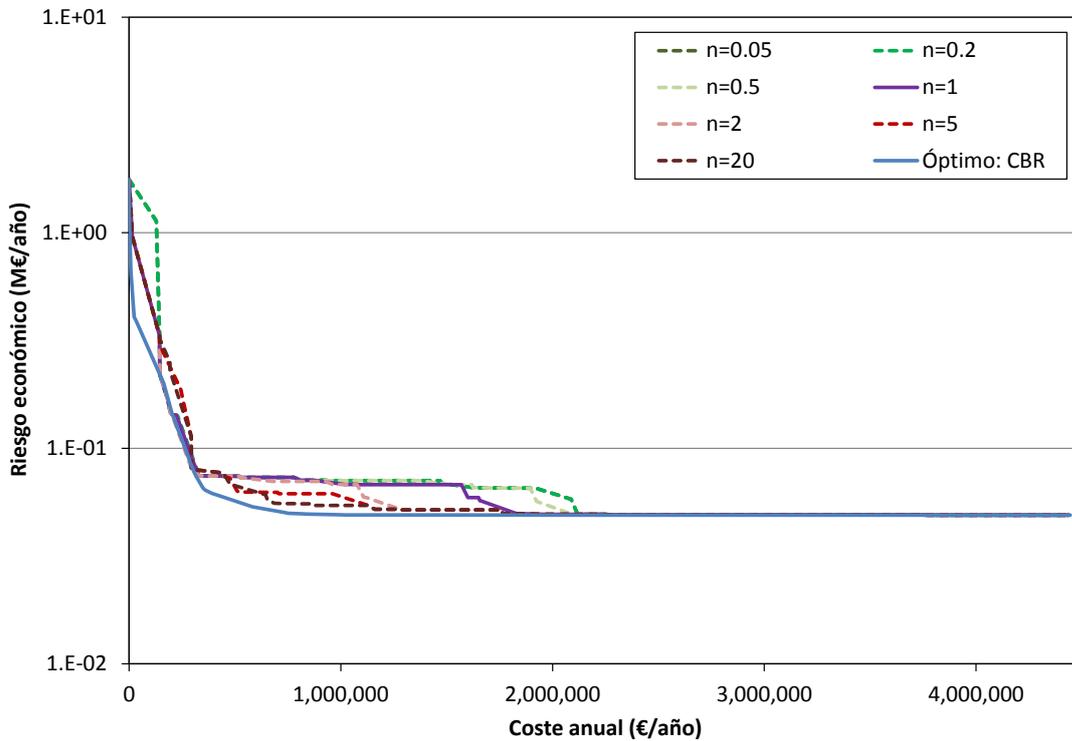


Figura 39: Secuencias de implementación para diferentes valores de n en el gráfico de variación del principio de eficiencia económica.

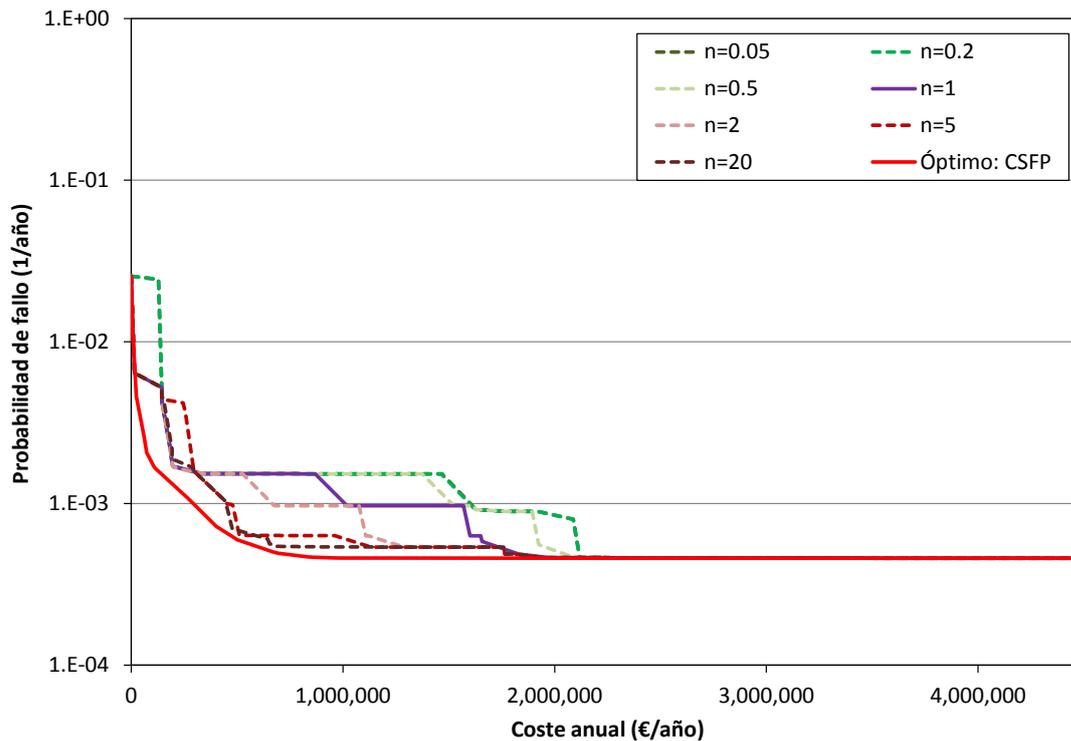


Figura 40: Secuencias de implementación para diferentes valores de n en el gráfico de variación del principio de equidad.

En la Tabla 18 se muestran los resultados de índices de bondad obtenidos para los principios de priorización planteados.

| Valor de n | IB Eficiencia econ. | IB Eficiencia social | IB Equidad |
|--------------|---------------------|----------------------|------------|
| 0.05 | 92.3% | 89.5% | 86.1% |
| 0.1 | 92.3% | 89.5% | 86.1% |
| 0.2 | 92.3% | 89.5% | 86.1% |
| 0.33 | 92.8% | 89.5% | 87.6% |
| 0.5 | 92.8% | 89.4% | 87.7% |
| 0.75 | 93.3% | 89.2% | 89.5% |
| 1 | 93.4% | 89.2% | 89.8% |
| 1.5 | 93.9% | 88.9% | 90.7% |
| 2 | 94.3% | 88.2% | 92.1% |
| 3 | 94.2% | 87.6% | 92.3% |
| 5 | 94.5% | 86.8% | 93.5% |
| 10 | 94.8% | 85.6% | 93.9% |
| 20 | 94.7% | 85.0% | 94.3% |

Tabla 18: Resultados del índice de bondad con el indicador EWACSLs y diferentes valores del parámetro n para los dos principios de priorización introducidos.

Como se puede observar en esta tabla, los valores de n altos producen mejores resultados del índice de equidad, mientras que los valores bajos priorizan la eficiencia social. La eficiencia económica aumenta ligeramente con el valor de n , esto es debido a dos efectos contrapuestos:

- Si el valor de n es menor, es más importante el ACSLS en la priorización y éste tiene en cuenta la eficiencia económica al utilizar costes ajustados.
- Si el valor de n es mayor, predomina la equidad, que también produce una buena eficiencia económica por el tipo de medidas analizadas, como se explica en el apartado anterior.

En cualquier caso, los valores del índice de bondad de la eficiencia económica son muy buenos independientemente del valor de n . En la Figura 33 se muestra gráficamente cómo varía el índice de bondad de cada principio para los diferentes valores del parámetro n .

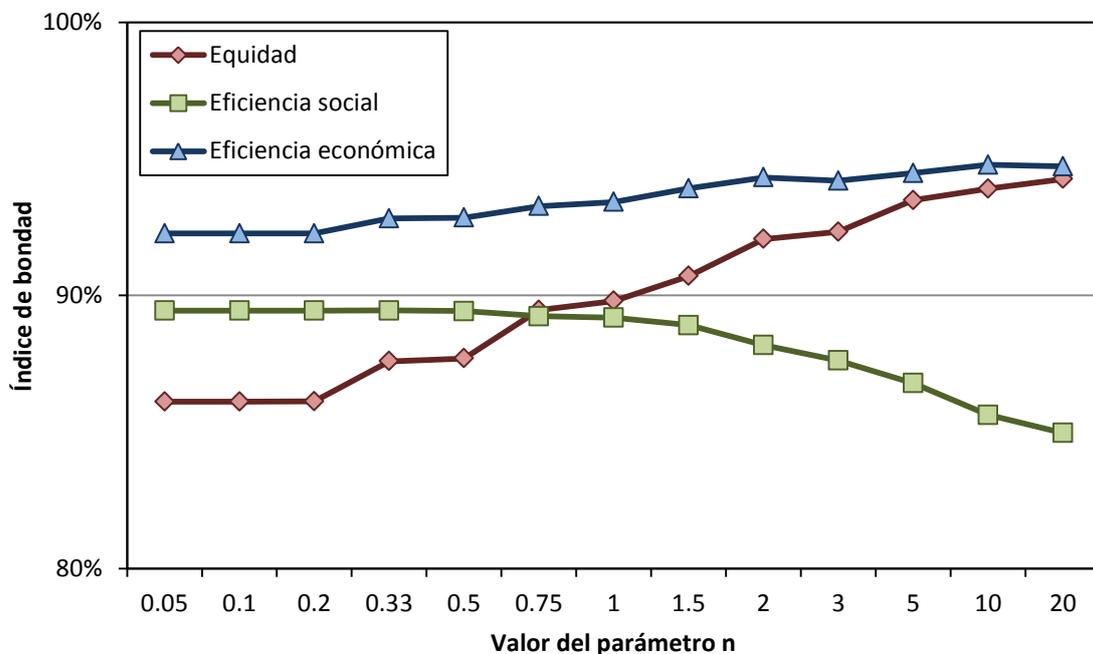


Figura 41: Variación de los índices de bondad para diferentes valores del parámetro n .

Con el fin de comparar gráficamente como se combinan los principios de eficiencia social y equidad según el valor del parámetro n , se han representado los índices de bondad obtenidos para los dos principios, como se muestra en la Figura 34. Además, en la Figura 43 se comparan los índices de bondad de la eficiencia económica y la eficiencia social.

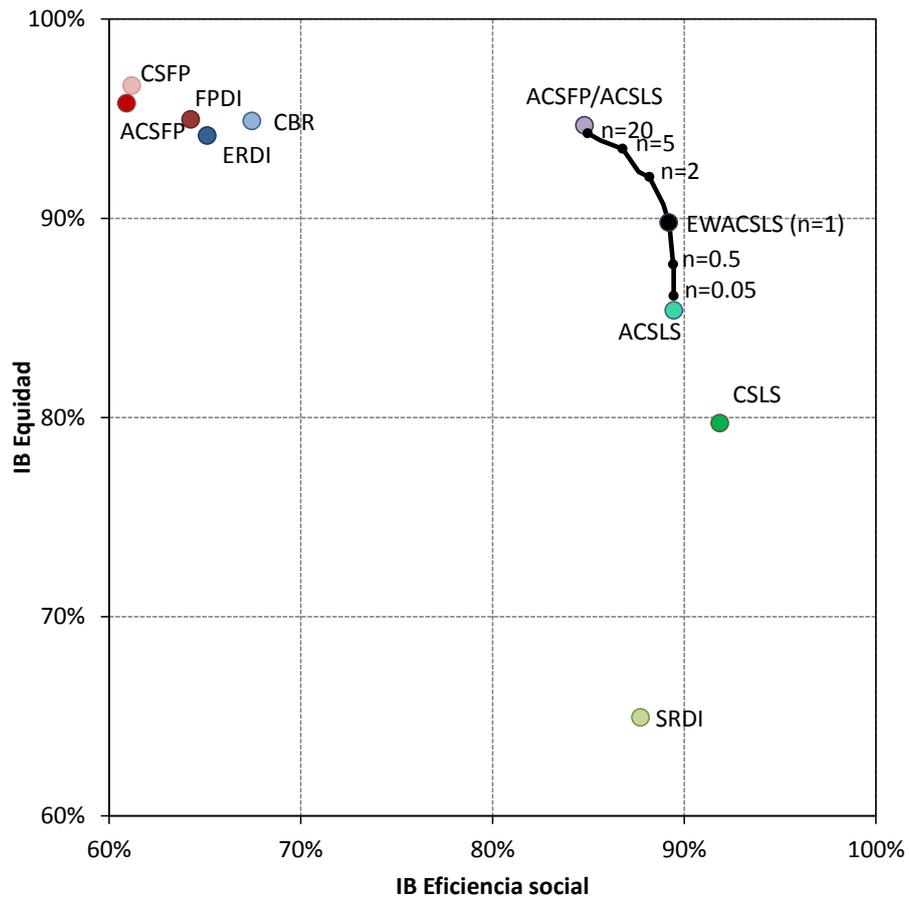


Figura 42: Comparación entre los índices de bondad de eficiencia y equidad para cada uno de los indicadores de riesgo.

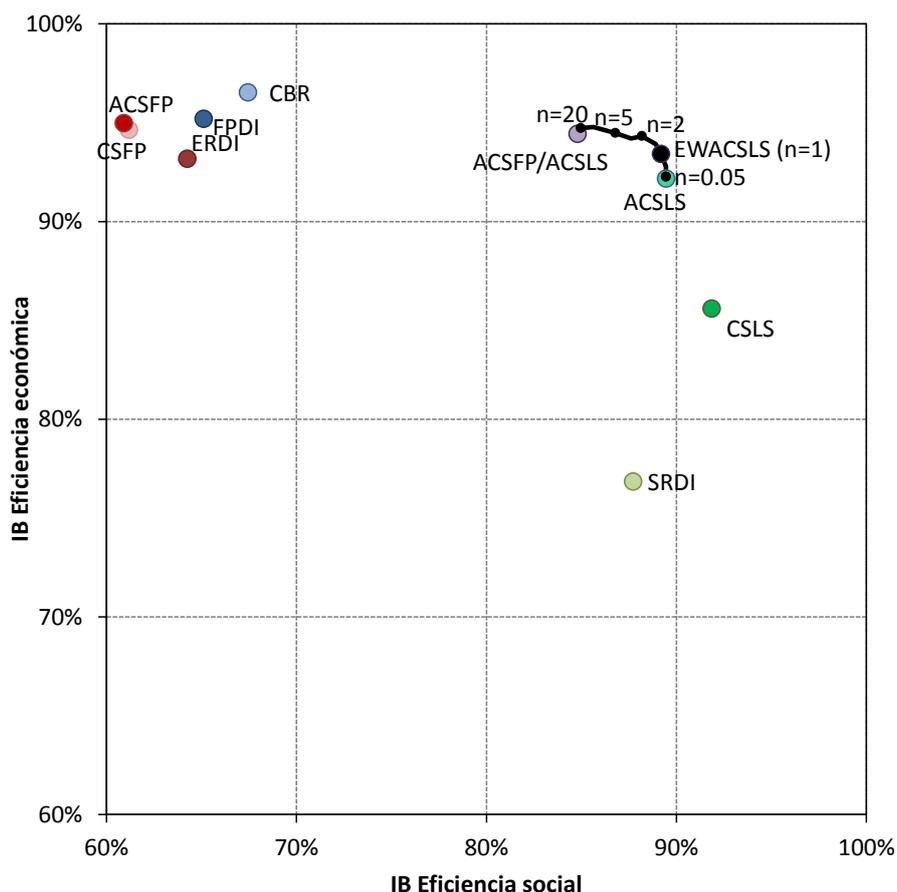


Figura 43: Comparación entre los índices de bondad de eficiencia social y eficiencia económica para cada uno de los indicadores de riesgo.

El indicador EWACSLs es una buena opción como criterio de priorización de medidas, ya que permite combinar de forma equitativa los criterios de eficiencia y equidad con valores de los índices de bondad cercanos a la unidad para ambos principios.

Además, como se puede observar en los gráficos anteriores, el indicador EWACSLs permite variar la secuencia de implementación de medidas entre los principios de eficiencia y equidad gracias al parámetro n , obteniendo valores cercanos a los óptimos de los indicadores de bondad. A efectos prácticos, el indicador EWACSLs varía entre el ACSLS y la combinación del ACSFP/ACSLs en función del valor de n , lo que es lógico debido a su estructura.

Por último, este indicador permite introducir de forma sencilla el funcionamiento en dos etapas, ya que solo tiene en cuenta el principio de equidad cuando la probabilidad de fallo de alguna presa está por encima de 10^{-4} .

5.4 Resultados de implementación de medidas en el tiempo

Por último, se ha aplicado la herramienta desarrollada para priorización en el tiempo al caso de estudio para realizar un análisis preliminar que defina una secuencia de implantación de medidas en el tiempo.

En primer lugar, se ha asignado un plazo de implementación a cada una de las medidas planteadas. Estos tiempos son una primera aproximación a los plazos de implantación necesarios. Para un análisis más detallado, sería necesario estimar este plazo para cada una de las medidas. En la Tabla 19 se muestran los tiempos utilizados para el cálculo según el tipo de medida.

| Medida | Tiempo(años) |
|--|--------------|
| Plan de Emergencia | 3 |
| Plan de Formación Continua | 2 |
| Impermeabilización de paramento | 1.5 |
| Mejora de auscultación | 1 |
| Pantalla central impermeable | 4 |
| Construcción de nuevo desagüe de fondo | 3 |
| Puesta en fuera de servicio | 2 |
| Inyecciones en cuerpo de presa o cimiento | 1 |
| Vaciado del embalse | 2 |
| Rebaje del labio del aliviadero | 5 |
| Mantener compuertas abiertas | 0.5 |
| Mejora de fiabilidad de órganos de desagüe | 1 |
| Reparación de dique de collado | 4 |
| Reparación de cuenco amortiguador | 4 |
| Rehabilitación del sistema de drenaje | 2 |
| Encepado de micropilotes en Castrovido | 3 |
| Reforma del aliviadero | 3 |
| Implantación de resguardos | 1 |
| Reparación del pretil de coronación | 2 |

Tabla 19: Resumen restricciones introducidas en los 26 modelos de riesgo.

Con el fin de realizar un primer análisis se ha utilizado un horizonte de decisión de 3 años y un presupuesto anual para medidas de reducción de riesgo de 0.5 M€. Además, como criterio de priorización se ha buscado en cada intervalo de tiempo la combinación de medidas que produce un riesgo social más bajo.

En este caso, se plantea una priorización con 95 medidas diferentes, esto hace un total de 2^{95} posibles combinaciones de medidas. Evaluar todas estas combinaciones en cada

paso es imposible por los elevados tiempos de cálculo. Por este motivo, se ha planteado una restricción de medidas máximas anuales de 4 y un número de medidas de margen para el análisis de 3, siguiendo el procedimiento indicado en el Apartado 4.5. Estos valores han sido fijados tras diversos cálculos iniciales para conseguir unos tiempos de cálculo razonables y evitar que estas restricciones produzcan modificaciones importantes sobre la secuencia medidas. La secuencia de implantación de medidas obtenida se muestra en la Tabla 20 y la Figura 44.

| Paso | Tiempo (años) | Medidas | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|---------------|--|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | 0 | - | 0.000 | 2.548E-02 | 1.762E+00 | 2.847E-01 |
| 1 | 3 | A:VACIO_Q:PRE_O:PEP_D:FUSERV_J:DREN | 0.123 | 5.583E-03 | 9.294E-01 | 5.499E-02 |
| 2 | 6 | O:PFC_A:PEP_I:PRE_J:EH_Q:RESG_O:RESG | 0.260 | 4.533E-03 | 4.013E-01 | 1.218E-02 |
| 3 | 9 | Q:PEP_G:PEP_A:PFC_C:INYCIM | 0.444 | 4.532E-03 | 4.005E-01 | 7.700E-03 |
| 4 | 12 | Q:PFC_R:PEP_C:COMP_G:PFC | 0.625 | 4.530E-03 | 3.983E-01 | 5.607E-03 |
| 5 | 15 | U:PEP_B:PEP_R:PFC_R:AUS | 0.827 | 4.530E-03 | 3.980E-01 | 4.747E-03 |
| 6 | 18 | B:PFC_U:PFC_P:PEP_J:PEP_Z:PEP_R:GRU_Q:DF | 1.078 | 4.528E-03 | 3.977E-01 | 4.179E-03 |
| 7 | 21 | Y:PEP_T:PEP_P:PFC_C:INYCU_Z:PRET_X:PEP | 1.241 | 4.031E-03 | 3.771E-01 | 3.999E-03 |
| 8 | 24 | C:PEP_Y:PFC_I:RESG_T:PFC_Z:AUS_X:PFC | 1.400 | 4.031E-03 | 3.769E-01 | 3.900E-03 |
| 9 | 27 | C:PFC_E:COMP_V:AUS_H:PFC_Z:PFC_A:AUS | 1.601 | 1.993E-03 | 3.236E-01 | 3.802E-03 |
| 10 | 30 | K:COMP_Z:DREN_I:ALIV_P:INY | 1.674 | 1.943E-03 | 3.215E-01 | 3.800E-03 |
| 11 | 33 | F:DREN_V:PEP_K:PEP | 1.812 | 1.943E-03 | 3.215E-01 | 3.799E-03 |
| 12 | 36 | V:PFC_N:PEP_Z:ALIV_W:AUS_K:PFC_I:DFI | 1.956 | 1.943E-03 | 3.215E-01 | 3.799E-03 |
| 13 | 39 | N:PFC_Y:DC1_M:COMP_G:INY_I:PEP_T:AUS | 2.057 | 1.943E-03 | 3.215E-01 | 3.799E-03 |
| 14 | 42 | X:DF_I:PFC | 2.167 | 1.942E-03 | 3.215E-01 | 3.799E-03 |
| 15 | 45 | W:PEP_M:PEP_F:PEP | 2.306 | 1.942E-03 | 3.215E-01 | 3.799E-03 |
| 16 | 48 | W:PFC_M:PFC_M:INY_S:PEP | 2.408 | 1.942E-03 | 3.215E-01 | 3.799E-03 |
| 17 | 51 | S:DF | 2.412 | 1.942E-03 | 3.215E-01 | 3.799E-03 |
| 18 | 54 | O:COMP_L:PFC | 2.581 | 1.598E-03 | 1.349E-01 | 2.111E-03 |
| 19 | 57 | F:EH_S:PFC | 2.775 | 1.598E-03 | 1.349E-01 | 2.111E-03 |
| 20 | 60 | U:DC | 2.820 | 1.598E-03 | 1.349E-01 | 2.111E-03 |
| 21 | 64 | E:CUEN | 2.852 | 1.262E-03 | 1.263E-01 | 2.104E-03 |
| 22 | 68 | B:EIDC | 3.002 | 7.039E-04 | 1.232E-01 | 2.027E-03 |
| 23 | 73 | O:ALIV | 3.102 | 5.778E-04 | 5.667E-02 | 1.443E-03 |
| 24 | 78 | A:LALIV | 3.244 | 5.530E-04 | 5.628E-02 | 1.367E-03 |
| 25 | 84 | T:ALIV | 3.413 | 4.591E-04 | 4.905E-02 | 1.314E-03 |
| 26 | 126 | H:PIL | 4.439 | 4.590E-04 | 4.900E-02 | 1.301E-03 |

Tabla 20: Tabla con la secuencia de medidas obtenida minimizando el riesgo social en cada intervalo para un horizonte de decisión de 3 años y un presupuesto anual de 0.5 M€.

En el Apartado A2.1 se encuentra la correspondencia entre los códigos utilizados en la tabla anterior y cada una de las medidas propuestas.

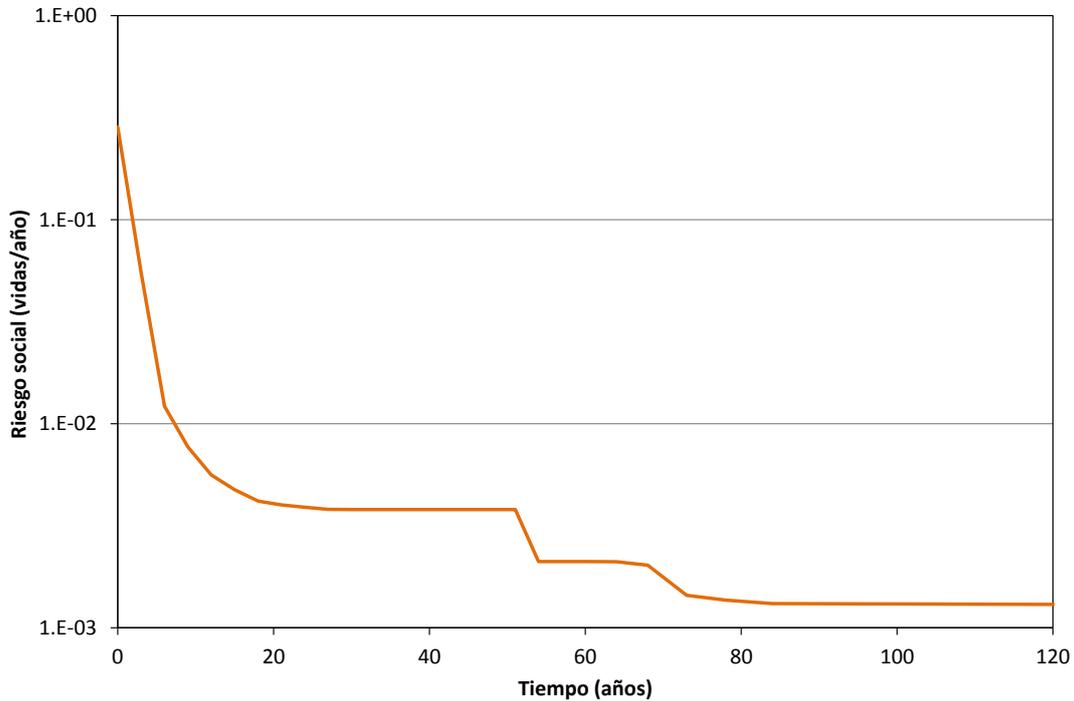


Figura 44: Gráfico de variación en el tiempo de la secuencia de medidas obtenida minimizando el riesgo social en cada intervalo para un horizonte de decisión de 3 años y un presupuesto anual de 0.5 M€.

Como se puede observar en esta figura, en los primeros años se produce la mayor reducción del riesgo, siendo luego mucho menor a partir de los 20 años. En el Anejo 5 se muestran los resultados detallados de esta secuencia.

El siguiente paso ha sido analizar como el horizonte de decisión afecta a los resultados. Para ello, se han obtenido cinco secuencias de implementación de medidas diferentes variando el horizonte de decisión de 1 a 5 años y manteniendo fijos el resto de parámetros. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 45. Como se muestra en esta figura, el horizonte de decisión tiene una importante influencia en los resultados, produciendo diferentes secuencias de implementación que se van cruzando a lo largo del tiempo. A partir de un plazo de unos 20 años parece que el horizonte de decisión mayor (5 años) es que el que produce mejores resultados. Los resultados detallados de cada secuencia se encuentran en el Anejo 5.

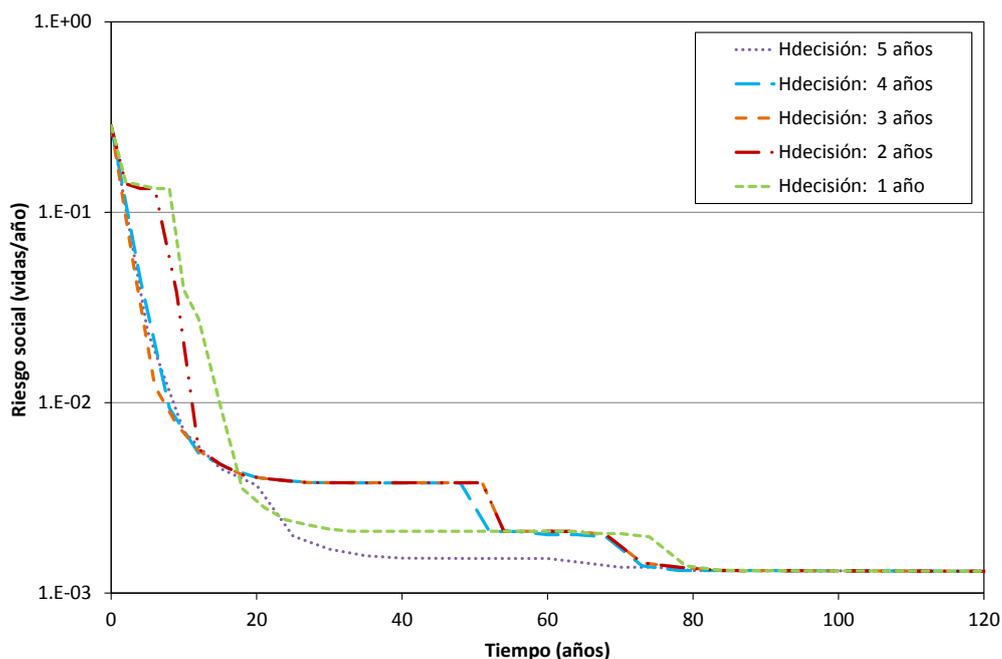


Figura 45: Secuencias de medidas obtenidas minimizando el riesgo social para diferentes horizontes de decisión y un presupuesto anual de 0.5 M€.

Además, para un horizonte de decisión de 3 años, se ha analizado como varían los resultados al variar el presupuesto máximo anual para la implantación de medidas. Los resultados se muestran en la Figura 44.

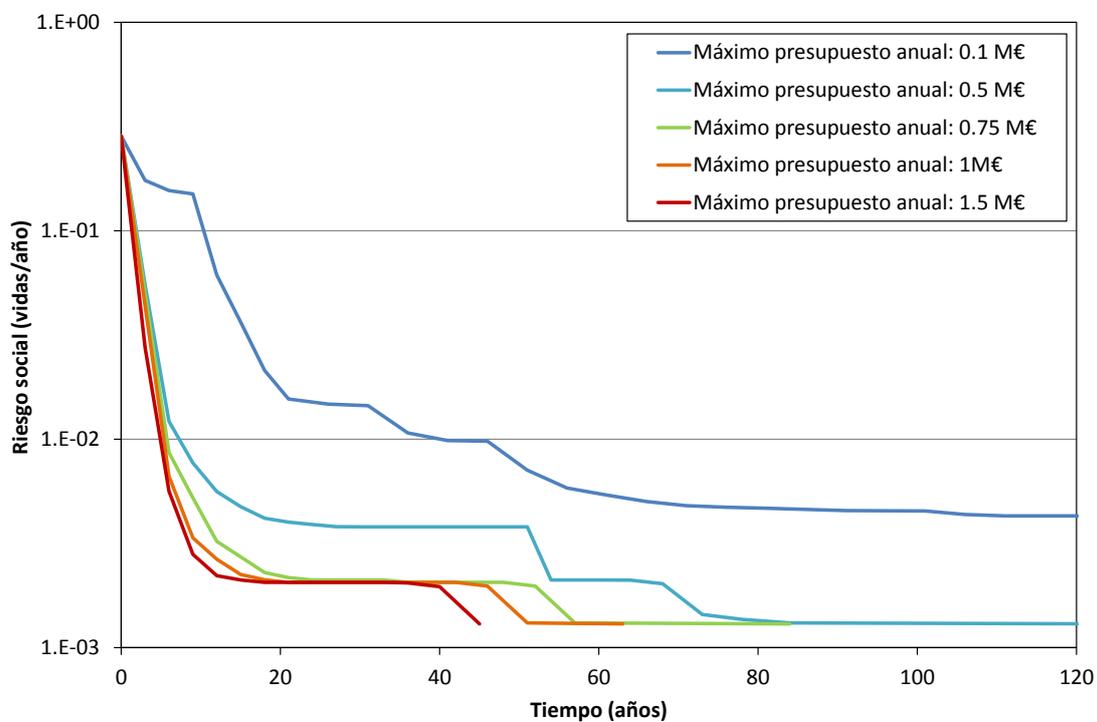


Figura 46: Secuencias de medidas obtenidas minimizando el riesgo social para un horizonte de decisión de 3 años y diferentes presupuestos máximos anuales.

Como se puede observar en el gráfico anterior, un mayor presupuesto anual permite implantar las medidas más rápido, obteniendo grandes diferencias en el tiempo necesario para implantar todas las medidas. Los resultados detallados de cada secuencia se encuentran en el Anejo 5.

Por último, se ha analizado como varía la secuencia de implantación obtenida intentando minimizar en cada paso la probabilidad de fallo en lugar del riesgo social. El resultado obtenido se muestra en la Figura 47. Como se puede observar, el criterio de reducir el riesgo social produce que éste disminuya mucho más rápido.

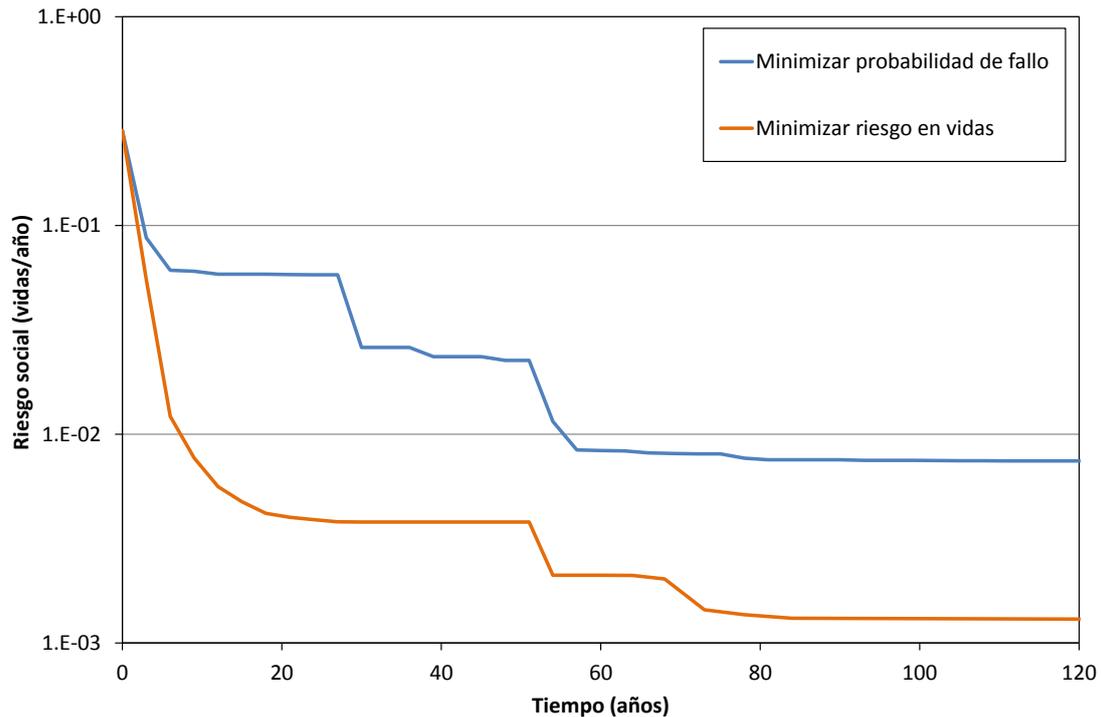


Figura 47: Secuencias de medidas obtenidas minimizando el riesgo social y la probabilidad de fallo para un horizonte de decisión de 3 años y un presupuesto máximo anual de 0.5 M€.

En conclusión, en este apartado se presenta una primera aproximación a la obtención de secuencias de implementación de medidas de reducción de riesgo para este grupo de presas. En futuras investigaciones, sería recomendable desarrollar más la metodología de cálculo para poder realizar un análisis más detallado de los procedimientos de decisión y ejecución de medidas. Además, también sería recomendable el desarrollo de índices de bondad en el tiempo que permitan analizar las secuencias obtenidas.

Por último, respecto a las restricciones utilizadas para disminuir los tiempos de cálculo, cabe destacar que en ningún paso de ninguna de las secuencias obtenidas el número de medidas llega a alcanzar el número máximo de medidas definido, ya que existe una restricción mayor debido al presupuesto disponible. Esto implica que esta restricción permite disminuir los tiempos de cálculo pero no afecta a los resultados.

6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En este trabajo se explica cómo se ha desarrollado una herramienta que permite gestionar actuaciones de seguridad en grupos de presas de forma continua. Las diferentes medidas se priorizan a partir de diferentes indicadores de riesgo, obtenidos a partir de los resultados de un proceso de Análisis de Riesgo en cada una de las presas. Respecto a la **revisión bibliográfica** realizada, las principales conclusiones alcanzadas son:

- El Análisis de Riesgo es una metodología clara, defendible y sistemática que permite apoyar la toma de decisiones para la mejora de la seguridad en presas.
- Los principales organismos internacionales relacionados con las presas recomiendan utilizar esta metodología para justificar la implantación de medidas de mejora de la seguridad.
- En la gestión real de actuaciones en seguridad de presas pueden aparecer numerosos factores administrativos, sociales y económicos que condicionen la toma de decisiones. Los itinerarios de implantación de medidas basados en los resultados de riesgo suponen una información adicional para la toma de decisiones, pero no tienen por qué ser seguidos detalladamente.
- Cabe destacar que el proceso de Análisis de Riesgo es un proceso continuo, por lo que los datos del modelo de riesgo deben ser continuamente actualizados para representar lo más fielmente posible la situación de la presa.

Respecto al **planteamiento conceptual** de los indicadores de riesgo y su utilización como criterios de priorización, las principales conclusiones alcanzadas son:

- Según el indicador de riesgo elegido como criterio de priorización, puede definirse qué principios de priorización van a predominar para definir la secuencia de implantación de medidas.
- Los principios de priorización predominantes en la gestión de la seguridad de presa son la eficiencia y la equidad. Estos dos principios pueden entrar en conflicto, por lo que es conveniente utilizar indicadores de riesgo que permitan realizar un equilibrio entre ellos.
- El indicador EWACSLs permite obtener una secuencia de priorización equilibrada entre eficiencia y equidad. Además, gracias a su estructura, se pueden obtener diversas secuencias variando entre ambos principios.
- En cualquier caso, el indicador elegido para priorizar medidas será el que mejor se ajuste a los valores y objetivos del gestor de las presas.

Respecto a la **herramienta desarrollada** para la gestión continua de actuaciones en seguridad de presas, cabe destacar que:

- Se trata de una herramienta rápida y eficiente, con una interfaz sencilla y clara, que permite obtener secuencias de implementación de medidas a partir de resultados de riesgo.

- Esta herramienta está desarrollada para trabajar conjuntamente con software de cálculo de riesgo, por lo que utiliza directamente estos resultados para realizar la priorización. De esta forma, las actualizaciones de los modelos de riesgo que permiten realizar una gestión continua del riesgo pueden ser trasladadas directamente a los resultados de priorización.
- Es una herramienta flexible para poder utilizar diferentes criterios de priorización, como los indicadores de riesgo basados en los principios de eficiencia y equidad.
- Realiza un cálculo continuo de los indicadores de riesgo, de modo que para definir cada paso de la secuencia de implantación de medidas se reevalúa la situación de riesgo de todas las presas.

Respecto al **caso de estudio** analizado, las conclusiones alcanzadas son:

- La gestión de actuaciones en seguridad de presas a partir de resultados de riesgo permite priorizar entre diferentes medidas estructurales y no estructurales en grupos de presas muy heterogéneos.
- La herramienta desarrollada permite obtener secuencias de implantación de medidas para este grupo de presas de forma rápida y justificada.

Por último, las recomendaciones para **futuras líneas de investigación** se centran principalmente en la gestión real de las secuencias de priorización de medidas y su aplicación a lo largo del tiempo. En este sentido, las principales recomendaciones son:

- En este trabajo se ha desarrollado una herramienta inicial para priorizar medidas a lo largo del tiempo. Esta herramienta debe ser mejorada para reducir los cálculos necesarios y su interfaz gráfica debe ser elaborada.
- Según los resultados obtenidos con esta herramienta, el horizonte de decisión es un parámetro clave que condiciona la secuencia de medidas obtenida. Por este motivo, es necesario analizar como este tiempo puede ser adaptado para representar el proceso real de toma de decisiones.
- Es conveniente analizar cómo se relacionan la priorización de medidas a lo largo del tiempo y los resultados de riesgo, especialmente para presas con riesgo elevado.
- En este tipo de priorización, es necesario analizar los procesos reales de toma de decisiones y los plazos de gestión e implantación de medidas.
- Además, es conveniente desarrollar índices que permitan analizar la bondad de una secuencia de implantación de medidas a lo largo del tiempo y analizar cómo los principios de eficiencia y equidad son aplicados en este tipo de priorización.
- Por último, sería interesante analizar más detalladamente como las diferentes restricciones entre medidas que pueden aparecer en la gestión pueden influenciar a los resultados de priorización obtenidos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ANCOLD. *Guidelines on Risk Assessment*. Australian National Committee on Large Dams, 2003.
- [2] D.S. Bowles. Advances in the practice and use of portfolio risk assessment. In *ANCOLD Conference on Dams*, 2000.
- [3] D.S. Bowles. ALARP Evaluation: Using cost effectiveness and disproportionality to justify risk reduction. In *ANCOLD Conference on Dams*, 2003.
- [4] D.S. Bowles. From portfolio risk assessment to portfolio risk management. In *ANCOLD Conference on Dams*, 2006.
- [5] D.S. Bowles. Tolerable risk for dams: How safe is safe enough? In *US Society on Dams Annual Conference*, 2007.
- [6] D.S. Bowles, A.M. Parsons, L.R. Anderson, and Glover T.F. Portfolio risk assessment of SA Water's large dams. Bulletin 112, Australian National Committee on Large Dams (ANCOLD), 1999. Pages: 27-39.
- [7] CNEGP. *Análisis de riesgo aplicado a la gestión de seguridad de presas y embalses [Borrador]*. Comité Nacional Español de Grandes Presas, 2012.
- [8] A. de Blaeij, R.J.G.M. Florax, P. Rietveld, and E. Verhoef. The value of statistical life in road safety: a meta-analysis. *Accident Analysis and Prevention*, 35:973-986, 2003.
- [9] I. Escuder-Bueno and L. Ardiles-López. Role of dams as critical infrastructures to protect citizens from flooding and climate change. In *Vingt-Quatrieme Congres des Grands Barrages*. Kyoto. Commission Internationales des Grands Barrages, 2012.
- [10] I. Escuder-Bueno, J.T. Castillo-Rodríguez, S. Perales-Momparler, and A. Morales-Torres. *SUFRI Methodology for flood risk evaluation in urban areas. Decision guidance for decision maker. Report SUFRI project. WP3*, September 2011. <http://www.sufri.tugraz.at>.
- [11] 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.
- [12] M. Gómez de Membrillera-Ortuño, I. Escuder-Bueno, J. González-Pérez, and L. Altarejos-García. *Aplicación del Análisis de Riesgos a la Seguridad de Presas*. Universidad Politécnica de Valencia, 2005. ISBN: 84-9705-779-1.
- [13] HSE. *Reducing risks, protecting people - HSE's decision-making process*. Health and Safety Executive, 2001. ISBN 0-7176-2151-0.
- [14] ICOLD. *Risk assessment in dam safety management. A reconnaissance of benefits, methods and current applications*. International Commission on Large Dams. Committee on dam safety, 2005. Bulletin 130.
- [15] INE. Cálculo de variaciones del índice de precios de consumo, Julio 2012. <http://www.ine.es/varipc/index.do>.

- [16] S.N. Jonkman and J.K. Vrijling. Loss of life due to floods. *Flood Risk Management*, 1:43–56, 2008.
- [17] S. Kaplan. The world of risk analysis. *Risk Analysis*, 17(4):407–417, 1997.
- [18] I.M. Khadam and J.J. Kaluarachchi. Multi-criteria decision analysis with probabilistic risk assessment for the management of contaminated ground water. *Environmental Impact Assessment Review*, 23:683–721, 2003.
- [19] R. Lutter, J.F. Morrall, and W.K. Viscusi. The cost-per-life-saved cutoff for safety-enhancing regulations. *Economic Inquiry*, 37(4):599–608, 1999.
- [20] J.T. McClenathan. Update for screening portfolio risk analysis for U.S. Army Corps of Engineers Dams. *Collaborative Management of Integrated Watersheds*, pages 1355–1366, 2007.
- [21] D.F. Munger, D.S. Bowles, D.D. Boyer, D.W. Davis, D.A. Margo, D.A. Moser, P.J. Regan, and N. Snorteland. Interim tolerable risk guidelines for us army corps of engineers dams. In *USSD Workshop on the future of dam safety decision making: combining standards and risk*, Abril 2009.
- [22] NSWDC. *Risk Management Policy Framework For Dam Safety*. New South Walles Dams Safety Committee. New South Wales Government, 2006.
- [23] Python Software Foundation. *Python Programming Language - Official Website*, 2012. www.python.org.
- [24] 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.
- [25] A. Serrano-Lombillo, I. Escuder-Bueno, and L. de Membrillera-Ortuño, M.G. y Altarejos-García. iPresas: Software para análisis de riesgo. In *23 Congreso Internacional de Grandes Presas*. SPANCOLD, 2009. www.ipresas.com.
- [26] 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, 2011.
- [27] A. Serrano-Lombillo, A. Morales-Torres, and L.A. García-Kabbabe. Consequence estimation in risk analysis. In *Forum on Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security and Critical Infrastructure Management*, 2011.
- [28] A. Solera, J. Paredes, and J. Andreu. *AQUATOOLDMA SSD para planificación de cuencas*. 2007. <http://www.upv.es/aquatool/>.
- [29] M. G. Stewart and J. Mueller. A risk and cost-benefit assessment of United States aviation security measures. *Transport Security*, 1:143–159, 2008.
- [30] USBR. *Guidelines for achieving public protection in dam safety decision making*. United States Bureau of Reclamation, 2003.

[31] USBR. *Dam Safety Public Protection Guidelines. A Risk Framework to Support Dam Safety Decision-Making*. United States Bureau of Reclamation. Dam Safety Office, 2011.

ANEJO 1 CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN DE LA HERRAMIENTA

A1.1 Código central de la herramienta de cálculo de combinaciones

A continuación se muestra la parte principal del código empleado para realizar el cálculo de las diferentes combinaciones de medidas en cada modelo de riesgo. Este código ha sido desarrollado en el lenguaje de programación Python. El código que realiza este cálculo a partir del software iPresas y de las restricciones introducidas en cada presa es el siguiente:

```
def combinaciones(fichero_entrada_med,fichero_entrada_base, hoja_datos,
nombre_rsk, ruta_hf5_base, ruta_hf5_medidas, fichero_entrada_condiciones=0,
verbose=0):
```

```
    #1. SACAMOS DATOS DE MEDIDAS Y VARIABLES:
    # Sacamos datos del fichero de caso base:
    [variables_base, valores_base] = sacar_datos_excel (fichero_entrada_base,
hoja_datos)

    # Sacamos datos del fichero de medidas:
    [nombres_med, variables_med, valores_medida] = sacar_datos_excel
(fichero_entrada_med, hoja_datos)
    numero_medidas = len(nombres_med)

    # Comprobamos los nombres de las variables del archivo de medidas y del
caso base:
    for variable in variables_med:
        if variable not in variables_base:
            raise "Los nombres de las variables del archivo de medidas no
coinciden con los del caso base."

    for variable in variables_base:
        if variable not in variables_med:
            raise "Los nombres de las variables del archivo de medidas no
coinciden con los del caso base."

    # 2. CORECCION VARIABLES REPETIDAS:
    #Corregimos datos de entrada para eliminar variables repetidas(hay
medidas que pueden hacer referencia a la misma variable):
    #2.1. Cogemos posiciones donde hay repetición y borramos las
repeticiones, para crear un vector con la posición de cada medida:
    posiciones = []
    for i in range(len(variables_med)):
        posiciones.append([i])
        for j in range(i+1, len(variables_med)):
            if variables_med[i] == variables_med[j]:
                posiciones[i].append(j)
    for posicion in posiciones:
        if len(posicion) > 1:
            for i in range(1,len(posicion)):
                posiciones.remove(posicion[i:])

    #2.2. Reorganizamos el vector de valores base para que coincida con el
orden de las medidas:
    valores_base_cor = []
    variables = unique(variables_med)
```

```

for i in range(len(posiciones)):
    for j in range(len(variables_base)):
        if variable == variables[i]:
            valores_base_cor.append(valores_base[j])

#2.3. Corregimos valores_medida según las nuevas posiciones de cada
medida, creando una lista de listas:
valores_medida_cor = range(len(posiciones))
for i in range(len(posiciones)):
    valores_medida_cor[i] = posiciones[i][:]
for i in range(len(posiciones)):
    for j in range(len(posiciones[i])):
        valores_medida_cor[i][j] = valores_medida[posiciones[i][j]]

#2.4. Hacemos lo mismo con los nombres de las medidas, creando una lista
de listas:
nombres_med_cor = range(len(posiciones))
for i in range(len(posiciones)):
    nombres_med_cor[i] = posiciones[i][:]
for i in range(len(posiciones)):
    for j in range(len(posiciones[i])):
        nombres_med_cor[i][j] = nombres_med[posiciones[i][j]]
#Lo guardamos en el diccionario:
rutas = {} #Creamos un diccionario con la ruta de los archivos
rutas["medidas"] = nombres_med

#3. SACAMOS DATOS DE CONDICIONES:
# Sacamos condiciones de archivo:
if fichero_entrada_condiciones != 0:
    [tipos_cond, vector_cond1, vector_cond2] = sacar_datos_excel
(fichero_entrada_condiciones, hoja_datos)
    tipos_cond = map(str,tipos_cond)
else:
    tipos_cond = []
    vector_cond1 = []
    vector_cond2 = []

#4. COMPARACION DE CONDICIONES DE ORDEN Y EXCLUSION CON VARIABLES
REPETIDAS
#4.1. Hacemos una lista con las condiciones de orden para medidas que
comparten variable:
pos = -1
vector_cond_ord1=[]
vector_cond_ord2=[]
for cond1, cond2, tipo in zip(vector_cond1, vector_cond2, tipos_cond):
    if tipo.upper() == 'ORDER': #Me quedo solo con las condiciones de
orden:
        vector_cond_ord1.append(cond1)
        vector_cond_ord2.append(cond2)
vector_cond_orden_cor=[]
for medidas in nombres_med_cor:
    i=0
    while i<len(vector_cond_ord1):
        if vector_cond_ord1[i] in medidas and vector_cond_ord2[i] in
medidas:
vector_cond_orden_cor.append([vector_cond_ord1[i],vector_cond_ord2[i]])
        pos=pos+1

```

```

        if vector_cond_ord2[i] in vector_cond_ord1:
            i=i+1
            vector_cond_orden_cor[pos].append(vector_cond_ord2[i])
    i=i+1

```

#4.2. Comprobamos que no haya medidas que compartan variable y no estén relacionadas con una condición de orden o de exclusión:

```

vector_cond_oe=[]
for cond1, cond2, tipo in zip(vector_cond1, vector_cond2, tipos_cond):
    if tipo.upper() == 'ORDER' or tipo.upper() == 'EXCL': #Me quedo
solo con las condiciones de orden y exclusión:
        vector_cond_oe.append([cond1,cond2])
for medidas in nombres_med_cor:
    if len(medidas)>1:
        comun = []
        for condicion in vector_cond_oe:
            com=0
            for medida in medidas:
                if medida in condicion:
                    com=com+1
            comun.append(com)
        if comun.count(2) < (len(medidas)-1):
            raise "Las condiciones deben ser revisadas porque se están
implementando al mismo tiempo dos medidas que hacen referencia a la misma
variable."

```

#4.3. Comprobamos que no haya dos medidas con la misma medida previa en la condición de orden, que compartan variables y no tengan una condición de exclusión:

```

vector_cond_exc=[]
for cond1, cond2, tipo in zip(vector_cond1, vector_cond2, tipos_cond):
    if tipo.upper() == 'EXCL': #Vector con solo las condiciones de
exclusión:
        vector_cond_exc.append([cond1,cond2])
for cond1 in vector_cond_orden_cor:
    for cond2 in vector_cond_orden_cor:
        if cond1[0] == cond2[0] and cond1[1] != cond2[1]:
            if [cond1[1],cond2[1]] not in vector_cond_exc and
[cond2[1],cond1[1]] not in vector_cond_exc:
                raise "Para que la priorización tenga sentido, debe haber
una condición de exclusión entre medidas con la misma medida previa."

```

#5. GENERACION DE LAS COMBINACIONES DE MEDIDAS:

```

# Generación de todas las posibles combinaciones (sin restricciones):
todas_combinaciones = []
for i in range(numero_medidas):
    todas_combinaciones.extend(list(combinations(nombres_med, i+1)))
if verbose: print u'Hay %s posibles combinaciones de las medidas.' %
len(todas_combinaciones)

```

Cogemos sólo las que cumplen las condiciones:

```

vector_combinaciones = []
for combinacion in todas_combinaciones:
    if cumple_condiciones(combinacion, tipos_cond, vector_cond1,
vector_cond2):
        vector_combinaciones.append(combinacion)
if verbose: print u'Hay %s combinaciones que cumplen todas las
condiciones.' % len(vector_combinaciones)

```

```

#6. CORREMOS CASO BASE
# Creamos cabecera archivo medidas:
texto_medidas = "#i prob " + " ".join(variables) + "\n"

# Generamos el archivo:
texto_valores = "1 " + " ".join(valores_base_cor)
escribir(texto_medidas, texto_valores)

#Definimos las rutas de resultados
dir_principal = os.path.dirname(os.path.abspath("Combinaciones.py"))#A
partir del directorio de trabajo principal
dir_hf5_base = os.path.join(dir_principal,ruta_hf5_base)
dir_hf5_medidas = os.path.join(dir_principal,ruta_hf5_medidas)
nombre_hf5 = os.path.join(dir_hf5_base, 'base.hf5')
rutas["base"] = "base.hf5"

#Definimos la ruta a iPresas:
key = _winreg.OpenKey(_winreg.HKEY_LOCAL_MACHINE,
r'Software\iPresas\Qilex')
ruta_ipresas = _winreg.QueryValueEx(key, '')
ruta_ipresas = str(ruta_ipresas[0])
ruta_ipresas = os.path.join(ruta_ipresas, 'gui.exe')
#Corremos el caso base:
nombre_rsk = os.path.join(dir_principal,nombre_rsk)
#subprocess.call([ruta_ipresas,"corre",nombre_rsk,nombre_hf5])
if verbose: print "Caso base calculado correctamente"

#7. CORREMOS LAS DIFERENTES COMBINACIONES:
# Corremos cada combinación que cumple las condiciones:
for combinacion in vector_combinaciones:
    nombre_archivo = "Medidas"
    valores_modelo = []
    for medida, valor_medida, valor_base in zip(nombres_med_cor,
valores_medida_cor, valores_base_cor):
        repet = common_elements(medida,combinacion)
        if repet == []:
            valores_modelo.append(valor_base)
        elif len(repet) > 1: #Cuando hay varias medidas debe haber
una condicion de orden entre ellas:
            pos_orden = []
            for med in repet:
                for cond_orden in vector_cond_orden_cor:
                    if med in cond_orden:
                        pos_orden.append(cond_orden.index(med))
                    else:
                        pos_orden.append(-1)
            if max(pos_orden) == -1:
                raise "Las condiciones deben ser revisadas porque se
están implementando al mismo tiempo dos medidas que hacen referencia a la
misma variable."
            else: #Cogemos la posición de la medida de mayor orden de
todas las que estén presentes en la medida:
valores_modelo.append(valor_medida[medida.index(vector_cond_orden_cor[int((po
s_orden.index(max(pos_orden))%len(vector_cond_orden_cor))][max(pos_orden)])]
)

```

```

        else:

valores_modelo.append(valor_medida[medida.index(repet[0])])
    texto_valores = "1 " + " ".join(valores_modelo)
    nombre_archivo = u'_' .join(combinacion)
    escribir(texto_medidas, texto_valores)
    nombre_hf5 = os.path.join(dir_hf5_medidas, nombre_archivo + ".hf5")
    rutas[frozenset(combinacion)] = nombre_archivo + ".hf5"
    #Corremos el modelo:
    #subprocess.call([ruta_ipresas,"corre",nombre_rsk,nombre_hf5])
    if verbose: print u"Combinación %s calculada correctamente" %
nombre_archivo
    if verbose: print u"Todas las combinaciones han sido corridas."
    archivo_rutas = open("Result_paths.pkl","w")
    pickle.dump(rutas, archivo_rutas)

#Programa para escribir el archivo para el modelo:
def escribir(medidas, valores):
    archivo_modelo = open("Medidas_modelo.txt","w")
    archivo_modelo.write(medidas)
    archivo_modelo.write(valores)

#Programa para ver si se cumplen las condiciones:
def cumple_condiciones(combinacion, tipos_cond, vector_cond1, vector_cond2):
    for cond1, cond2, tipo in zip(vector_cond1, vector_cond2, tipos_cond):
        if tipo.upper() == 'ORDER': # Condiciones de orden
            if cond1 not in combinacion and cond2 in combinacion: #La medida
1 se implementa antes que la 2.
                return False
            if tipo.upper() == 'EXCL': # Condiciones de exclusion
                if cond1 in combinacion and cond2 in combinacion: #La
implantación de la medida 1 supone que la 2 no se puede implementar y
viceversa.
                    return False
                #if tipo.upper() == 'ELIM': # Condiciones de eliminación
                # No afecta a las combinaciones. #La implantación de la medida 1
supone que la 2 no se puede implementar.
                if tipo.upper() == 'GROUP': # Condiciones de medidas conjuntas
                    if (cond1 in combinacion and cond2 not in combinacion) or (cond1
not in combinacion and cond2 in combinacion):
                        return False
                if tipo.upper() == "1.0": # Condiciones de orden (primera medida)
                    if cond1 not in combinacion:
                        return False
    return True

def combinations(iterable, r):
    # combinations('ABCD', 2) --> AB AC AD BC BD CD
    # combinations(range(4), 3) --> 012 013 023 123
    pool = tuple(iterable)
    n = len(pool)
    if r > n:
        return
    indices = range(r)
    yield tuple(pool[i] for i in indices)
    while True:
        for i in reversed(range(r)):
            if indices[i] != i + n - r:
                break

```

```

    else:
        return
    indices[i] += 1
    for j in range(i+1, r):
        indices[j] = indices[j-1] + 1
    yield tuple(pool[i] for i in indices)

def unique(lista): #Elimina elementos repetidos pero manteniendo el orden.
    """Return a list of the elements in s, but without duplicates."""

    for i in range(len(lista)):
        for j in range(i+1, len(lista)):
            if lista[i] == lista[j]:
                lista[j]=0
    for i in range(len(lista)):
        if 0 in lista:
            lista.remove(0)
    return lista

#Módulo para ver si hay algún elemento en común entre dos listas:
def common_elements(list1, list2):

    rep=[]
    for element in list1:
        if element in list2:
            rep.append(element)
    return rep

def sacar_datos_excel(fichero_entrada, hoja_datos):
    sheet = xlrd.open_workbook(fichero_entrada).sheet_by_name(hoja_datos)
    return [sheet.col_values(i, 1) for i in range(sheet.ncols)]

```

A1.2 Código central de la herramienta de priorización de medidas

A continuación se muestra el código central de la segunda parte de la herramienta, desarrollado también en Python y que permite priorizar las medidas para un criterio de priorización a partir de los datos necesarios:

```
def priorizador (datos_prio, func_criterio, n=1, verbose=0):

[nombres_presas, medidas, dic_costes_an, dic_costes_imp,
dic_archivos_rutas, carpeta_hf5, numero_presas, dic_damage_variables,
tipos_cond, vector_cond1, vector_cond2] = datos_prio

    # Comprobamos que todos los tipos de condiciones son correctos:
    for tipo in tipos_cond:
        if tipo.upper() != "ORDER" and tipo.upper() != "EXCL" and
tipo.upper() != "GROUP" and tipo.upper() != "ELIM":
            for letra in list(tipo):
                if letra.isalpha() or tipo == "": #Ver si hay alguna letra en
la descripción.
                    raise u'La condicion %s no es de ninguno de los tipos
definidos.' % tipo #NO FUNCIONA

    # Unimos con condiciones de conjuntas las medidas que tienen un mismo
orden en la priorización:
    numero_condiciones=len(tipos_cond)
    for i in range(numero_condiciones):
        es_letra = 0
        for letra in list(tipos_cond[i]):
            if letra.isalpha(): #Ver si hay alguna letra en la descripción.
                es_letra = 1 #"No se puede convertir a número."
        for j in range(i+1,numero_condiciones):
            if es_letra == 0 and tipos_cond[i]==tipos_cond[j] and
list(tipo)[-1]=="*": #Mismo número en priorización general
                tipos_cond.append("GROUP")
                vector_cond1.append(vector_cond1[i])
                vector_cond2.append(vector_cond1[j])
            elif es_letra == 0 and tipos_cond[i]==tipos_cond[j] and
vector_cond1[i][0]==vector_cond1[j][0]: #Mismo número en priorización
individual de cada presa
                tipos_cond.append("GROUP")
                vector_cond1.append(vector_cond1[i])
                vector_cond2.append(vector_cond1[j])

    #Creamos vector para corrección de medidas que se implementan de formas
conjunta:
    condiciones_group=[]
    numero_condiciones=len(tipos_cond)
    for i in range(numero_condiciones):
        if tipos_cond[i].upper() == "GROUP":
            condiciones_group.append([vector_cond1[i],vector_cond2[i]])
    cond_group_aux = condiciones_group[:]
    pos_borra=[]
    for i in range(len(condiciones_group)):
        for j in range(i+1,len(condiciones_group)):
            if condiciones_group[j][0] in condiciones_group[i]:
                cond_group_aux[i].append(condiciones_group[j][1])
                pos_borra.append(j)
```

```

        elif condiciones_group[j][1] in condiciones_group[i]:
            cond_group_aux[i].append(condiciones_group[j][0])
            pos_borra.append(j)
    cond_group_aux2 = cond_group_aux[:]
    for pos in pos_borra:
        if cond_group_aux[pos] in cond_group_aux2:
            cond_group_aux2.remove(cond_group_aux[pos])
    condiciones_group = cond_group_aux2[:]

#4. DEFINICIÓN DE LA SITUACIÓN INICIAL:

#Creamos vector con medidas no implantadas y definimos la situacion
inicial y los vectores de resultados:
medidas_no = medidas[:]
sit_inicial = []
riesgo = {} #Diccionario que va a marcar como varían los resultados de
riesgo en cada presa
medidas_imp = {} #Diccionario de listas que indican las medidas
implantadas en cada presa
for presa in nombres_presas:
    riesgo[presa] =
get_risk(os.path.join(carpeta_hf5[presa],dic_archivos_rutas[presa][ "base" ]),
dic_damage_variables[presa], numero_presas[presa])
    num_var_dano = len(dic_damage_variables[presa])
    medidas_imp[presa] = []

#Creamos una matriz salida que vaya guardando los datos en cada pasao y
pueda ser copiada a un archivo:
salida = [ ["Paso", "Presa", "Medida imp.", "Coste anual", "Coste imp.",
"Valor criterio", "Suma Prob. fallo", "Suma Riesgo econ.", "Suma Riesgo
social" ] ]
salida.append([ "", "", "", "", "", "", "", "", "" ])
for presa in nombres_presas:
    salida[0].extend((num_var_dano+1)*[presa])
    salida[1].extend([ "prob.fallo", "neuros", "rvidas" ])
salida.append([ 0, "-", "-", 0, 0, "-" ])
suma_prob, suma_reur, suma_rvidas = 0, 0, 0
prob_alta = False
for presa in nombres_presas:
    suma_prob += riesgo[presa][0]
    suma_reur += riesgo[presa][1]
    suma_rvidas += riesgo[presa][2]
    if riesgo[presa][0] > 1E-4:
        for med in medidas_no:
            if med[0] == presa:
                prob_alta = True
salida[2].extend([ suma_prob, suma_reur, suma_rvidas ])
for presa in nombres_presas:
    for i in range(num_var_dano+1):
        salida[2].append(riesgo[presa][i])

#Quitamos medidas que no se quieren implantar (cond=0):
for cond1, tipo in zip(vector_cond1, tipos_cond):
    es_letra = 0
    for letra in list(tipo):
        if letra.isalpha(): #Ver si hay alguna letra en la descripción.
            es_letra = 1 #No se puede convertir a número.
    if es_letra != 1 and list(tipo)[-1] != "*" and float(tipo) == 0:

```

```

medidas_no.remove(cond1)

#5. PRIORIZACIÓN DE MEDIDAS. CÁLCULO DE CRITERIOS:

paso = 0
priorizacion_posible = True #Para no seguir cuando ya no se cumplen las
condiciones
while medidas_no != []:
    posibilidades = []
    paso += 1

    #Creamos vector con las posibilidades de medidas para implantar
    (corregimos para medidas agrupadas):
    medidas_no_aux = medidas_no[:] #Vector para modificar
    for medida in medidas_no_aux:
        combinacion = sit_inicial[:]
        combinacion.append(medida)
        for i in range(len(condiciones_group)):
            cond_group_aux = condiciones_group[i][:]
            if medida in condiciones_group[i]:
                cond_group_aux.remove(medida)
                combinacion.extend(cond_group_aux)
            for med in cond_group_aux:
                medidas_no_aux.remove(med)
        posibilidades.append (combinacion)

    #Eliminamos las que no cumplan las condiciones:
    posibilidades_cump = posibilidades[:]
    for posibilidad in posibilidades:
        if cumple_condiciones (posibilidad, tipos_cond, vector_cond1,
vector_cond2, condiciones_group, paso) == False:
            posibilidades_cump.remove(posibilidad)
        if posibilidades_cump == [] and medidas_no != []:
            medidas_no = [] #Si no hay ninguna opción que cumpla las
condiciones se acaba la priorizacion
            if verbose: print "No hay más medidas que puedan ser
implementadas porque no cumplen las condiciones introducidas."
            priorizacion_posible = False
        else:
            #Calculamos el criterio de priorización para cada combinacion:
            res_criterio = []
            for posibilidad in posibilidades_cump:
                presa = posibilidad[-1][0] #Presas sobre la que se plantea
implantar la medida
                if medidas_imp [presa] == []:
                    riesgo_inic =
get_risk(os.path.join(carpetas_hf5[presa],dic_archivos_rutas[presa][ "base" ]),
dic_damage_variables[presa], numero_presas[presa])
                else:
                    riesgo_inic =
get_risk(os.path.join(carpetas_hf5[presa],dic_archivos_rutas[presa][frozenset(
medidas_imp[presa])]), dic_damage_variables[presa], numero_presas[presa])
                    sit_con_med = medidas_imp[presa][:]
                    for med in posibilidad: #Añadimos medidas implantadas en la
presa

                        if med[1] not in sit_con_med and med[0] == presa:
                            sit_con_med.append(med[1])

```

```

        riesgo_med =
get_risk(os.path.join(carpeta_hf5[presa],dic_archivos_rutas[presa][frozenset(
sit_con_med)]), dic_damage_variabilles[presa], numero_presas[presa])
        coste = dic_costes_an[tuple(posibilidad[-1])]

#Corrección medidas conjuntas (de riesgo y de costes):
for i in range(len(condiciones_group)):
    cond_group_aux = condiciones_group[i][:]
    if posibilidad[-1] in condiciones_group[i]:
        cond_group_aux.remove(posibilidad[-1])
        presas_cons=[presa] #Presas cuyos resultados ya se
han añadido al riesgo
        for med in cond_group_aux:
            coste += dic_costes_an[tuple(med)]
            #Añadimos el riesgo de otras presas afectadas por
las medidas para el cálculo del indicador:
            if med[0] not in presas_cons:
                if medidas_imp [med[0]] == []:
                    riesgo_inic2 =
get_risk(os.path.join(carpeta_hf5[med[0]],dic_archivos_rutas[med[0]]["base"])
, dic_damage_variabilles[med[0]], numero_presas[med[0]])
                else:
                    riesgo_inic2 =
get_risk(os.path.join(carpeta_hf5[med[0]],dic_archivos_rutas[med[0]][frozenset
t(medidas_imp[med[0]])]), dic_damage_variabilles[med[0]],
numero_presas[med[0]])

                    sit_con_med = medidas_imp[med[0]][:]
                    for med_aux in cond_group_aux:
                        if med_aux[0] == med[0]:
                            sit_con_med.append(med_aux[1])
                    presas_cons.append(med[0])
                    riesgo_med2 =
get_risk(os.path.join(carpeta_hf5[med[0]],dic_archivos_rutas[med[0]][frozenset
t(sit_con_med)]), dic_damage_variabilles[med[0]], numero_presas[med[0]])
                    for i in range(len(riesgo_inic)):
                        riesgo_inic[i] += riesgo_inic2[i]
                        riesgo_med[i] += riesgo_med2[i]

#Comprobacion de que con todas las medidas se reduce riesgo
y/o probabilidad:
for res_ini, res_med in zip(riesgo_inic, riesgo_med):
    if res_ini < res_med:
        raise "La medida %s no produce una disminución de La
probabilidad de rotura y/o el riesgo." % combinacion[-1]

#Cálculo del criterio:
criterio = func_criterio (riesgo_inic, riesgo_med, coste, n)
#Para ACFSP y CFSP en dos etapas si hay alguna probabilidad
mayor de 1E-4 solo se implantan medidas con esta probabilidad:
if func_criterio == f.func_CSFP or func_criterio ==
f.func_ACSFP or func_criterio == f.func_MFPD2:
    if prob_alta == True and riesgo_inic[0]<1E-4:
        criterio = 1E50
    res_criterio.append(criterio)

#6. ELIJO MEDIDA, HAGO CORRECCIONES Y CREO DATOS DE SALIDA:

#Elijo medida implantada y modifico los vectores de medidas no
implantadas y sit. inicial:

```

```

if priorizacion_posible:
    minimo_crit = min (res_criterio)
    pos_minimo = res_criterio.index(minimo_crit)
    presa_imp = posibilidades_cump[pos_minimo][-1][0]
    sit_inicial = posibilidades_cump[pos_minimo]
    medidas_no.remove(posibilidades_cump[pos_minimo][-1])

#Corrección para eliminar las medidas implementadas de forma
conjunta:
    for i in range(len(condiciones_group)):
        cond_group_aux = condiciones_group[i][:]
        if posibilidades_cump[pos_minimo][-1] in
condiciones_group[i]:
            cond_group_aux.remove(posibilidades_cump[pos_minimo][-1])
            for med in cond_group_aux:
                medidas_no.remove(med)

#Saco las medidas exluyentes y eliminativas del vector medidas_no
(también las asociadas si están en grupo):
    for cond1, cond2, tipo in zip(vector_cond1, vector_cond2,
tipos_cond):
        if tipo.upper() == "EXCL":
            if sit_inicial[-1] == cond1:
                medidas_no.remove(cond2)
                for i in range(len(condiciones_group)): #Eliminamos
también la posibilidad de implantar sus medidas agrupadas
                    cond_group_aux = condiciones_group[i][:]
                    if cond2 in condiciones_group[i]:
                        cond_group_aux.remove(cond2)
                        for med in cond_group_aux:
                            medidas_no.remove(med)
            if sit_inicial[-1] == cond2:
                medidas_no.remove(cond1)
                for i in range(len(condiciones_group)): #Eliminamos
también la posibilidad de implantar sus medidas agrupadas
                    cond_group_aux = condiciones_group[i][:]
                    if cond1 in condiciones_group[i]:
                        cond_group_aux.remove(cond1)
                        for med in cond_group_aux:
                            medidas_no.remove(med)

        if tipo.upper() == "ELIM":
            if sit_inicial[-1] == cond1 and cond2 in medidas_no:
                medidas_no.remove(cond2)
                for i in range(len(condiciones_group)): #Eliminamos
también la posibilidad de implantar sus medidas agrupadas
                    cond_group_aux = condiciones_group[i][:]
                    if cond2 in condiciones_group[i]:
                        cond_group_aux.remove(cond2)
                        for med in cond_group_aux:
                            medidas_no.remove(med)

#Corrijo medida implantanda añadiendo las medidas agrupadas:
sal_presa_imp = posibilidades_cump[pos_minimo][-1][0]
sal_medida_imp = posibilidades_cump[pos_minimo][-1][1]
medidas_imp[presa_imp].append(posibilidades_cump[pos_minimo][ -
1][1])

    for i in range(len(condiciones_group)):
        cond_group_aux = condiciones_group[i][:]

```

```

        if posibilidades_cump[pos_minimo][-1] in
condiciones_group[i]:
            cond_group_aux.remove(posibilidades_cump[pos_minimo][-1])
            for med in cond_group_aux:
                sal_presa_imp += "_" + med[0]
                sal_medida_imp += "_" + med[1]
                medidas_imp[med[0]].append(med[1])

            #Obtengo costes anuales y de implantación:
            coste_an = salida[1+paso][3] +
dic_costes_an[tuple(posibilidades_cump[pos_minimo][-1])]
            coste_imp = salida[1+paso][4] +
dic_costes_imp[tuple(posibilidades_cump[pos_minimo][-1])]
            for i in range(len(condiciones_group)): #Corrección medidas
conjuntas:
                cond_group_aux = condiciones_group[i][:]
                if posibilidades_cump[pos_minimo][-1] in
condiciones_group[i]:
                    cond_group_aux.remove(posibilidades_cump[pos_minimo][-1])
                    for med in cond_group_aux:
                        coste_an += dic_costes_an[tuple(med)]
                        coste_imp += dic_costes_imp[tuple(med)]

            #Modifico matriz de riesgos:
            riesgo[presa_imp] =
get_risk(os.path.join(carpetas_hf5[presa_imp],dic_archivos_rutas[presa_imp][fr
ozenset(medidas_imp[presa_imp]))], dic_damage_variables[presa_imp],
numero_presas[presa_imp])
            #Añado también cambios en presas de medidas agrupadas:
presas_cons=[presa_imp] #Presas cuyos resultados ya se han
añadido a la matriz
            for i in range(len(condiciones_group)):
                cond_group_aux = condiciones_group[i][:]
                if posibilidades_cump[pos_minimo][-1] in
condiciones_group[i]:
                    cond_group_aux.remove(posibilidades_cump[pos_minimo][-1])
                    for med in cond_group_aux:
                        if med[0] not in presas_cons:
                            sit_con_med = medidas_imp[med[0]][:]
                            for med_aux in cond_group_aux:
                                if med_aux[0] == med[0]:
                                    sit_con_med.append(med_aux[1])
                            presas_cons.append(med[0])
                            riesgo[med[0]] =
get_risk(os.path.join(carpetas_hf5[med[0]],dic_archivos_rutas[med[0]][frozenset
(sit_con_med)]), dic_damage_variables[med[0]], numero_presas[med[0]])

            #Modifico matriz de salida de resultados:
            salida.append([paso,sal_presa_imp,
sal_medida_imp, coste_an, coste_imp, minimo_crit])
            suma_prob, suma_reur, suma_rvidas = 0,0,0
            prob_alta = False
            for presa in nombres_presas:
                suma_prob += riesgo[presa][0]
                suma_reur += riesgo[presa][1]
                suma_rvidas += riesgo[presa][2]
                if riesgo[presa][0] > 1E-4:
                    for med in medidas_no:

```

```

        if med[0] == presa:prob_alta = True
        salida[2+paso].extend([suma_prob, suma_reur, suma_rvidas])
        for presa in nombres_presas:
            for i in range(num_var_dano+1):
                salida[2+paso].append(riesgo[presa][i])
            if verbose: print "La medida %s ha sido implantada." %
sal_medida_imp

        return salida

#Programa para ver si se cumplen las condiciones:
def cumple_condiciones(combinacion, tipos_cond, vector_cond1, vector_cond2,
condiciones_group, paso):
    cumple=True
    cumple2=True

    for cond1, cond2, tipo in zip(vector_cond1, vector_cond2, tipos_cond):

        #CONDICIONES DE ORDEN:
        if tipo.upper() == 'ORDER': #La medida 1 se implementa antes que la
2.
            if cond1 not in combinacion and cond2 in combinacion:
                cumple=False

        #if tipo.upper() == 'EXCL': # Condiciones de exclusion
        # No afecta a la priorización.
        #if tipo.upper() == 'ELIM': # Condiciones de eliminación
        # No afecta a la priorización.
        #if tipo.upper() == 'GROUP': # Condiciones de medidas conjuntas
        # No afecta a la priorización.

        #CONDICIÓN DE POSICIÓN:
        es_letra = 0
        for letra in list(tipo):
            if letra.isalpha(): #Ver si hay alguna letra en la descripción.
                es_letra = 1 #"No se puede convertir a número."

        #EN PRIORIZACIÓN GENERAL:
        #Caso que la medida con orden definido esté en la combinación (con
corrección para medidas agrupadas):
        if es_letra != 1 and list(tipo)[-1] == "*":
            tipo = list(tipo)#Lo convertimos a un número sin asterisco
            tipo.remove("*")
            tipo = "".join(tipo)
            if cond1 in combinacion: #Si está en combinación:
                if paso < float(tipo) and float(tipo) != 0:
                    cumple=False

        #Caso que la medida con orden definido no esté en la combinación:
        if cond1 not in combinacion and float(tipo) != 0: #Si no está en
combinación
            if paso >= float(tipo):
                cumple=False

        #EN PRIORIZACIÓN INDIVIDUAL:
        if es_letra != 1 and list(tipo)[-1] != "*":
            #Creamos un vector con solo las medidas implantadas en la presa
para esta combinación:
            medidas_presa=[]

```

```

for med in combinacion:
    if med[0]==cond1[0]: medidas_presa.append(med)
    #Caso que la medida con orden definido esté en la combinación
    (con corrección para medidas agrupadas):
    if cond1 in combinacion: #Si está en combinación:
        if medidas_presa.index(cond1)+1 != float(tipo) and
float(tipo) != 0:
            cumple2=False
            for cond_group in condiciones_group:
                if cond1 == cond_group[0]:
                    if combinacion.index(cond_group[1])+1 == float(tipo)
and float(tipo) != 0:
                        cumple2=True
                    if cond1 == cond_group[1]:
                        if combinacion.index(cond_group[0])+1 == float(tipo)
and float(tipo) != 0:
                            cumple2=True
                if cumple2 == False: cumple = False

    #Caso que la medida con orden definido no esté en la combinación:
    if cond1 not in combinacion and float(tipo) != 0: #Si no está en
combinación
        if len(medidas_presa) >= float(tipo):
            cumple=False
return cumple

```

A1.3 Código central de la herramienta de priorización en el tiempo

Por último, se muestra el código central de herramienta inicial de priorización de medidas en el tiempo, desarrollada también en Python:

```
def priorizador_tiempo(archivo_rutas, hoja_datos, archivo_resultados,
hoja_salida, func_criterio, dt, pres_an, max_medidas_an, vector_salida,
condiciones_adic=0, hoja_cond_ad=0, n=1, verbose=0):

    #1. SACAMOS RUTAS DE ARCHIVOS DE DATOS PARA CADA UNA DE LAS PRESAS:
    [[nombres_presas, rutas_carpetas, archivos_medidas, hojas_datos,
archivos_condiciones, hojas_condiciones, archivos_rutas, carpetas_hf5,
numero_presas], damage_variables] = sacar_rutas_excel (archivo_rutas,
hoja_datos)

    # Creamos un diccionario para los datos anteriores:
    ruta_carpeta = dict((presa, ruta) for presa, ruta in zip(nombres_presas,
rutas_carpetas))
    archivo_medida = dict((presa, os.path.join(ruta, archivo)) for presa,
ruta, archivo in zip(nombres_presas, rutas_carpetas, archivos_medidas))
    hoja_datos = dict((presa, hoja) for presa, hoja in zip(nombres_presas,
hojas_datos))
    archivo_rutas = dict((presa, os.path.join(ruta, archivo)) for presa,
ruta, archivo in zip(nombres_presas, rutas_carpetas, archivos_rutas))
    carpeta_hf5 = dict((presa, os.path.join(ruta, carpeta)) for presa, ruta,
carpeta in zip(nombres_presas, rutas_carpetas, carpetas_hf5))
    numero_presas = dict((presa, numero) for presa, numero in
zip(nombres_presas, numero_presas))
    dic_damage_variables = dict((presa, variables) for presa, variables in
zip(nombres_presas, damage_variables))
    archivo_condiciones = {}
    hoja_condiciones = {}
    for presa, ruta, ar_cond, hoj_cond in zip(nombres_presas, rutas_carpetas,
archivos_condiciones, hojas_condiciones):
        if ar_cond == 0:
            archivo_condiciones[presa] = 0
            hoja_condiciones[presa] = 0
        else:
            archivo_condiciones[presa] = os.path.join(ruta, ar_cond)
            hoja_condiciones[presa] = hoj_cond

    #2. CREAMOS UNA LISTA DE DATOS CON TODAS LAS MEDIDAS DE TODAS LAS PRESAS:

    medidas = []
    dic_costes_an = {} #Diccionario con los costes anuales de cada medida
    dic_costes_imp = {} #Diccionario con los costes de implantación de cada
medida
    dic_tiempos = {} #Diccionario con tiempos de implantación de cada medida
    dic_archivos_rutas = {} #Diccionario que contiene los diccionarios de
rutas de las presas

    #Sacamos datos del archivo EXCEL:
    for presa in nombres_presas:
        [nombres_med, costes_anuales, costes_implantacion, tiempos] =
sacar_datos_excel(archivo_medida[presa], hoja_datos[presa])# Sacamos datos
del cada fichero Excel de medidas
```

```

# Cargamos archivo de rutas:
rutas = open(archivo_rutas[presa], "r")
dic_archivos_rutas[presa] = pickle.load(rutas)

# Comprobamos que las medidas introducidas son las mismas que las
medidas de las que disponemos los datos:
nombres_med2 = dic_archivos_rutas[presa]["medidas"]
if set(nombres_med) != set(nombres_med2):
    raise "Los nombres de las medidas introducidas en la priorización
no coinciden con las combinaciones de medidas calculadas."

#Creamos vector con medidas con los nombres y diccionarios de costes:
for i in range(len(nombres_med)):
    nombres_med[i] = [presa, nombres_med[i]] #Cada medida está
definida por una lista: [presa, medida]
    dic_costes_an[tuple(nombres_med[i])] = costes_anuales [i] #Para
que sea indexable se convierte en tuple
    dic_costes_imp[tuple(nombres_med[i])] = costes_implantacion [i]
    dic_tiempos[tuple(nombres_med[i])] = tiempos [i]
    medidas.extend(nombres_med)

#3. CREAMOS LOS VECTORES DE CONDICIONES UNIENDO LOS ARCHIVOS DE TODAS LAS
PRESAS Y EL ADICIONAL:

tipos_cond = []
vector_cond1 = []
vector_cond2 = []

#Sacamos datos de condiciones de cada presa:
for presa in nombres_presas:
    if archivo_condiciones[presa] != 0:
        [tipo, cond1, cond2] = sacar_datos_excel (archivo_condiciones
[presa], hoja_condiciones[presa])
        tipo = map(str, tipo) #Convertimos todos sus elementos a string
        #Corregimos el nombre de las medidas para añadir el nombre de la
presa en una lista:
        for i in range(len(cond1)):
            cond1[i] = [presa, cond1[i]]
            if cond2[i] != "":
                cond2[i] = [presa, cond2[i]]
        tipos_cond.extend(tipo)
        vector_cond1.extend(cond1)
        vector_cond2.extend(cond2)

# Sacamos datos de condiciones adicionales y los añadimos al vector
anterior:
if condiciones_adic != 0:
    [tipo, presa1, cond1, presa2, cond2] = sacar_datos_excel
(condiciones_adic, hoja_cond_ad)
    tipo = map(str, tipo) #Convertimos todos sus elementos a string
    for i in range(len(cond1)):
        cond1[i] = [presa1[i], cond1[i]]
        if cond2[i] != "":
            cond2[i] = [presa2[i], cond2[i]]
    tipos_cond.extend(tipo)
    vector_cond1.extend(cond1)
    vector_cond2.extend(cond2)

```

```

# Comprobamos nombres de medidas en la lista de condiciones:
for cond1 in vector_cond1:
    if cond1 not in medidas:
        raise "La medida del archivo de condiciones %s no se encuentra
definida en el archivo de medidas." % cond1 #NO FUNCIONA
    for cond2 in vector_cond2:
        if cond2 not in medidas and cond2 != "":
            raise "La medida del archivo de condiciones %s no se encuentra
definida en el archivo de medidas." % cond2 #NO FUNCIONA

# Comprobamos que todos los tipos de condiciones son correctos:
for tipo in tipos_cond:
    if tipo.upper() != "ORDER" and tipo.upper() != "EXCL" and
tipo.upper() != "GROUP" and tipo.upper() != "ELIM":
        for letra in list(tipo):
            if letra.isalpha() or tipo == "": #Ver si hay alguna letra en
la descripción.
                raise u'La condicion %s no es de ninguno de los tipos
definidos.' % tipo #NO FUNCIONA

# Unimos con condiciones de conjuntas las medidas que tienen un mismo
orden en la priorización:
numero_condiciones=len(tipos_cond)
for i in range(numero_condiciones):
    es_letra = 0
    for letra in list(tipos_cond[i]):
        if letra.isalpha(): #Ver si hay alguna letra en la descripción.
            es_letra = 1 #"No se puede convertir a número."
    for j in range(i+1,numero_condiciones):
        if es_letra == 0 and tipos_cond[i]==tipos_cond[j] and
list(tipo)[-1]=="*": #Mismo número en priorización general
            tipos_cond.append("GROUP")
            vector_cond1.append(vector_cond1[i])
            vector_cond2.append(vector_cond1[j])
        elif es_letra == 0 and tipos_cond[i]==tipos_cond[j] and
vector_cond1[i][0]==vector_cond1[j][0]: #Mismo número en priorización
individual de cada presa
            tipos_cond.append("GROUP")
            vector_cond1.append(vector_cond1[i])
            vector_cond2.append(vector_cond1[j])

#Creamos vector para corrección de medidas que se implementan de formas
conjunta:
condiciones_group=[]
numero_condiciones=len(tipos_cond)
for i in range(numero_condiciones):
    if tipos_cond[i].upper() == "GROUP":
        condiciones_group.append([vector_cond1[i],vector_cond2[i]])
cond_group_aux = condiciones_group[:]
pos_borra=[]
for i in range(len(condiciones_group)):
    for j in range(i+1,len(condiciones_group)):
        if condiciones_group[j][0] in condiciones_group[i]:
            cond_group_aux[i].append(condiciones_group[j][1])
            pos_borra.append(j)
        elif condiciones_group[j][1] in condiciones_group[i]:
            cond_group_aux[i].append(condiciones_group[j][0])
            pos_borra.append(j)
cond_group_aux2 = cond_group_aux[:]

```

```

for pos in pos_borra:
    if cond_group_aux[pos] in cond_group_aux2:
cond_group_aux2.remove(cond_group_aux[pos])
condiciones_group = cond_group_aux2[:]

#4. DEFINICIÓN DE LA SITUACIÓN INICIAL:

#Creamos vector con medidas no implantadas y definimos la situacion
inicial y los vectores de resultados:
medidas_no = medidas[:]
sit_inicial = []
riesgo = {} #Diccionario que va a marcar como varían los resultados de
riesgo en cada presa
medidas_imp = {} #Diccionario de listas que indican las medidas
implantadas en cada presa
for presa in nombres_presas:
    riesgo[presa] =
get_risk(os.path.join(carpetas_hf5[presa],dic_archivos_rutas[presa]["base"]),
dic_damage_variables[presa], numero_presas[presa])
    num_var_dano = len(dic_damage_variables[presa])
    medidas_imp[presa] = []

#Creamos una matriz salida que vaya guardando los datos en cada pasao y
pueda ser copiada a un archivo:
salida = [["Paso", "Medida imp.", "Coste anual", "Coste imp.", "Tiempo",
"Valor criterio", "Suma Prob. fallo", "Suma Riesgo econ.", "Suma Riesgo
social"]]
salida.append(["", "", "", "", "", "", "", "", "", ""])
for presa in nombres_presas:
    salida[0].extend((num_var_dano+1)*[presa])
    salida[1].extend(["prob.fallo", "reuros", "rvidas"])
salida.append([0, "-", 0, 0, 0, "-"])
suma_prob, suma_reur, suma_rvidas = 0, 0, 0
prob_alta = False
for presa in nombres_presas:
    suma_prob += riesgo[presa][0]
    suma_reur += riesgo[presa][1]
    suma_rvidas += riesgo[presa][2]
    if riesgo[presa][0] > 1E-4:
        for med in medidas_no:
            if med[0] == presa:
                prob_alta = True
salida[2].extend([suma_prob, suma_reur, suma_rvidas])
for presa in nombres_presas:
    for i in range(num_var_dano+1):
        salida[2].append(riesgo[presa][i])

#Quitamos medidas que no se quieren implantar (cond=0):
for cond1, tipo in zip(vector_cond1, tipos_cond):
    es_letra = 0
    for letra in list(tipo):
        if letra.isalpha(): #Ver si hay alguna letra en la descripción.
            es_letra = 1 #"No se puede convertir a número."
    if es_letra != 1 and list(tipo)[-1] != "*" and float(tipo) == 0:
        medidas_no.remove(cond1)

```

#5. PRIORIZACIÓN DE MEDIDAS. CÁLCULO DE CRITERIOS:

```

paso = 0
tiempo = 0 #Variable que nos da el tiempo en cada paso
priorizacion_posible = True #Para no seguir cuando ya no se cumplen las
condiciones
coste_imp = 0
coste_an = 0
while medidas_no != []:
    medidasmax = max_medidas_an*dt
    num_med_imp = len(sit_inicial)
    posibles_medidas=[]
    for medida in
vector_salida[0:min((num_med_imp+medidasmax),len(vector_salida))]:
        if medida in medidas_no: posibles_medidas.append(medida)
    posibilidades_cump = []
    combinaciones_cump=[]
    paso += 1
    tiempo += dt

    #Creamos vector con las posibilidades de medidas para implantar:
    fin_combinaciones=False
    while not fin_combinaciones:
        for n in range(min(max_medidas_an*dt,len(posibles_medidas))):
            print n
            combinaciones = list(combinations(posibles_medidas,n+1))
            combinaciones_aux = combinaciones[:]
            #Eliminamos las que su coste no entré dentro de los tiempos
de implementación o su plazo no permita que se haga en el tiempo previsto:
            for combinacion in combinaciones_aux:
                coste_comb = coste_imp
                comb_posible = True
                posibilidades = []
                for medida in combinacion:
                    coste_comb += dic_costes_imp[tuple(medida)]
                    if dic_tiempos[tuple(medida)]>dt:
                        combinaciones.remove(combinacion)
                        comb_posible=False
                        break
                if coste_comb > tiempo*pres_an and comb_posible:
                    combinaciones.remove(combinacion)
            #Añadimos al vector posibilidades las que sí que cumplen:
            for combinacion in combinaciones:
                combinacion = list(combinacion)
                posibilidades.append(sit_inicial+combinacion)

            #Eliminamos las que no cumplan las condiciones de
priorización:
            for posibilidad, combinacion in zip(posibilidades,
combinaciones):
                if cumple_condiciones (posibilidad, combinacion,
tipos_cond, vector_cond1, vector_cond2, condiciones_group, tiempo, dt,
dic_tiempos) == True:
                    posibilidades_cump.append(posibilidad)
                    combinaciones_cump.append(combinacion)
            if posibilidades_cump == []:
                tiempo += 1
                dt += 1
            else:
                fin_combinaciones = True

```

```

#Eliminamos repetidas para no hacer muchos cálculos:
numero_pos = len(posibilidades_cump)
i=0
while i<numero_pos:
    if len(posibilidades_cump[i])>1 and posibilidades_cump[i][0:-1]
in posibilidades_cump:

combinaciones_cump.remove(combinaciones_cump[posibilidades_cump.index(posibil
idades_cump[i][0:-1]))
    posibilidades_cump.remove(posibilidades_cump[i][0:-1])
    numero_pos += -1
    i=i+1

if posibilidades_cump == [] and medidas_no != []:
    medidas_no = [] #Si no hay ninguna opción que cumpla las
condiciones se acaba la priorizacion
    if verbose: print "No hay más medidas que puedan ser
implementadas porque no cumplen las condiciones introducidas."
    priorizacion_posible = False
else:

#Calculamos el criterio de priorización para cada combinacion:
res_criterio = []
for combinacion in combinaciones_cump:
    riesgo_inic = [0]*(num_var_dano+1)
    riesgo_med = [0]*(num_var_dano+1)
    presa_cons = []
    coste = 0
    for medida in combinacion:
        coste += dic_costes_an[tuple(medida)]
        presa = medida[0]
        if presa not in presa_cons:#El riesgo de la presa aún no
ha sido añadido.
            if medidas_imp [presa] == []:
                riesgo_aux1 =
get_risk(os.path.join(carpeta_hf5[presa],dic_archivos_rutas[presa][ "base" ]),
dic_damage_variables[presa], numero_presas[presa])
            else:
                riesgo_aux1 =
get_risk(os.path.join(carpeta_hf5[presa],dic_archivos_rutas[presa][frozenset(
medidas_imp[presa])]), dic_damage_variables[presa], numero_presas[presa])
                sit_con_med = medidas_imp[presa][:]
                for med in combinacion: #Añadimos medidas implantadas
en la presa
                    if med[1] not in sit_con_med and med[0] == presa:
                        sit_con_med.append(med[1])
                        riesgo_aux2 =
get_risk(os.path.join(carpeta_hf5[presa],dic_archivos_rutas[presa][frozenset(
sit_con_med)]), dic_damage_variables[presa], numero_presas[presa])
                        presa_cons.append(presa)
                        for i in range(len(riesgo_inic)):
                            riesgo_inic[i] += riesgo_aux1[i]
                            riesgo_med[i] += riesgo_aux2[i]

#Comprobacion de que con todas las medidas se reduce riesgo
y/o probabilidad:
for res_ini, res_med in zip(riesgo_inic, riesgo_med):
    if res_ini < res_med:

```

```

        raise "La medida %s no produce una disminución de La
probabilidad de rotura y/o el riesgo." % combinacion[-1]

        #Cálculo del criterio:
        criterio = func_criterio (riesgo_inic, riesgo_med, coste, n)
        #Para ACFSP y CFSP en dos etapas si hay alguna probabilidad
mayor de 1E-4 solo se implantan medidas con esta probabilidad:
        if func_criterio == func_CSFP or func_criterio == func_ACSFP
or func_criterio == func_MFPD2:
            if prob_alta == True and riesgo_inic[0]<1E-4:
                criterio = 1E50
            res_criterio.append(criterio)

#6. ELIJO MEDIDA, HAGO CORRECCIONES Y CREO DATOS DE SALIDA:

#Elijo medida implantada y modifico los vectores de medidas no
implantadas y sit. inicial:

if priorizacion_posible:
    minimo_crit = min (res_criterio)
    pos_minimo = res_criterio.index(minimo_crit)
    sit_inicial = posibilidades_cump[pos_minimo]
    sal_medida_imp = ""
    for medida in combinaciones_cump[pos_minimo]:
        medidas_no.remove(medida)
        sal_medida_imp += "_"+":".join(medida)
        coste_imp += dic_costes_imp[tuple(medida)]
        coste_an += dic_costes_an[tuple(medida)]
        presa_imp = medida[0]
        medidas_imp[presa_imp].append(medida[1])
        #Modifico matriz de riesgos:
        riesgo[presa_imp] =
get_risk(os.path.join(carpeta_hf5[presa_imp],dic_archivos_rutas[presa_imp][fr
ozenset(medidas_imp[presa_imp]))], dic_damage_variables[presa_imp],
numero_presas[presa_imp])

        #Saco las medidas exluyentes y eliminativas del vector
medidas_no (también las asociadas si están en grupo):
        for cond1, cond2, tipo in zip(vector_cond1, vector_cond2,
tipos_cond):
            if tipo.upper() == "EXCL":
                if medida == cond1:
                    medidas_no.remove(cond2)
                    for i in range(len(condiciones_group)):
#Eliminamos también la posibilidad de implantar sus medidas agrupadas
                        cond_group_aux = condiciones_group[i][:]
                        if cond2 in condiciones_group[i]:
                            cond_group_aux.remove(cond2)
                            for med in cond_group_aux:
                                medidas_no.remove(med)
                    if medida == cond2:
                        medidas_no.remove(cond1)
                        for i in range(len(condiciones_group)):
#Eliminamos también la posibilidad de implantar sus medidas agrupadas
                            cond_group_aux = condiciones_group[i][:]
                            if cond1 in condiciones_group[i]:
                                cond_group_aux.remove(cond1)
                                for med in cond_group_aux:
                                    medidas_no.remove(med)

```

```

        if tipo.upper() == "ELIM":
            if medida == cond1 and cond2 in medidas_no:
                medidas_no.remove(cond2)
            for i in range(len(condiciones_group)):
#Eliminamos también la posibilidad de implantar sus medidas agrupadas
                cond_group_aux = condiciones_group[i][:]
                if cond2 in condiciones_group[i]:
                    cond_group_aux.remove(cond2)
                    for med in cond_group_aux:
                        medidas_no.remove(med)

#Modifico matriz de salida de resultados:

salida.append([paso,sal_medida_imp,coste_an,coste_imp,tiempo,minimo_crit])
suma_prob, suma_reur, suma_rvidas = 0,0,0
prob_alta = False
for presa in nombres_presas:
    suma_prob += riesgo[presa][0]
    suma_reur += riesgo[presa][1]
    suma_rvidas += riesgo[presa][2]
    if riesgo[presa][0] > 1E-4:
        for med in medidas_no:
            if med[0] == presa:prob_alta = True
sal_medida_imp = list(sal_medida_imp)
sal_medida_imp.remove("_")
sal_medida_imp="".join(sal_medida_imp)
salida[2+paso].extend([suma_prob, suma_reur, suma_rvidas])
for presa in nombres_presas:
    for i in range(num_var_dano+1):
        salida[2+paso].append(riesgo[presa][i])
if verbose: print "Las medidas %s han sido implantadas." %
sal_medida_imp

#7. SALIDA DE RESULTADOS Y SACAR GRÁFICOS:
escribir_excel(salida, archivo_resultados, hoja_salida)
if verbose and priorizacion_posible: print "Priorización realizada
correctamente."

#Programa para ver si se cumplen las condiciones:
def cumple_condiciones(posibilidad, combinacion, tipos_cond, vector_cond1,
vector_cond2, condiciones_group, tiempo, dt, dic_tiempos):
    cumple=True
    cumple2=True

    for cond1, cond2, tipo in zip(vector_cond1, vector_cond2, tipos_cond):

        #CONDICIONES DE ORDEN:
        if tipo.upper() == 'ORDER': #La medida 1 se implementa antes que la
2.
            if cond1 not in posibilidad and cond2 in posibilidad:#Si está la
2 y no está la 1.
                cumple=False
                if cond1 in combinacion and cond2 in combinacion and dt <=
(dic_tiempos[tuple(cond1)]+dic_tiempos[tuple(cond2)]):#Debe hacerse una
después de la otra
                    cumple=False #Si están las dos en el mismo paso.

```

```

if tipo.upper() == 'EXCL': # Condiciones de exclusion
    if cond1 in combinacion and cond2 in combinacion:
        cumple=False

if tipo.upper() == 'ELIM': # Condiciones de eliminación
    if cond1 in combinacion and cond2 in combinacion:
        cumple=False

#CONDICIÓN DE POSICIÓN:
es_letra = 0
for letra in list(tipo):
    if letra.isalpha(): #Ver si hay alguna letra en la descripción.
        es_letra = 1 #"No se puede convertir a número."

#EN PRIORIZACIÓN GENERAL:
#Caso que la medida con orden definido esté en la combinación (con
corrección para medidas agrupadas):
if es_letra != 1:
    if cond1 in combinacion: #Si está en combinación:
        if (tiempo < float(tipo) or tiempo >= float(tipo)+dt) and
float(tipo) != 0:
            cumple=False

#Caso que la medida con orden definido no esté en la combinación:
if cond1 not in combinacion and float(tipo) != 0: #Si no está en
combinación
    if tiempo >= float(tipo) and tiempo < float(tipo)+dt:
        cumple=False

#CONDICIONES AGRUPADAS:
for cond in condiciones_group:
    for medida in cond:
        cond_aux = cond[:]
        cond_aux.remove(medida)
        for med in cond_aux:
            if medida in combinacion and med not in combinacion:
                cumple=False

return cumple

```

ANEJO 2 DESCRIPCIÓN DE LAS MEDIDAS PROPUESTAS EN EL CASO DE ESTUDIO

A2.1 Resumen de medidas

En total se han introducido 95 medidas de reducción de riesgo en los 26 modelos de riesgo utilizados. A continuación se muestra un listado de las medidas que se han propuesto en cada presa y el código utilizado para definir cada una de ellas:

LISTADO DE MEDIDAS

| PRESA A | | | Coste Implantación |
|---------|-------|---|--------------------------|
| 1 | PEP | Implantación del Plan de Emergencia | 800,000 € + 40,000 €/año |
| 2 | PFC | PEP + Programa de Formación Continua | 800,000 € + 80,000 €/año |
| 3 | COMP | Mantener las compuertas abiertas | 0 € |
| 4 | LALIV | Ampliación de la capacidad de alivio | 2,900,000 € |
| 5 | AUS | Mejora de la auscultación: topografía, movimientos y cimiento | 82,500 € |
| 6 | VACIO | Dejar el embalse en la cota de la toma de agua | 0 € |

| PRESA B | | | Coste Implantación |
|---------|------|---|--------------------------|
| 1 | PEP | Implantación del Plan de Emergencia | 995,879 € + 49,794 €/año |
| 2 | PFC | PEP + Programa de Formación Continua | 995,879 € + 99,588 €/año |
| 3 | EIDC | Reforma del dique de collado 2 para evitar la erosión interna | 3,083,160 € |

| PRESA C | | | Coste Implantación |
|---------|---------|---|--------------------------|
| 1 | PEP | Implantación del Plan de Emergencia | 822,999 € + 41,150 €/año |
| 2 | PFC | PEP + Programa de Formación Continua | 822,999 € + 82,300 €/año |
| 3 | INYCU | Inyecciones en el cuerpo de presa, bloque 2 MD | 18,266 € |
| 4 | INY CIM | Inyecciones de contacto en cimentación de presa | 91,437 € |
| 5 | COMP | Reparaciones en las compuertas del aliviadero | 620,000 € |

| PRESA D | | | Coste Implantación |
|---------|--------|---|--------------------------|
| 1 | PEP | Implantación del Plan de Emergencia | 568,097 € + 28,405 €/año |
| 2 | PFC | PEP + Programa de Formación Continua | 568,097 € + 56,810 €/año |
| 3 | DF | Sustitución del desagüe de fondo | 448,550 € |
| 4 | IMP | Impermeabilización del cuerpo de presa | 491,156 € |
| 5 | DET | Instalación de sistema de auscultación | 140,308 € |
| 6 | PAN | Construcción de una pantalla impermeable + Nuevo DF | 7,500,000 € |
| 7 | FUSERV | Dejar fuera de servicio la presa | 313,950 € |

| PRESA E | | | Coste Implantación |
|---------|------|--|--------------------|
| 1 | CUEN | Renovación del cuenco amortiguador | 640,000 € |
| 2 | COMP | Reparación de las compuertas del aliviadero y renovación de sus accionamientos | 770,000 € |

| PRESA F | | | Coste Implantación |
|---------|------|---|--------------------------|
| 1 | PEP | Implantación del Plan de Emergencia | 359,594 € + 17,979 €/año |
| 2 | DREN | Pantallas de impermeab. y rehabilitación de los sistemas de drenaje | 823,650 € |
| 3 | EH | Rehabilitación y mejora de los equipos hidromecánicos | 3,632,890 € |

| PRESA G | | | Coste Implantación |
|---------|-----|--------------------------------------|--------------------------|
| 1 | PEP | Implantación del Plan de Emergencia | 530,962 € + 26,548 €/año |
| 2 | PFC | PEP + Programa de Formación Continua | 530,962 € + 53,096 €/año |
| 3 | INY | Inyecciones en el cuerpo de presa | 110,000 € |

| PRESA H | | | Coste Implantación |
|---------|-----|--|--------------------|
| 1 | PFC | PEP + Programa de Formación Continua | 30,043 €/año |
| 2 | PIL | Construcción de un encepado con micropilotes | 20,997,460 € |

| PRESA I | | | Coste Implantación |
|---------|------|---|--------------------------|
| 1 | PEP | Implantación del Plan de Emergencia | 482,172 € + 24,109 €/año |
| 2 | PFC | PEP + Programa de Formación Continua | 482,172 € + 48,217 €/año |
| 3 | RESG | Implantación de resguardos de la 1ª Revisión de Seguridad | 0 € |
| 4 | PRE | Refuerzo del pretil de coronación de la presa | 96,730 € |
| 5 | DFI | Rehabilitación del desagüe de fondo izquierdo | 229,484 € |
| 6 | ALIV | Instalación de compuertas en el aliviadero | 560,072 € |

| PRESA J | | | Coste Implantación |
|---------|------|---|--------------------|
| 1 | PEP | Implantación del Plan de Emergencia | 1,002,170 € |
| 2 | DREN | Pantallas de impermeab. y rehabilitación de los sistemas de drenaje | 823,650 € |
| 3 | EH | Rehabilitación y mejora de los equipos hidromecánicos | 446,559 € |

| PRESA K | | | Coste Implantación |
|---------|------|--|--------------------------|
| 1 | PEP | Implantación del Plan de Emergencia | 332,303 € + 16,615 €/año |
| 2 | PFC | PEP + Programa de Formación Continua | 332,303 € + 33,230 €/año |
| 3 | COMP | Renovación de los accionamientos de compuertas | 591,917 € |

| PRESA L | | | Coste Implantación |
|---------|-----|--------------------------------------|--------------------|
| 1 | PFC | PEP + Programa de Formación Continua | 30,000 €/año |

| PRESA M | | | Coste Implantación |
|---------|------|--------------------------------------|--------------------------|
| 1 | PEP | Implantación del Plan de Emergencia | 694,154 € + 34,708 €/año |
| 2 | PFC | PEP + Programa de Formación Continua | 694,154 € + 69,415 €/año |
| 3 | COMP | Actuaciones en las compuertas | 429,827 € |
| 4 | INY | Inyecciones bajo el bloque 8 | 135,000 € |

| PRESA N | | | Coste Implantación |
|---------|-----|--------------------------------------|--------------------------|
| 1 | PEP | Implantación del Plan de Emergencia | 350,000 € + 17,500 €/año |
| 2 | PFC | PEP + Programa de Formación Continua | 350,000 € + 35,000 €/año |

| PRESA O | | | Coste Implantación |
|---------|------|---|--------------------------|
| 1 | PEP | Implantación del Plan de Emergencia | 602,765 € + 30,138 €/año |
| 2 | PFC | PEP + Programa de Formación Continua | 602,765 € + 60,277 €/año |
| 3 | COMP | Sustitución de compuertas de órganos de desagüe | 2,631,603 € |
| 4 | RESG | Implantación de los resguardos de las NEX | 25,000 € |
| 5 | ALIV | Ampliación de la capacidad del aliviadero | 2,050,000 € |

| PRESA P | | | Coste Implantación |
|---------|-----|--------------------------------------|--------------------------|
| 1 | PEP | Implantación del Plan de Emergencia | 482,172 € + 24,109 €/año |
| 2 | PFC | PEP + Programa de Formación Continua | 482,172 € + 48,217 €/año |
| 3 | INY | Inyecciones de juntas horizontales | 245,017 € |

| PRESA Q | | | Coste Implantación |
|---------|------|---|--------------------------|
| 1 | PEP | Implantación del Plan de Emergencia | 880,524 € + 44,026 €/año |
| 2 | PFC | PEP + Programa de Formación Continua | 880,524 € + 88,052 €/año |
| 3 | RESG | Implantación de resguardos de la 1ª Revisión de Seguridad | 0 € |
| 4 | PRE | Refuerzo del pretil de coronación de la presa | 162,350 € |
| 5 | DF | Rehabilitación del desagüe de fondo | 116,807 € |

| PRESA R | | | Coste Implantación |
|---------|-----|---|--------------------------|
| 1 | PEP | Implantación del Plan de Emergencia | 807,361 € + 40,381 €/año |
| 2 | PFC | PEP + Programa de Formación Continua | 807,361 € + 80,763 €/año |
| 3 | AUS | Mejora de la auscultación del estribo izquierdo | 80,000 € |
| 4 | GRU | Instalación de un nuevo grupo electrógeno | 53,138 € |

| PRESA S | | | Coste Implantación |
|---------|-----|---|--------------------------|
| 1 | PEP | Implantación del Plan de Emergencia | 350,000 € + 17,500 €/año |
| 2 | PFC | PEP + Programa de Formación Continua | 350,000 € + 35,000 €/año |
| 3 | DF | Mejora del accionamiento del desagüe de fondo | 78,410 € |

| PRESA T | | | Coste Implantación |
|---------|------|--|--------------------------|
| 1 | PEP | Implantación del Plan de Emergencia | 405,439 € + 20,272 €/año |
| 2 | PFC | PEP + Programa de Formación Continua | 405,439 € + 40,544 €/año |
| 3 | AUS | Instalación de sistema de auscultación | 113,266 € |
| 4 | ALIV | Rebaje del labio del aliviadero | 3,573,379 € |

| PRESA U | | | Coste Implantación |
|---------|-----|--|--------------------------|
| 1 | PEP | Implantación del Plan de Emergencia | 601,528 € + 30,076 €/año |
| 2 | PFC | PEP + Programa de Formación Continua | 601,528 € + 60,153 €/año |
| 3 | DC | Mejora de cimentación del dique de collado | 935,000 € |

| PRESA V | | | Coste Implantación |
|---------|-----|---|--------------------------|
| 1 | PEP | Implantación del Plan de Emergencia | 657,194 € + 32,860 €/año |
| 2 | PFC | PEP + Programa de Formación Continua | 657,194 € + 65,719 €/año |
| 3 | AUS | Inyección en la cimentación + sistema de auscultación | 1,128,061 € |

| PRESA W | | | Coste Implantación |
|---------|-----|---|--------------------------|
| 1 | PEP | Implantación del Plan de Emergencia | 529,814 € + 26,490 €/año |
| 2 | PFC | PEP + Programa de Formación Continua | 529,814 € + 52,981 €/año |
| 3 | AUS | Inyección fisuras+medidores de apertura y extensómetros | 116,000 € |

| PRESA X | | | Coste Implantación |
|---------|-----|---|--------------------------|
| 1 | PEP | Implantación del Plan de Emergencia | 366,963 € + 18,348 €/año |
| 2 | PFC | PEP + Programa de Formación Continua | 366,963 € + 36,696 €/año |
| 3 | DF | Construcción de un nuevo desagüe de fondo | 1,756,079 € |

| PRESA Y | | | Coste Implantación |
|---------|-----|--|--------------------------|
| 1 | PEP | Implantación del Plan de Emergencia | 512,269 € + 25,613 €/año |
| 2 | PFC | PEP + Programa de Formación Continua | 512,269 € + 51,226 €/año |
| 3 | DC1 | Inyección de fisuras D1 + medidores de apertura-cierre | 88,000 € |

| SISTEMA Z | | | Coste Implantación |
|-----------|------|---|--------------------------|
| 1 | PEP | Implantación del Plan de Emergencia | 661,210 € + 33,061 €/año |
| 2 | PFC | PEP + Programa de Formación Continua | 661,210 € + 66,121 €/año |
| 3 | DREN | Z1: Reperforación de drenes | 112,333 € |
| 4 | PRE | Z1: Refuerzo del pretil de coronación | 235,000 € |
| 5 | ALIV | Z2: Mejora del aliviadero para evitar desbordes | 865,000 € |
| 6 | AUS | Z2: Mejora de la auscultación hidráulica | 130,000 € + 6,500 €/año |

A2.2 Medidas en la presa A

A2.2.1 Alternativa 1: Implantación del Plan de Emergencia

Esta mejora consiste en la implantación del Plan de Emergencia de la presa A, que conlleva la mejora de los procedimientos de actuación ante emergencias y una mejor comunicación del peligro a la población a través de sistemas de aviso.

En este caso, esta medida afecta a la pérdida de vidas en los casos de rotura y de no rotura de la presa.

Para incluir el efecto de esta medida dentro del modelo de riesgo, se ha calculado de nuevo la pérdida de vidas utilizando el método de Graham. Para ello se han empleado las tasas de mortalidad empleadas en el proyecto europeo SUFRI [10]. Las tasas de este método se han adaptado para poder estudiar diferentes grados de entendimiento de la severidad de la inundación en función de los sistemas de aviso, la existencia o no de un Plan de Emergencia y la coordinación entre los servicios de emergencia y la formación de la población.

El coste de implantación se ha estimado en 800,000 €, a partir del coste de implantación del Plan de Emergencia en presas de características similares. Además, el coste anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en un 5% del valor de implantación, resultando en 40,000 €.

En la Figura 2.1 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

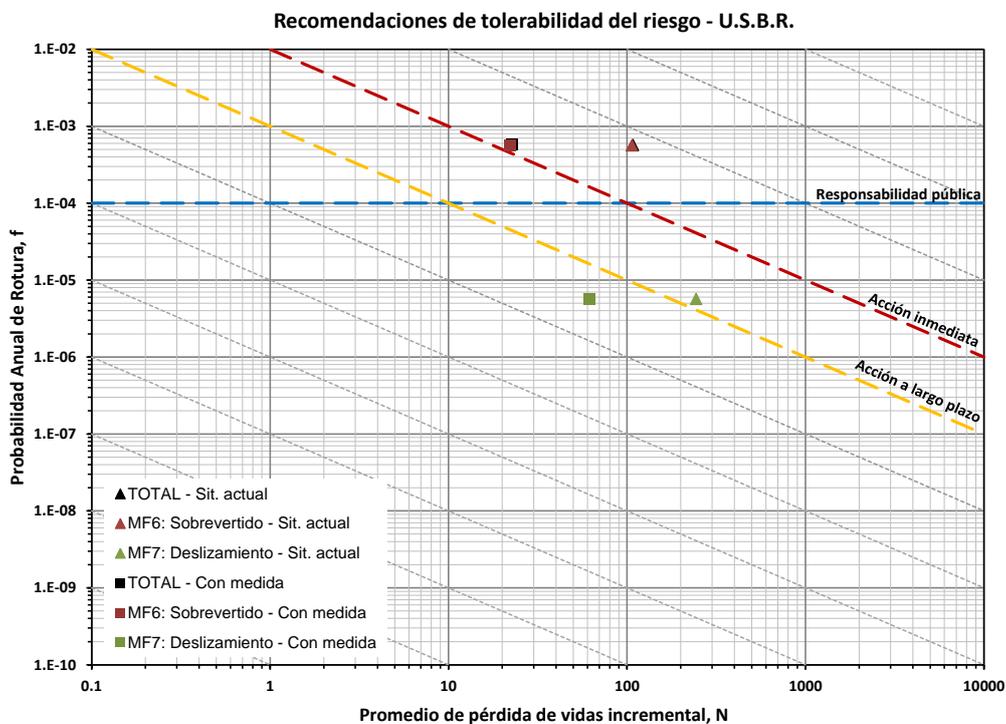


Figura 2.1: Efecto de la implementación del Plan de Emergencia sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

El Plan de Emergencia no modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. En total, el Plan de Emergencia reduce el riesgo en vidas al 21% del riesgo original.

A2.2.2 Alternativa 2: Complementar el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua a la población

Esta alternativa consiste en complementar la implantación del Plan de Emergencia de la Presa A con un Programa de Formación Continua a la población aguas abajo de la presa, con el fin de que ésta conozca perfectamente los procedimientos a seguir y los lugares de refugio a los que deben acudir en el caso de rotura de la presa. Para ello, es necesario un programa de formación continua a la población, incluyendo simulacros, y un funcionamiento eficaz de los medios de comunicación a la población en estos casos y de los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad, con el fin de reducir la pérdida de vidas lo máximo posible.

Como la alternativa anterior, esta alternativa afecta únicamente a la pérdida de vidas. Por ello, los cálculos realizados de pérdida de vidas utilizando el método de Graham se han vuelto a realizar con nuevas tasas de mortalidad que incluyen esta mayor formación de la población.

El coste de implantación de esta alternativa es el mismo que en la alternativa 1. El coste aproximado anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto como el doble del coste de mantenimiento del Plan de Emergencia de la alternativa 1, ya que es necesario un mayor número de recursos y de personal para formar correctamente a la población. Por lo tanto, el coste anual de esta medida es de 80,000 €.

En la Figura 2.2 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

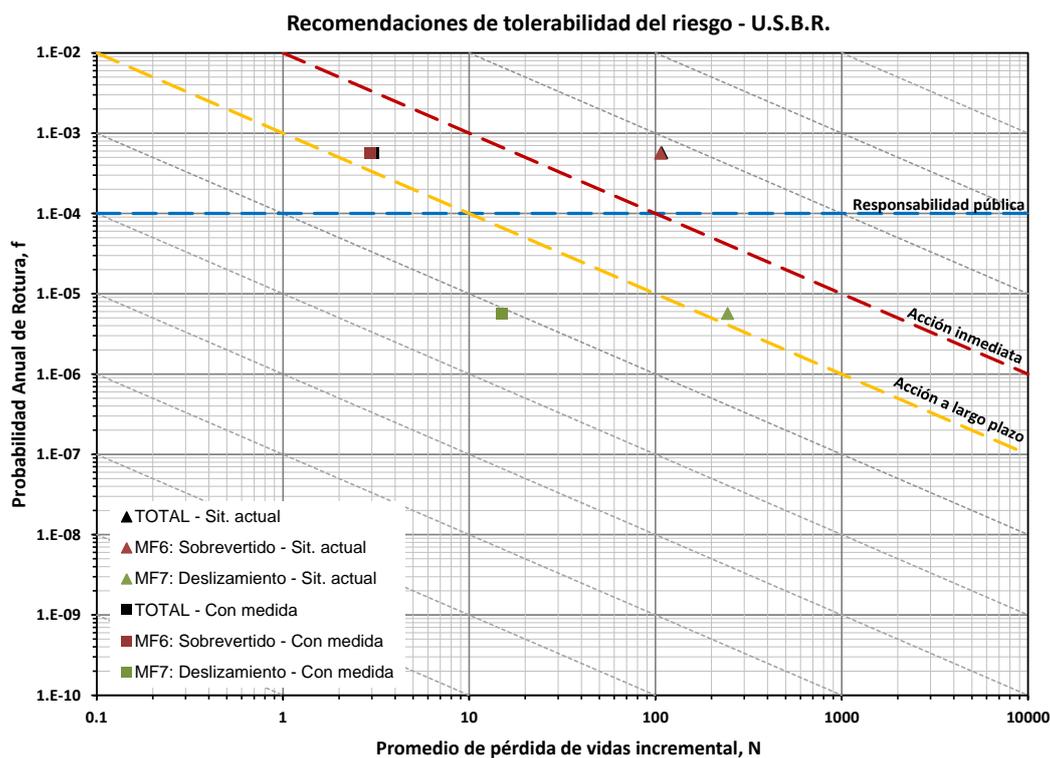


Figura 2.2: Efecto de la implementación del PEP con un Programa de Formación Continua sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida tampoco modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. En total, el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua reduce el riesgo en vidas al 3% del riesgo original.

A2.2.3 Alternativa 3: Mantener las compuertas del aliviadero abiertas

Esta medida consiste en mantener de forma permanente las tres compuertas del aliviadero central abiertas, de esta forma, el aliviadero actúa como un aliviadero de labio fijo. Con esta actuación se disminuye el riesgo de sobrevertido en la presa, ya que los aliviaderos empiezan a verter antes a plena capacidad y no hay riesgo de que alguna compuerta no se pueda operar.

Esta medida modifica el modelo de riesgo en tres nodos:

- **Nodo de operatividad del aliviadero:** La fiabilidad de estos aliviaderos es del 100%, ya que no es necesario operar las compuertas para que funcionen, por lo que en todos los casos los tres vanos del aliviadero estarán operativos. Actúan como aliviaderos de labio fijo.
- **Nodo niveles previos:** Al implantar esta medida, no puede haber un nivel previo a la avenida en el embalse superior a la cota del labio del aliviadero.

- **Nodo de laminación:** La forma de laminar las avenidas se modifica al no haber ningún aliviadero controlado, por lo que cambian las consignas de operación introducidas.

El coste de implantación de esta medida se ha analizado estudiando como este cambio en el volumen embalsado máximo modifica las garantías de las demandas de agua abastecidas por el embalse. Para ello, se ha utilizado un modelo de simulación del sistema de recursos hídricos en el programa AQUATOOL [28]. Mediante este modelo, se ha estimado la diferencia entre el volumen de agua satisfecho entre la situación actual y el caso con las compuertas abiertas. El resultado de este análisis es que mantener las compuertas abiertas no afecta a la garantía de las demandas y por lo tanto, no tiene un coste económico.

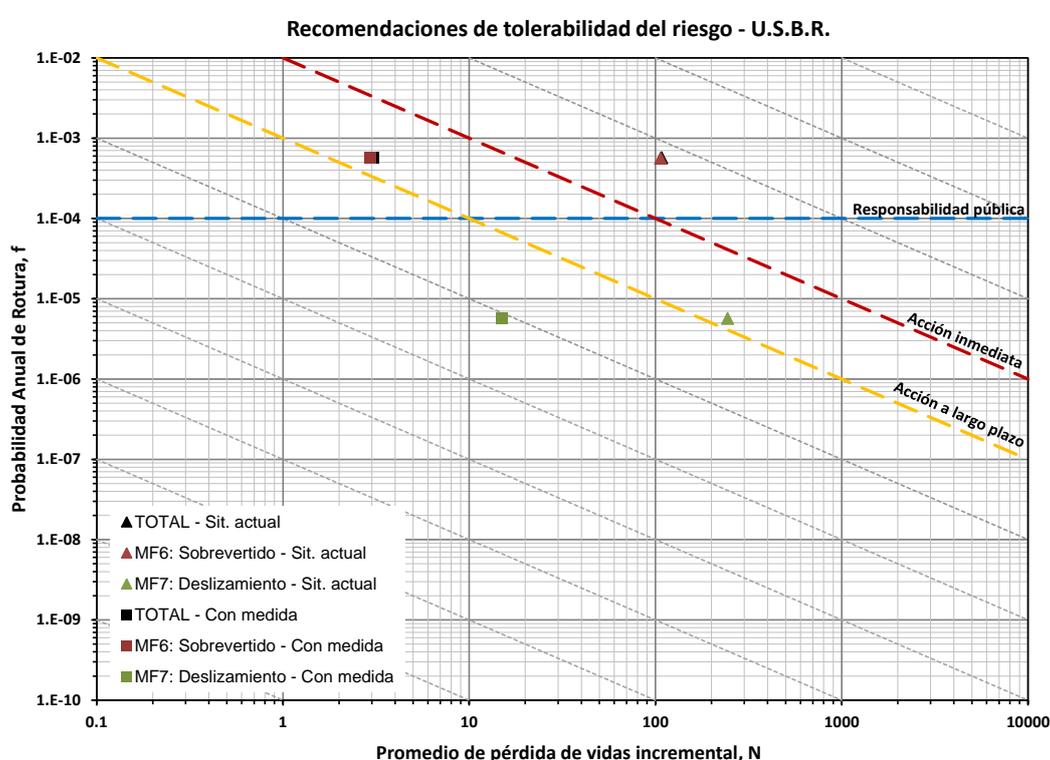


Figura 2.3: Efecto de la implementación del PEP con un Programa de Formación Continua sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida tiene un efecto sobre la probabilidad de fallo, ya que mantener las compuertas abiertas reduce la probabilidad de alcanzar niveles muy altos en el embalse, por lo que se reduce la probabilidad de rotura por deslizamiento y sobrevertido.

A2.2.4 Alternativa 4: Ampliación de la capacidad de alivio

Tras analizar los resultados obtenidos en la laminación, se ha observado que una forma adecuada de reducir el riesgo en esta presa puede ser aumentar la capacidad de alivio, de forma que se reduzcan los niveles alcanzados en el embalse. Para ello, se han analizado diferentes alternativas:

- Rebaje del labio del aliviadero.
- Desagüe de fondo de gran capacidad.
- Aumento de la longitud de vertido del aliviadero.

Tras analizar las ventajas e inconvenientes de cada opción y estudiar las decisiones adoptadas para presas similares, se ha concluido que la mejor opción es el rebaje de la cota del aliviadero, ya que se trata de una presa encajada donde el resto de opciones serían poco viables.

Para definir la actuación necesaria, se ha analizado como aumenta la capacidad del aliviadero en el nivel de coronación en función del rebaje del labio del aliviadero. Según esta relación, la solución óptima es rebajar el labio del aliviadero en 2 metros aproximadamente.

Esta medida afecta principalmente al nodo de laminación de las avenidas, ya que se modifican las curvas de gasto del aliviadero, ya que empiezan a verte para un nivel más bajo.

El coste de implantación de esta medida ha sido estimado mediante un presupuesto estimativo de las obras a realizar y de los equipos necesarios. El coste obtenido es de 2,900,000 €.

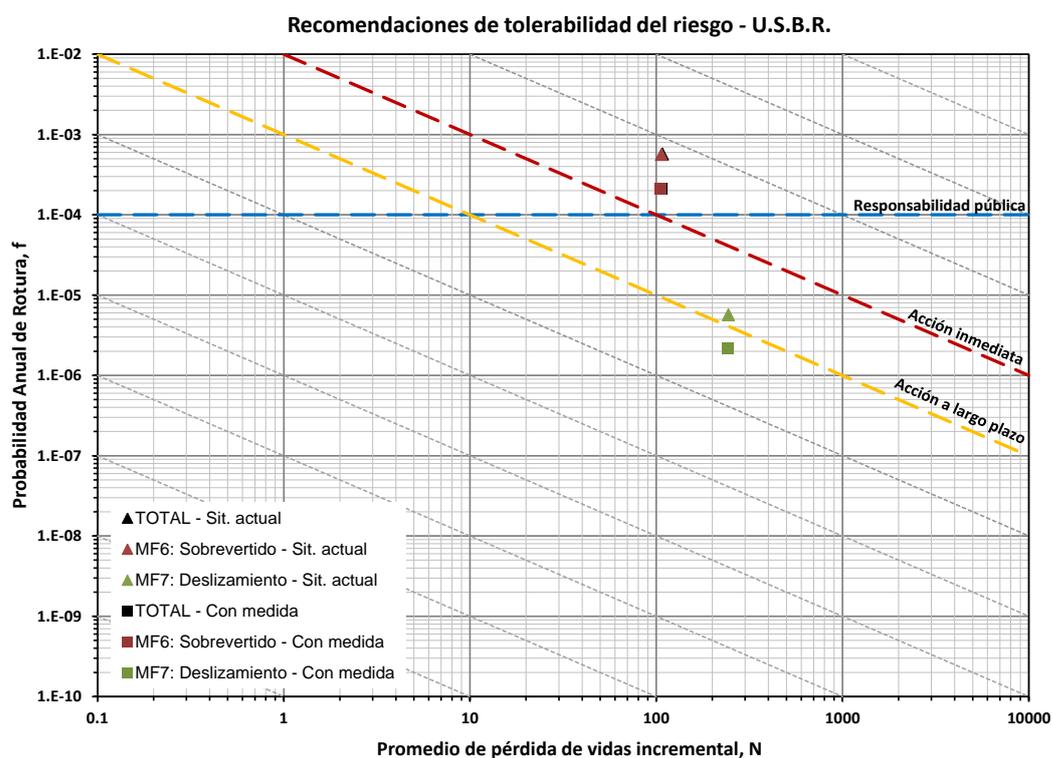


Figura 2.4: Efecto de las inyecciones en la cimentación en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida tiene un efecto sobre los dos modos de fallo, ya que aumentar la capacidad del aliviadero reduce la probabilidad de alcanzar niveles muy altos en el

embalse, por lo que se reduce la probabilidad de rotura por deslizamiento y sobrevertido.

A2.2.5 Alternativa 5: Mejora de la auscultación: topografía, movimientos y cimiento

Esta medida se ha planteado a partir de las recomendaciones del Informe de Identificación de Modos de Fallo. El objetivo de estas actuaciones es mejorar el conocimiento sobre el comportamiento de la presa y del cimiento de forma que se pueda predecir y evitar un fallo de la presa por deslizamiento. El sistema de auscultación propuesto consiste en:

- Instalación de 4 piezómetros de cuerda vibrante en la base de la presa para el control de subpresiones.
- Instalación de 4 extensómetros de varilla para el control de los movimientos.
- Instalación de un sistema de control topográfico.

Esta mejora de auscultación permite un mayor conocimiento de la subpresiones bajo la presa, por lo que afecta al nodo de no detección y/o no intervención de altas subpresiones del modo de fallo por deslizamiento. Para considerar este efecto, se ha modificado la probabilidad de este nodo del 40% al 20%.

El coste de implantación de esta medida ha sido estimado mediante un presupuesto estimativo de las obras a realizar y de los equipos necesarios. El coste obtenido es de 82,500 €.

En la Figura 2.5 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

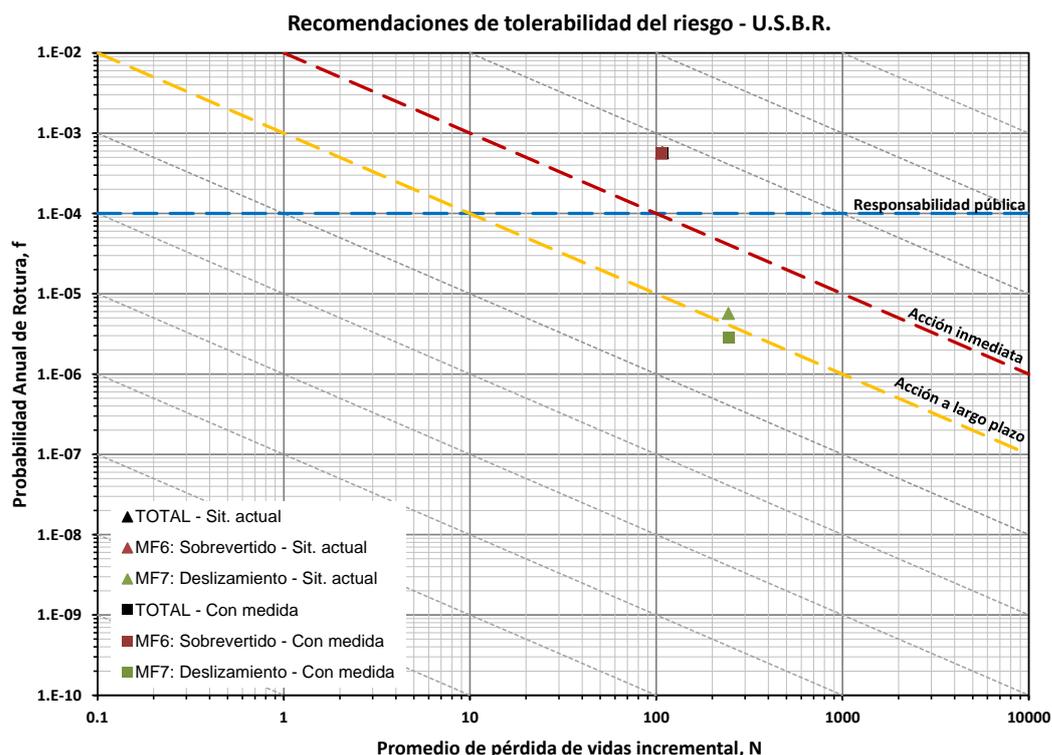


Figura 2.5: Efecto de la mejora de la auscultación sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida tiene un efecto importante sobre el modo de fallo por deslizamiento, ya que reduce de forma importante su probabilidad de fallo. Aunque la probabilidad de fallo total no varía significativamente al ser el sobrevertido el modo de fallo predominante en la presa.

A2.2.6 Alternativa 6: Mantener el embalse en la cota de la toma de agua

Esta medida permite reducir de forma considerable el riesgo manteniendo el embalse casi vacío durante todo el año. La cota fijada para mantener el embalse es la de la toma de agua que abastece las demandas del embalse. El volumen del embalse para esta cota es de 1.65 hm³.

Esta medida afecta principalmente al nodo de niveles previos, ya que se cambia el funcionamiento del embalse para que el nivel previo sea siempre el de la toma en el momento de llegar la avenida, por lo que en este caso, no se introduce una curva de probabilidad de niveles previos sino un único valor con un 100% de probabilidad.

El coste de implantación de esta medida se ha analizado estudiando como este cambio en el volumen embalsado modifica las garantías de las demandas de agua abastecidas por el embalse. Para ello, se ha utilizado un modelo de simulación del sistema de recursos hídricos en el programa AQUATOOL [28]. Mediante este modelo, se ha estimado la diferencia entre el volumen de agua satisfecho entre la situación actual y el caso con el embalse a este nivel. El resultado de este análisis es que este embalse no afecta a la garantía de las demandas y por lo tanto, no tiene un coste económico. Este

hecho es debido a que la puesta en funcionamiento del embalse de aguas arriba supone un volumen de embalse suficiente para abastecer las demandas de esta zona de explotación.

Además, también se considera que cuando esta medida es implementada se mantiene también las compuertas abiertas, ya que no tendría sentido mantenerlas cerradas si el nivel del embalse no alcanza este nivel. Por este motivo, también se modifican los nodos de operatividad de compuertas y laminación, tal y como se indica en la descripción de la alternativa 3.

En la Figura 2.6 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

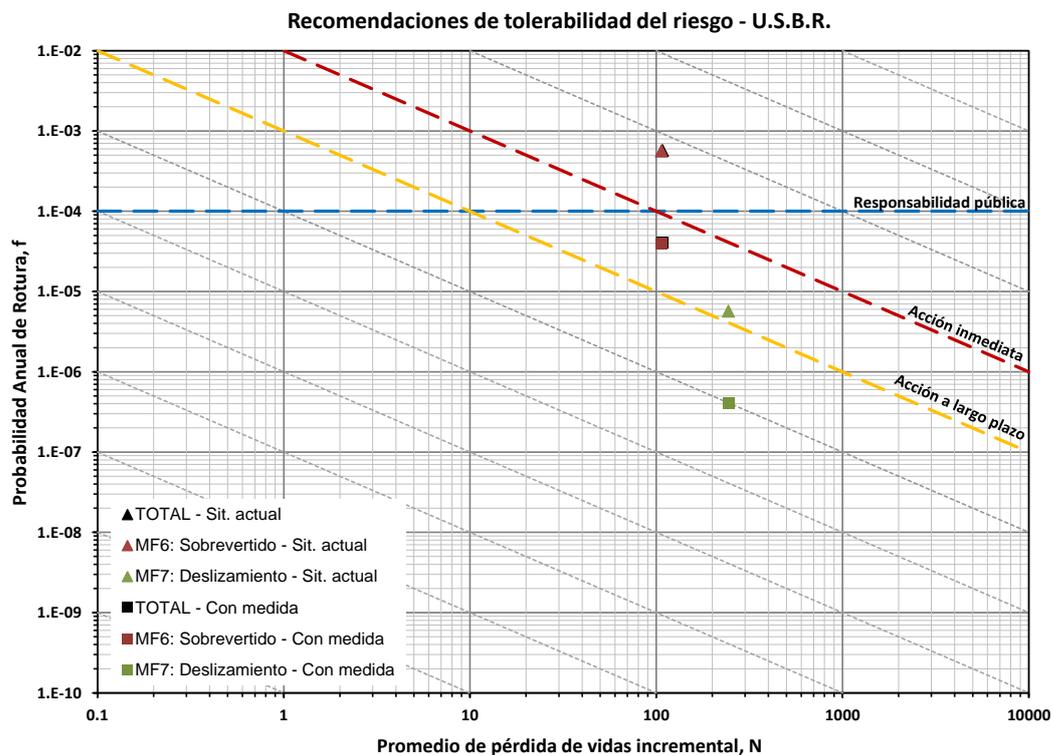


Figura 2.6: Efecto de mantener el embalse en el nivel de la toma sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida tiene un efecto sobre los dos modos de fallo, ya que mantener el embalse a esta cota reduce la probabilidad de alcanzar niveles muy altos en el embalse, por lo que se reduce la probabilidad de rotura por deslizamiento y sobrevertido, pasando a estar el embalse por debajo de la recomendación de tolerabilidad para acción inmediata.

A2.2.7 Resumen

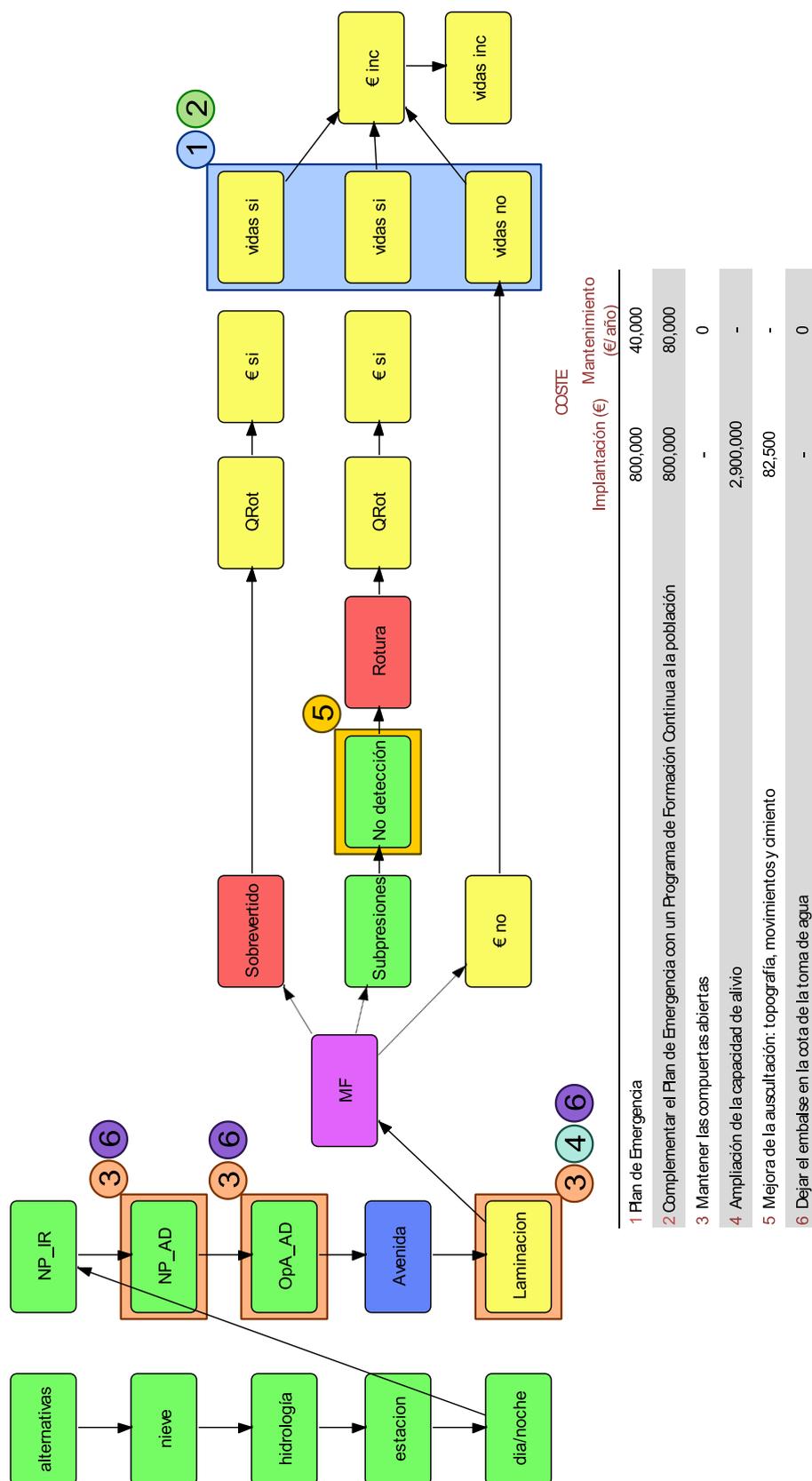


Figura 2.7: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medidas de reducción de riesgo planteadas en la presa A.

A2.3 Medidas en la presa B

A2.3.1 Alternativa 1: Implantación del Plan de Emergencia

Esta mejora consiste en la implantación del Plan de Emergencia de la presa B, que conlleva la mejora de los procedimientos de actuación ante emergencias y una mejor comunicación del peligro a la población a través de sistemas de aviso.

En este caso, esta medida afecta a la pérdida de vidas en los casos de rotura y de no rotura de la presa.

Para incluir el efecto de esta medida dentro del modelo de riesgo, se ha calculado de nuevo la pérdida de vidas utilizando el método de Graham. Para ello se han empleado las tasas de mortalidad empleadas en el proyecto europeo SUFRI [10]. Las tasas de este método se han adaptado para poder estudiar diferentes grados de entendimiento de la severidad de la inundación en función de los sistemas de aviso, la existencia o no de un Plan de Emergencia y la coordinación entre los servicios de emergencia y la formación de la población.

El coste aproximado de la implantación de esta alternativa es de 995,879 € con un IVA del 18%. Además, el coste anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en un 5% del valor de implantación, resultando en 49,794 €.

En la Figura 2.8 se muestra el efecto de esta medida sobre el riesgo de la presa.

A2.3.2 Alternativa 2: Complementar el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua a la población

Esta alternativa consiste en complementar la implantación del Plan de Emergencia de la Presa B con un Programa de Formación Continua a la población aguas abajo de la presa, con el fin de que ésta conozca perfectamente los procedimientos a seguir y los lugares de refugio a los que deben acudir en el caso de rotura de la presa. Para ello, es necesario un programa de formación continua a la población, incluyendo simulacros, y un funcionamiento eficaz de los medios de comunicación a la población en estos casos y de los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad, con el fin de reducir la pérdida de vidas lo máximo posible.

Como la alternativa anterior, esta alternativa afecta únicamente a la pérdida de vidas. Por ello, los cálculos realizados de pérdida de vidas utilizando el método de Graham se han vuelto a realizar con nuevas tasas de mortalidad que incluyen esta mayor formación de la población.

El coste de implantación de esta alternativa es el mismo que en la alternativa 1. El coste aproximado anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto como el doble del coste de mantenimiento del Plan de Emergencia de la alternativa 1, ya que es necesario un mayor número de recursos y de personal para formar correctamente a la población. Por lo tanto, el coste anual de esta medida es de 99,588 €.

A2.3.3 Alternativa 3: Reforma del dique de collado 1 para evitar un proceso de erosión interna

Esta alternativa se ha planteado debido a la posibilidad de que el dique de collado 1 presente problemas de erosión interna, como se ha concluido tras analizar su estado. Por lo tanto, consiste en realizar una reforma del dique que permita descartar los problemas de erosión interna que se podrían desarrollar en este dique de collado.

Para incluir el efecto de esta alternativa en el modelo de riesgo se ha considerado que la probabilidad de desarrollo de erosión interna en este dique tras la reforma es nula, por lo que este modo de fallo ya no influye en los resultados.

Con el fin de estimar el coste de construcción de esta reforma, se ha diseñado una reforma del dique de collado que consiste en añadir un metro de filtro de arena y un espaldón de grava de 5 metros de espesor con el fin de favorecer el drenaje y evitar de esta forma la erosión interna. Esta reforma se ha analizado realizando un presupuesto de las diferentes unidades de obra que componen la reforma y obteniendo un coste total de 3,083,160 €.

En la Figura 2.8 se muestra el efecto de esta medida sobre el riesgo de la presa.

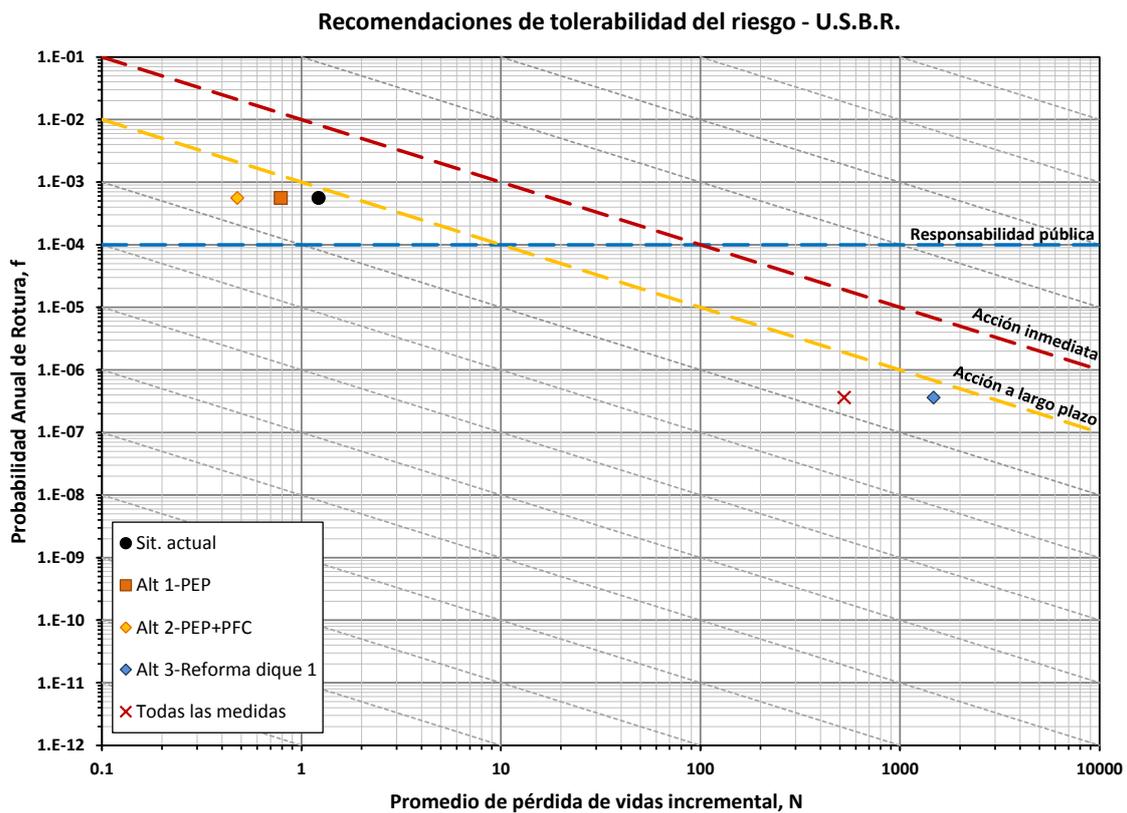


Figura 2.8: Efecto de las medidas en la presa B sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

A2.3.4 Resumen

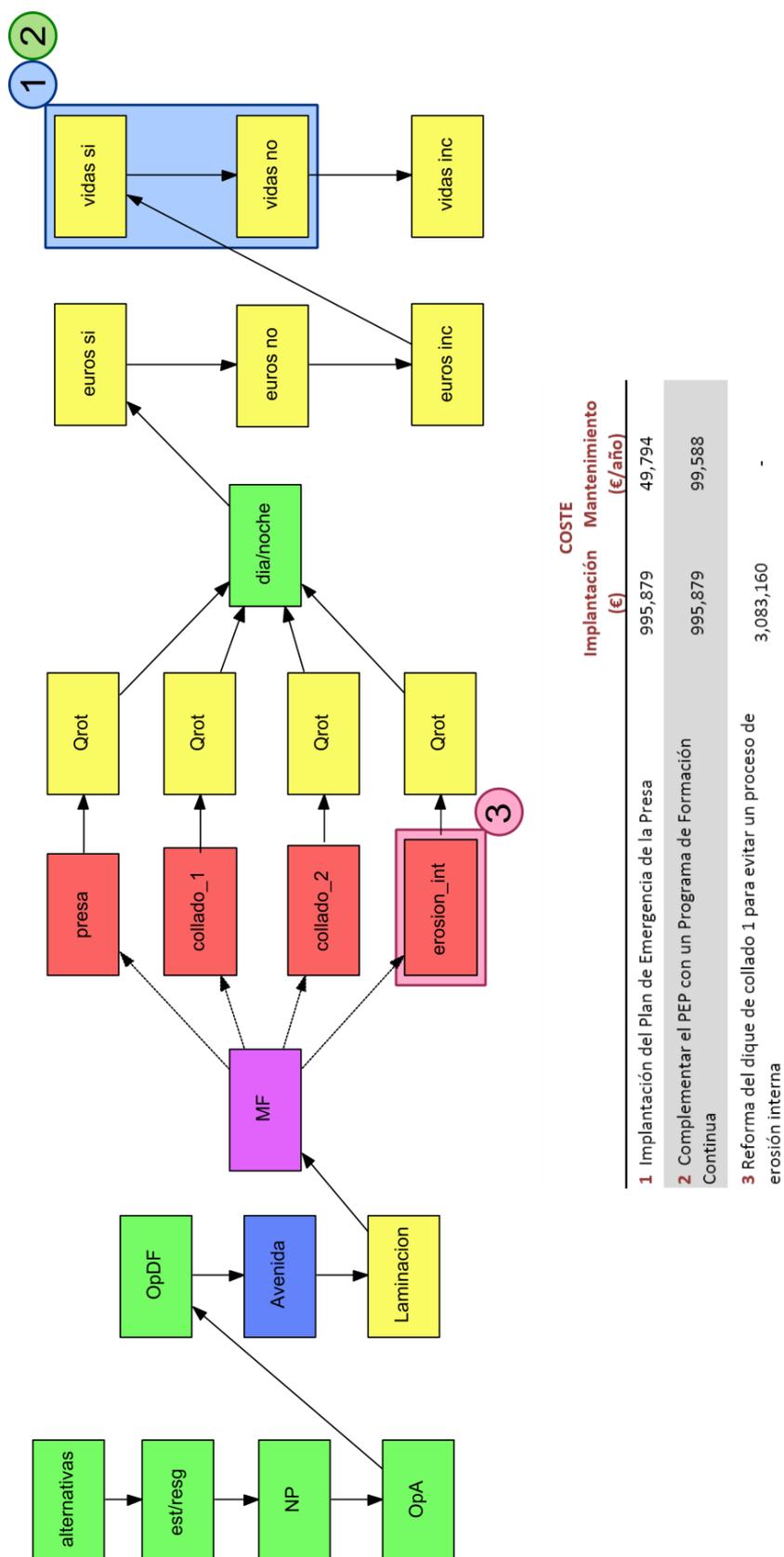


Figura 2.9: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medidas de reducción de riesgo planteadas en la presa B.

A2.4 Medidas en la presa C

A2.4.1 Alternativa 1: Implantación del Plan de Emergencia

Esta mejora consiste en la implantación del Plan de Emergencia de la presa B, que conlleva la mejora de los procedimientos de actuación ante emergencias y una mejor comunicación del peligro a la población a través de sistemas de aviso.

En este caso, esta medida afecta a la pérdida de vidas en los casos de rotura y de no rotura de la presa.

Para incluir el efecto de esta medida dentro del modelo de riesgo, se ha calculado de nuevo la pérdida de vidas utilizando el método de Graham. Para ello se han empleado las tasas de mortalidad empleadas en el proyecto europeo SUFRI [10]. Las tasas de este método se han adaptado para poder estudiar diferentes grados de entendimiento de la severidad de la inundación en función de los sistemas de aviso, la existencia o no de un Plan de Emergencia y la coordinación entre los servicios de emergencia y la formación de la población.

El coste de implantación de esta medida es de 822,999 €, según el Proyecto de Implantación del Plan de Emergencia. Además, el coste anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en un 5% del valor de implantación, resultando en 41,150 €.

En la Figura 2.10 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

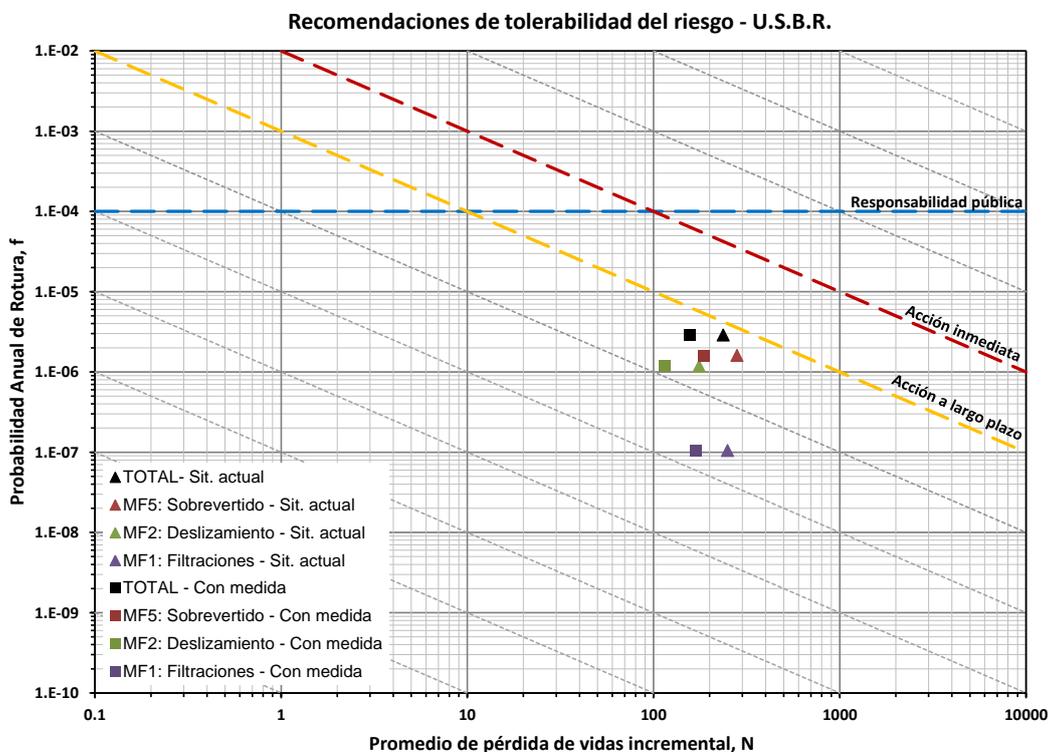


Figura 2.10: Efecto de la implementación del Plan de Emergencia sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, el Plan de Emergencia no modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia reduce el riesgo en vidas al 66% del riesgo original.

A2.4.2 Alternativa 2: Complementar el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua a la población

Esta alternativa consiste en complementar la implantación del Plan de Emergencia de la Presa C con un Programa de Formación Continua a la población aguas abajo de la presa, con el fin de que ésta conozca perfectamente los procedimientos a seguir y los lugares de refugio a los que deben acudir en el caso de rotura de la presa. Para ello, es necesario un programa de formación continua a la población, incluyendo simulacros, y un funcionamiento eficaz de los medios de comunicación a la población en estos casos y de los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad, con el fin de reducir la pérdida de vidas lo máximo posible.

Como la alternativa anterior, esta alternativa afecta únicamente a la pérdida de vidas. Por ello, los cálculos realizados de pérdida de vidas utilizando el método de Graham se han vuelto a realizar con nuevas tasas de mortalidad que incluyen esta mayor formación de la población.

Con estos resultados, los datos introducidos en el modelo en los nodos de pérdida de vidas se muestran en la Figura 2.11.

El coste de implantación de esta alternativa es el mismo que en la alternativa 1. El coste aproximado anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto como el doble del coste de mantenimiento del Plan de Emergencia de la alternativa 1, ya que es necesario un mayor número de recursos y de personal para formar correctamente a la población. Por lo tanto, el coste anual de esta medida es de 82,300 €.

En la Figura 2.2 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

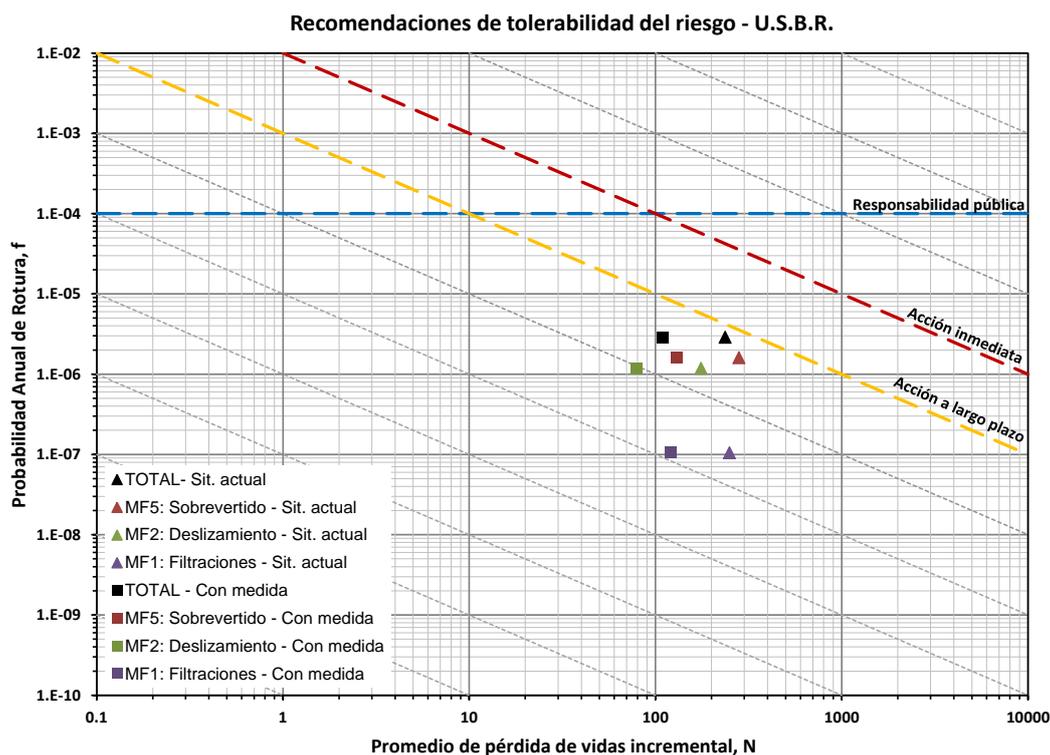


Figura 2.11: Efecto de la implementación del PEP con un Programa de Formación Continua sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, esta medida tampoco modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua reduce el riesgo en vidas al 46% del riesgo original.

A2.4.3 Alternativa 3: Inyecciones en junta horizontal del bloque 2 del cuerpo de presa

Esta medida se encuentra prevista dentro del Proyecto de Adecuación al Reglamento Técnico de Presas y Embalses. El objetivo de esta medida es evitar las filtraciones que se están produciendo a través de una de las juntas horizontales del bloque 2. De esta forma, se reduce la probabilidad de ocurrencia del modo de fallo por filtraciones en una junta horizontal, que ha sido identificado a raíz de este problema.

En concreto, la medida consiste en una pantalla de inyecciones formada por 6 taladros de diámetro de 46 mm, ejecutados desde coronación a 2.3 m del paramento de aguas abajo, y 14 m de longitud. Para ello, se utilizará un microcemento de granulometría inferior a 12 μ m y relación C/A=0.66.

Esta actuación disminuye la probabilidad de ocurrencia del modo de fallo por filtraciones en junta horizontal. Para incluir el efecto de esta medida sobre el modelo de riesgo se ha modificado el nodo de ocurrencia de altas filtraciones, disminuyendo

su probabilidad un orden de magnitud (de 37.7% a 3.77%), ya que la realización de las inyecciones actúa directamente sobre el mecanismo de este nodo.

El coste de implantación de esta medida está contemplado en el citado proyecto y es de 18,266 €.

En la Figura 2.12 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

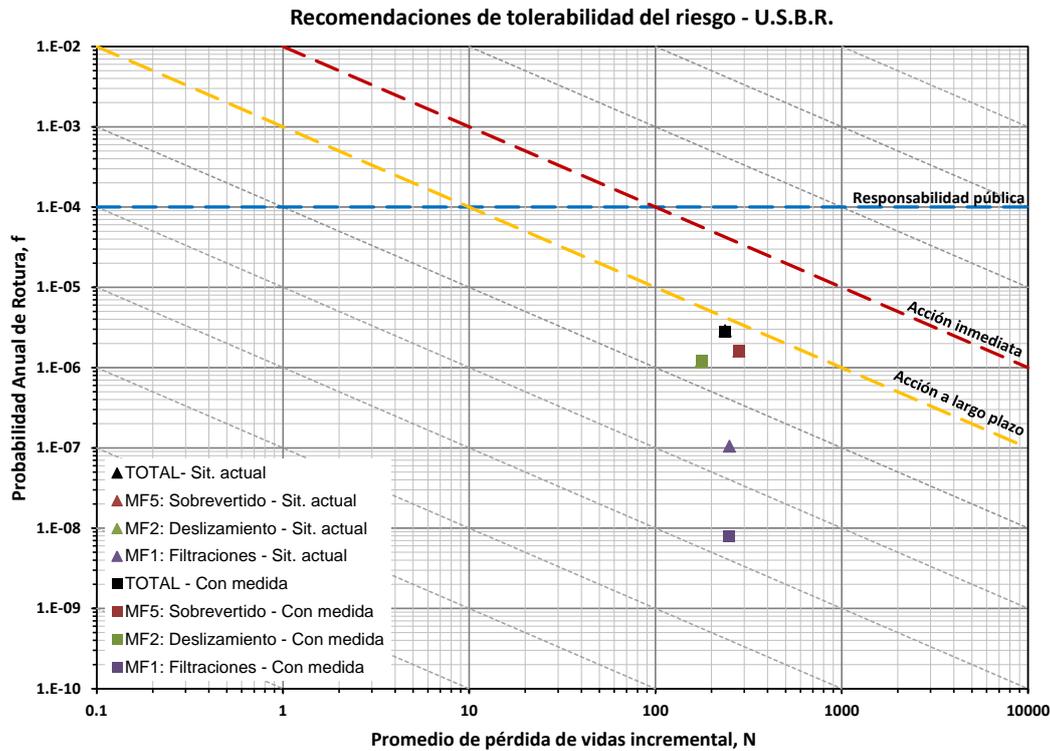


Figura 2.12: Efecto de las inyecciones en la junta horizontal en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida afecta principalmente al modo de fallo por filtraciones, reduciendo de forma apreciable su probabilidad de fallo. Aunque cómo la probabilidad de este modo de fallo respecto al sobrevvertido y el deslizamiento es baja, el efecto de esta medida sobre el riesgo total de la presa es bajo también.

A2.4.4 Alternativa 4: Inyecciones de contacto bajo la cimentación de la presa

Esta medida se encuentra prevista dentro del Proyecto de Adecuación al Reglamento Técnico de Presas y Embalses. El objetivo de esta medida es mejorar la impermeabilización del cimiento para tener menores subpresiones en la base de la presa. De esta forma, se reduce la probabilidad de ocurrencia del modo de fallo por deslizamiento.

En concreto, la medida consiste en inyecciones de contacto en la zona de los drenes 14-16 y 32-36 mediante cortina de taladros realizados con sondeo de 46 mm y longitud

media 25 m, espaciados 2 m entre sí. Para ello, se utilizará un microcemento de granulometría inferior a 12 μm y relación C/A=0.66. Esta alternativa afecta al nodo de altas subpresiones, ya que la realización de estas inyecciones reduce la probabilidad de tener altas subpresiones bajo la presa. Por lo tanto, esta medida únicamente reduce la probabilidad del modo de fallo por deslizamiento. Esta medida ha sido introducida en el modelo de riesgo modificando el nodo de altas subpresiones del 60% al 20%.

El coste de implantación de esta medida está contemplado en el citado proyecto y es de 91,437 €.

En la Figura 2.13 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

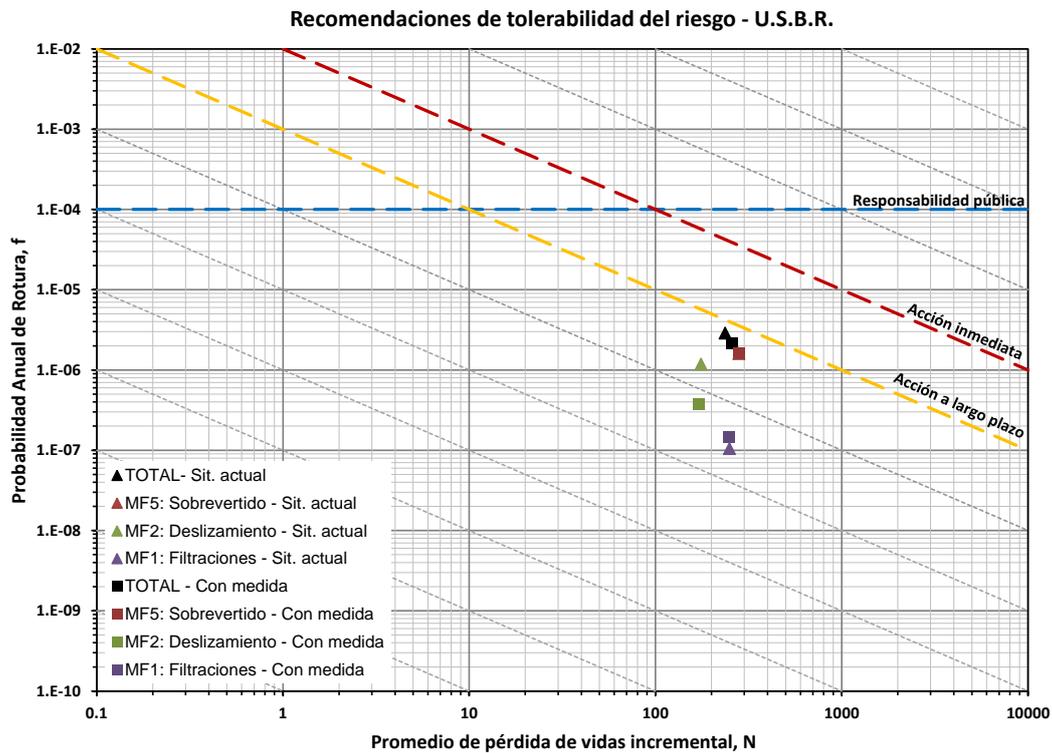


Figura 2.13: Efecto de las inyecciones en la cimentación en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida afecta principalmente al modo de fallo por deslizamiento, reduciendo de forma apreciable su probabilidad de fallo. Este hecho produce una disminución del riesgo en la presa, pasando a ser el modo de fallo por sobrevertido claramente el predominante.

A2.4.5 Alternativa 5: Reparaciones en las compuertas del aliviadero

Esta medida se ha planteado a partir de las recomendaciones del Informe de Identificación de Modos de Fallo. El objetivo de estas actuaciones es mejorar el funcionamiento de las compuertas del aliviadero de forma que se pueda aumentar su fiabilidad, para ello, se propone sustituir los principales elementos de la compuerta, ya

que la estructura de las compuertas actuales presenta algunas dudas por falta de rigidez e insuficiente resistencia a torsión.

Esta alternativa afecta al nodo de operatividad del aliviadero, ya que mejora la fiabilidad de sus compuertas. En este caso, se ha considerado que estas actuaciones producen una mejora en la fiabilidad individual de las compuertas del 85% al 95%.

El coste de implantación de esta medida ha sido estimado mediante un presupuesto estimativo de las obras a realizar y de los equipos necesarios. El coste obtenido es de 620,000 €.

En la Figura 2.14 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

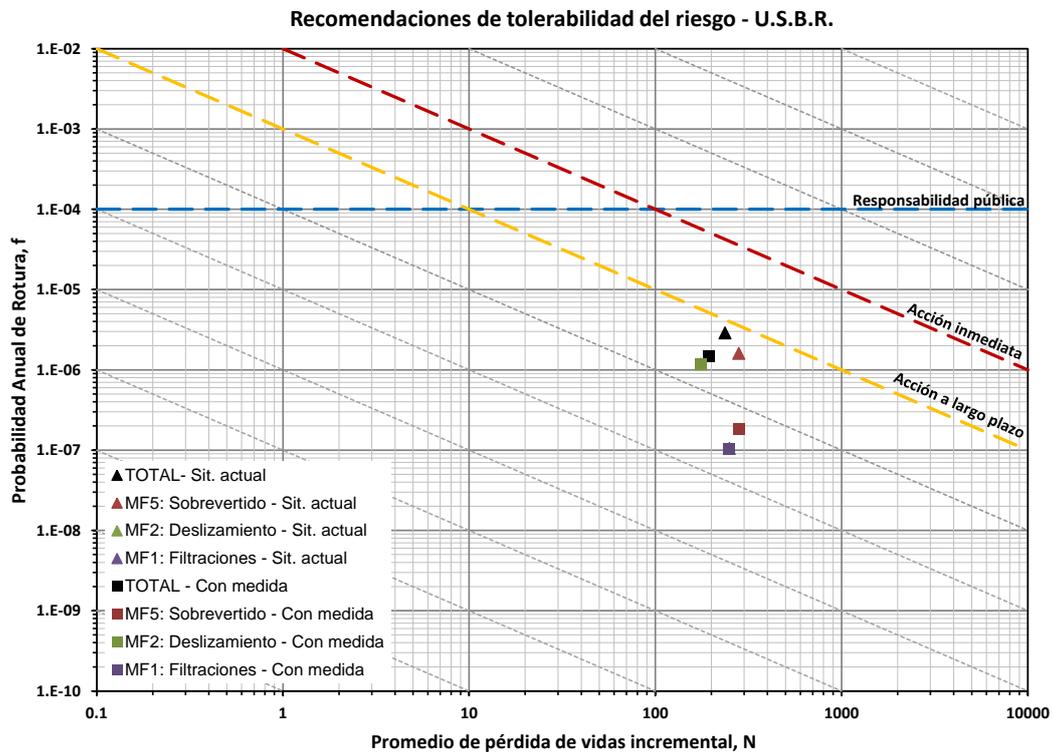


Figura 2.14: Efecto de la mejora de las compuertas sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida tiene un efecto sobre los tres modos de fallo, ya que una mejora de la fiabilidad reduce la probabilidad de alcanzar niveles muy altos en el embalse, por lo que se reduce la probabilidad de rotura por altas filtraciones, deslizamiento y especialmente, por sobrevertido.

A2.4.6 Resumen

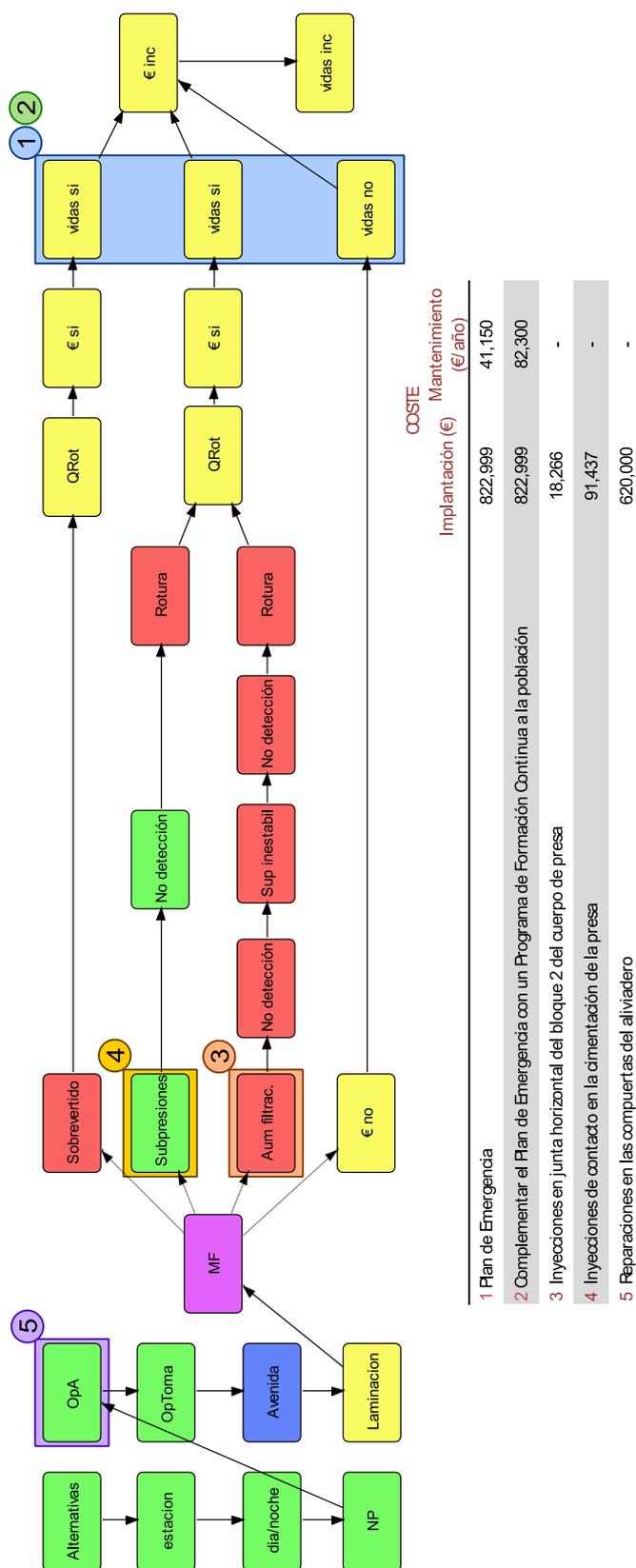


Figura 2.15: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medidas de reducción de riesgo planteadas en la presa C.

A2.5 Medidas en la presa D

A2.5.1 Alternativa 1: Implantación del Plan de Emergencia

Esta mejora consiste en la implantación del Plan de Emergencia de la presa D, que conlleva la mejora de los procedimientos de actuación ante emergencias y una mejor comunicación del peligro a la población a través de sistemas de aviso.

En este caso, esta medida afecta a la pérdida de vidas de la presa en el caso de rotura y de no rotura. Por lo tanto, esta medida afecta a los nodos de pérdida de vidas del modelo.

Para incluir el efecto de esta medida dentro del modelo de riesgo, se ha calculado de nuevo la pérdida de vidas utilizando el método de Graham. Para ello se han empleado las tasas de mortalidad empleadas en el proyecto europeo SUFRI [10]. Las tasas de este método se han adaptado para poder estudiar diferentes grados de entendimiento de la severidad de la inundación en función de los sistemas de aviso, la existencia o no de un Plan de Emergencia y la coordinación entre los servicios de emergencia y la formación de la población.

El coste de implantación de esta medida es de 568,097 €, según el Proyecto de Implantación del Plan de Emergencia. Además, el coste anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en un 5% del valor de implantación, resultando en 28,045 €.

En la Figura 2.16 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

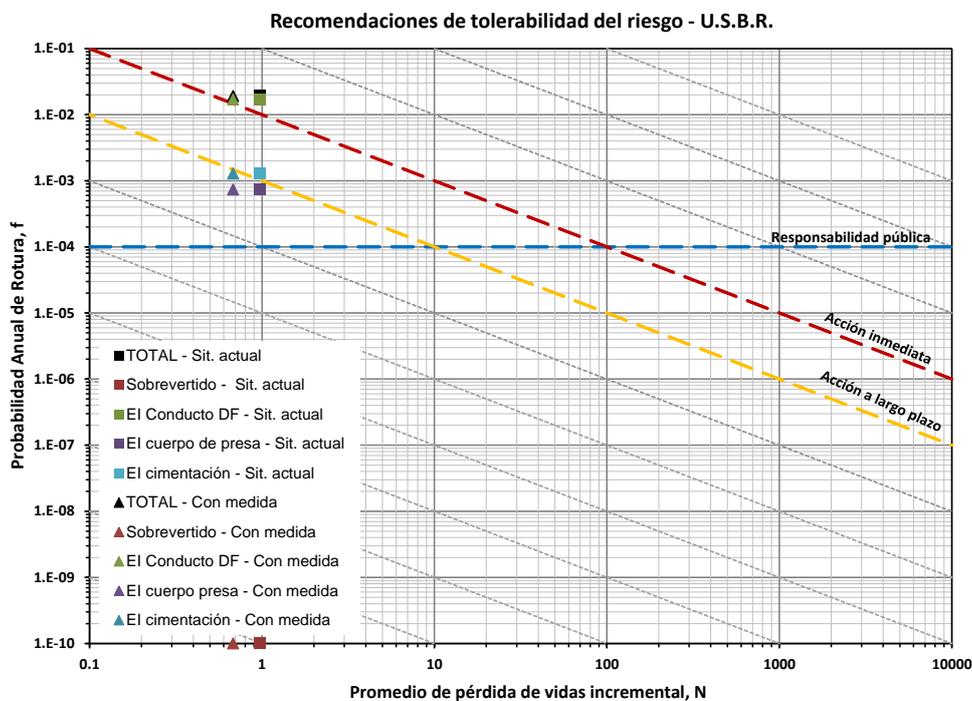


Figura 2.16: Efecto de la implementación del Plan de Emergencia sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, el Plan de Emergencia no modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia reduce el riesgo en vidas al 70% del riesgo original.

A2.5.2 Alternativa 2: Complementar el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua a la población

Esta alternativa consiste en complementar la implantación del Plan de Emergencia de la Presa D con un Programa de Formación Continua a la población aguas abajo de la presa, con el fin de que ésta conozca perfectamente los procedimientos a seguir y los lugares de refugio a los que deben acudir en el caso de rotura de la presa. Para ello, es necesario un programa de formación continua a la población, incluyendo simulacros, y un funcionamiento eficaz de los medios de comunicación a la población en estos casos y de los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad, con el fin de reducir la pérdida de vidas lo máximo posible.

Como la alternativa anterior, esta alternativa afecta únicamente a la pérdida de vidas. Por ello, los cálculos realizados de pérdida de vidas utilizando el método de Graham se han vuelto a realizar con nuevas tasas de mortalidad que incluyen esta mayor formación de la población.

El coste de implantación de esta alternativa es el mismo que en la alternativa 1. El coste aproximado anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto como el doble del coste de mantenimiento del Plan de Emergencia de la alternativa 1, ya que es necesario un mayor número de recursos y de personal para formar correctamente a la población. Por lo tanto, el coste anual de esta medida es de 56,810 €.

En la Figura 2.17 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

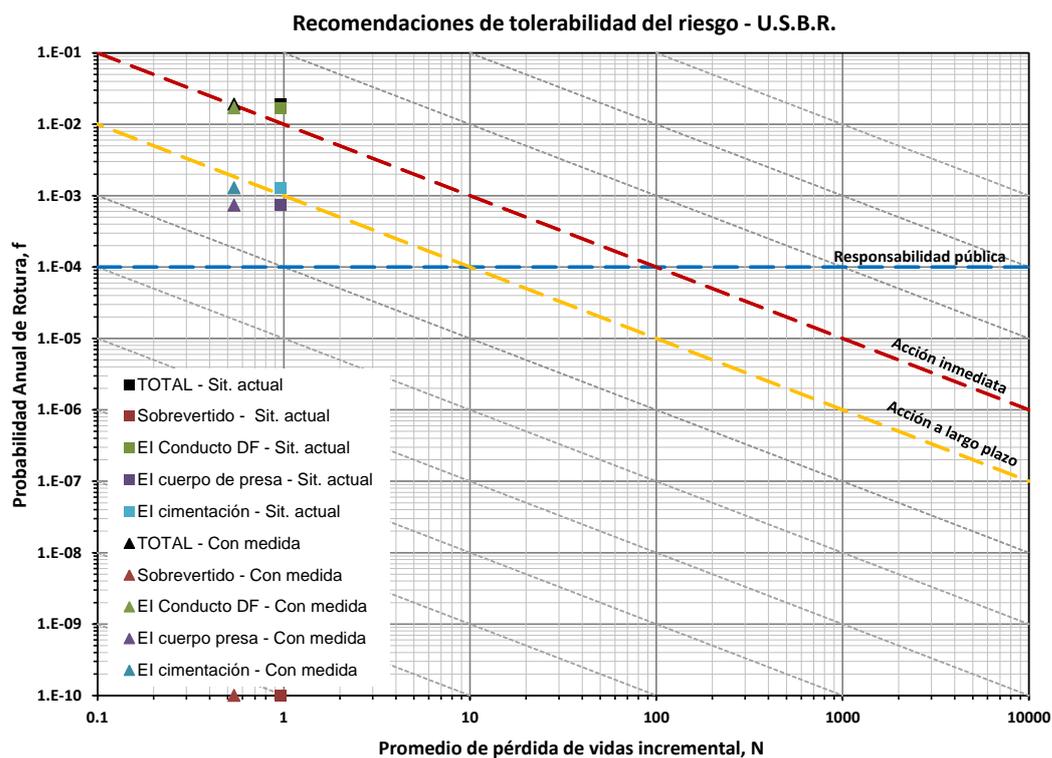


Figura 2.17: Efecto de la implementación del PEP con un Programa de Formación Continua sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, esta medida tampoco modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua reduce el riesgo en vidas al 56% del riesgo original.

A2.5.3 Alternativa 3: Sustitución del desagüe de fondo

Esta medida se encuentra planteada en el informe de actuaciones necesarias para continuar con la explotación de la presa D y pretende evitar el desarrollo de un posible proceso de erosión interna a través del conducto de este desagüe, además de instalar un nuevo desagüe de fondo que cumpla el reglamento actual. La actuación propuesta consiste en:

- Sellado del conducto del desagüe de fondo actual mediante mortero de sellado rápido.
- Nuevo desagüe de fondo de forma que se cumpla el Reglamento en lo referente a disponer de doble conducto con doble cierre.
- Disposición de un pequeño grupo electrógeno y un motor de explosión como doble sistema energético alternativo.

Esta alternativa afecta principalmente al modo de fallo de erosión interna a través del conducto del desagüe de fondo, cuya probabilidad desaparecería, ya que el nuevo desagüe de fondo no pasaría por bajo del cuerpo de presa, por lo que no podría desarrollarse un proceso de erosión interna a través de él.

El coste de implantación estimativo de esta medida se encuentra en el mencionado informe y es de 448,550 €.

En la Figura 2.5 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

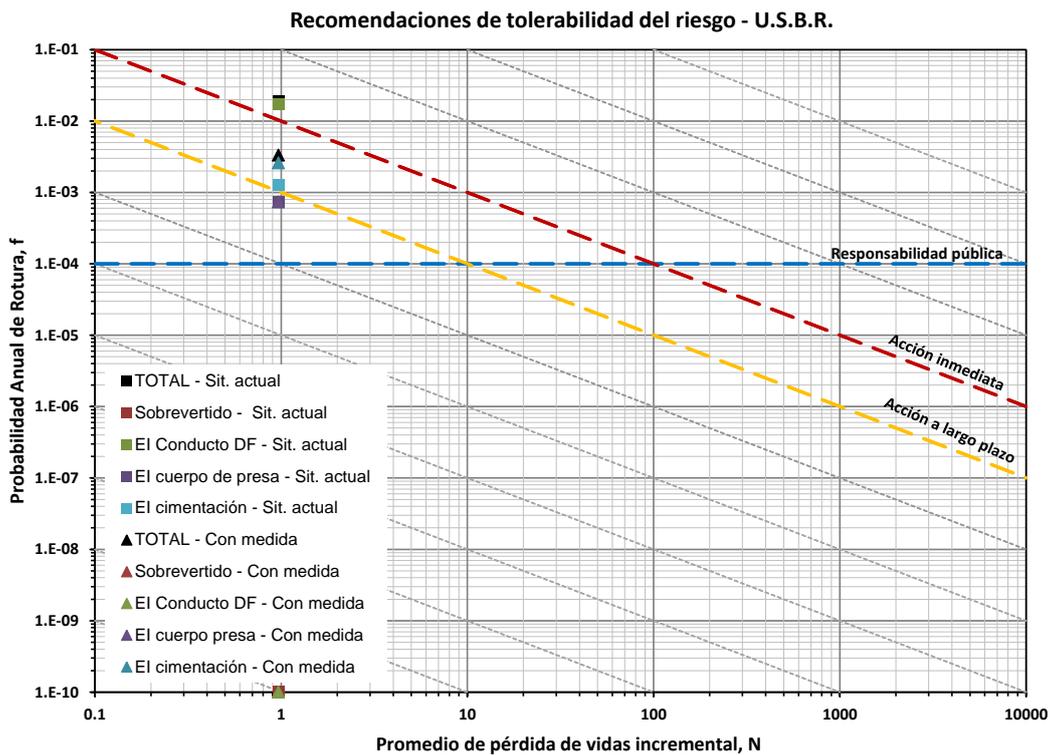


Figura 2.18: Efecto de la sustitución del desagüe de fondo sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida elimina el modo de fallo por erosión interna a través del desagüe de fondo. Como este es el modo de fallo predominante en la presa, la implantación de esta medida disminuye también considerablemente la probabilidad de rotura en la presa, que pasa a ser un 17% de la probabilidad en la situación actual.

A2.5.4 Alternativa 4: Impermeabilización del cuerpo de presa

Esta medida se encuentra planteada en el informe de actuaciones necesarias para continuar con la explotación de la presa D y pretende evitar el desarrollo de un posible proceso de erosión interna a través del cuerpo de presa. La actuación propuesta consiste en una mejora del paramento de aguas arriba mediante:

- Capa base de material.
- Lamina de polietileno de alta densidad de espesor 3.5 mm.

- Capa de apoyo de arena de 50 mm de espesor.
- Capa de protección.

Esta alternativa afecta principalmente al modo de fallo de erosión interna a través del cuerpo de presa. Para introducir esta alternativa en el modelo se ha considerado que este modo de fallo desaparece, ya que la actuación prevista disminuiría de forma muy significativa la posibilidad de erosión interna a través del cuerpo de presa, por lo que este modo de fallo no competiría con el resto de procesos de erosión interna.

El coste de implantación estimativo de esta medida se encuentra en el mencionado informe y es de 491,156 €.

En la Figura 2.19 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

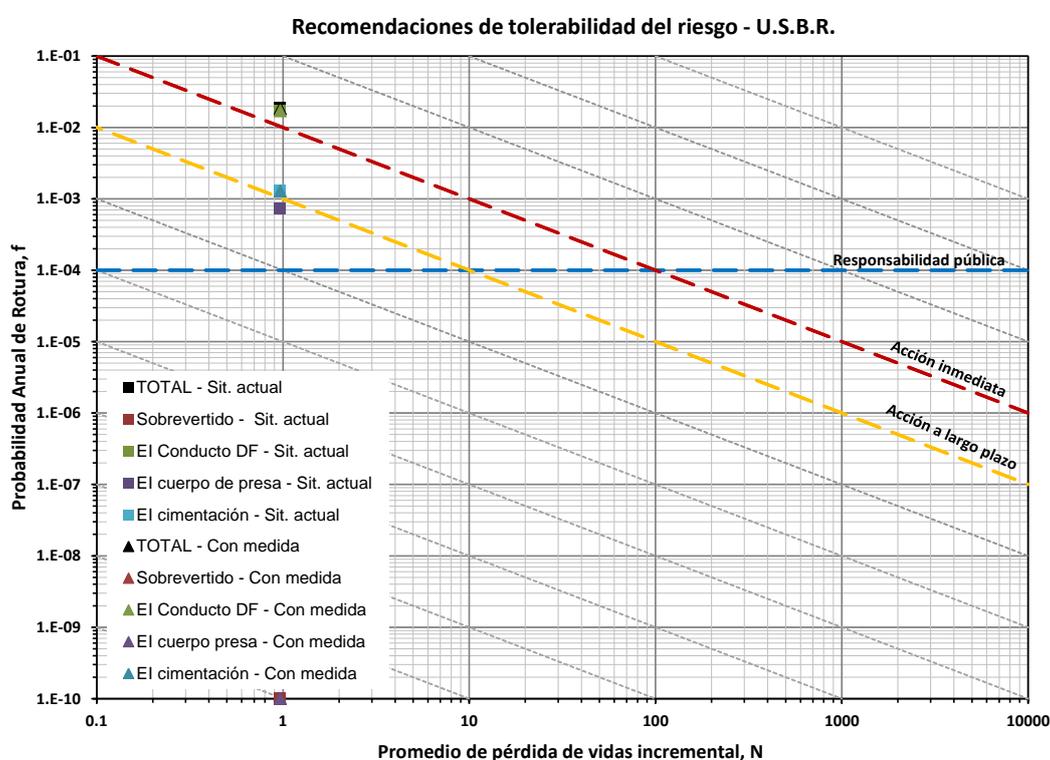


Figura 2.19: Efecto de la sustitución del desagüe de fondo sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida elimina el modo de fallo por erosión interna a través del cuerpo de presa, aunque no disminuye de forma considerable el riesgo en la presa porque este no es el modo de fallo por erosión interna dominante. La probabilidad de rotura en la presa pasa a ser un 96% de la probabilidad de la situación original.

A2.5.5 Alternativa 5: Instalación de un sistema de auscultación

Esta medida se encuentra planteada en el informe de actuaciones necesarias para continuar con la explotación de la presa D y pretende conocer mejor el estado actual

de la presa y realizar un mayor control de los procesos que se desarrollan en ella. La actuación propuesta consiste en:

- Itinerario de colimación en coronación y borde exterior de cada una de las bermas para determinar asientos y corrimientos (nº puntos de control no inferior a 25).
- Instalación de piezómetros para control de presiones intersticiales en presa y cimiento. Recomendamos al menos tres secciones de control, con cuatro niveles de piezómetros y un quinto nivel en el cimiento, inmediatamente por debajo de la presa, con un total de 40 piezómetros.
- Establecimiento de un control de filtraciones a pie de presa y aguas abajo de la caseta de válvulas.
- Instalación de un sistema de medición del nivel del embalse.

Esta medida afecta principalmente a los nodos de no detección y no intervención de los modos de fallo por erosión interna, ya que una mejora de la auscultación permite detectar estos procesos con una mayor probabilidad y así, realizar las medias necesarias para evitarlas. Las modificaciones realizadas en las probabilidades de los modos de fallo han sido:

- La probabilidad de no detección del modo de fallo por erosión interna en el cuerpo de presa pasa del 62% al 10%.
- La probabilidad de no detección del modo de fallo por erosión interna a través de la cimentación pasa del 64% al 20%.
- La probabilidad de no detección del modo de fallo por erosión interna a través del conducto del desagüe de fondo pasa del 63% al 20%.

El coste de implantación estimativo de esta medida se encuentra en el mencionado informe y es de 140,308 €.

En la Figura 2.20 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

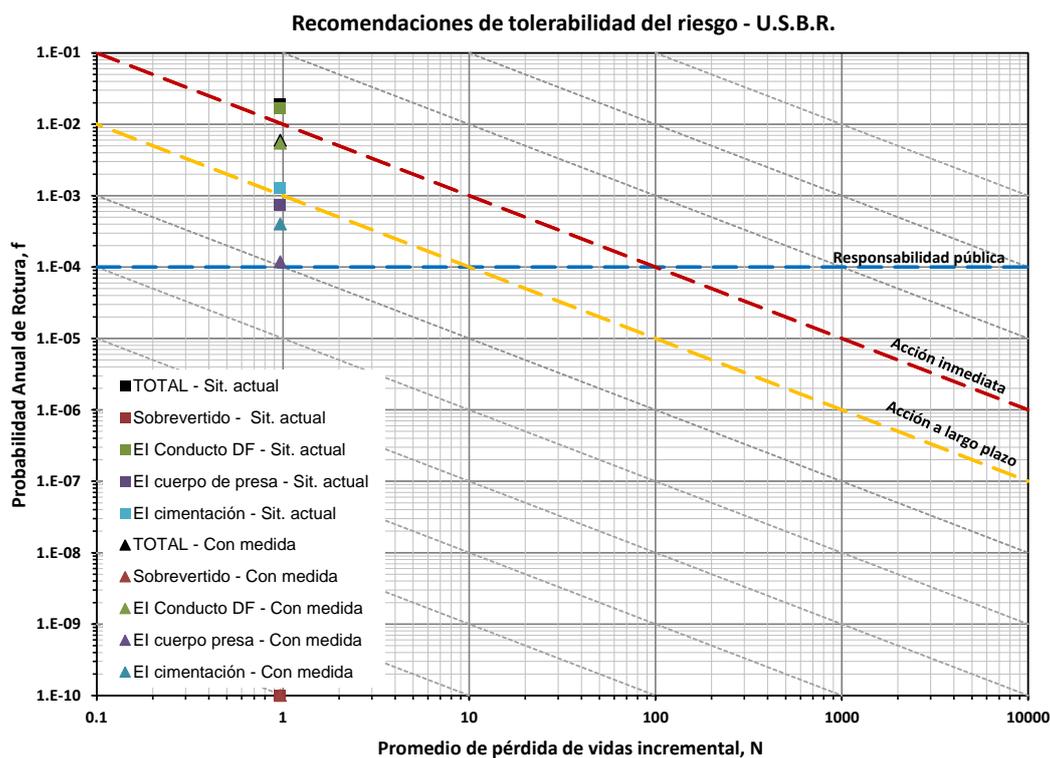


Figura 2.20: Efecto de la sustitución del desagüe de fondo sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida disminuye de forma considerable la probabilidad de todos los modos de fallo por erosión interna, especialmente de la erosión interna a través del cuerpo de presa. Por este motivo, la probabilidad de rotura y el riesgo de la presa disminuyen también considerablemente. La probabilidad de rotura en la presa pasa a ser un 31% de la probabilidad en la situación original.

A2.5.6 Alternativa 6: Construcción de una pantalla central impermeable y sustitución del desagüe de fondo

Esta medida consiste en la construcción de una pantalla impermeable en el centro de la presa para impedir el paso del flujo en su interior, de forma que se evite el desarrollo de procesos de erosión interna.

La pantalla central impermeable propuesta en esta medida ocupa toda la longitud de la presa, tiene un espesor de 40 cm aproximadamente y una profundidad total de 36 m, para evitar también el desarrollo de procesos de erosión interna a través del cimiento.

Además, esta medida también incluye el sellado del desagüe de fondo actual y la construcción de uno nuevo que no pase por bajo de la presa, ya que la pantalla planteada pasa sobre el conducto del actual desagüe de fondo.

Esta medida afecta a los nodos de inicio y progresión de los modos de fallo por erosión interna, ya que la construcción de esta pantalla evita el paso del flujo, disminuyendo de forma considerable la probabilidad de iniciación y desarrollo de un proceso de

erosión interna. Las modificaciones realizadas en las probabilidades de los modos de fallo han sido:

- Desaparece el modo de fallo por erosión interna a través del conducto del desagüe de fondo, ya que se sustituye el desagüe de fondo como se explica en la alternativa 3.
- La probabilidad de iniciación del modo de fallo por erosión interna a través del cuerpo de presa se reduce en un orden de magnitud, pasando del 12.4% al 1.2%.
- La probabilidad de iniciación del modo de fallo por erosión interna a través del cimiento se reduce en un orden de magnitud, pasando del 7.5% al 0.75%.
- La probabilidad de desarrollo del modo de fallo por erosión interna a través del cuerpo de presa se reduce en un orden de magnitud, pasando del 58.3% al 5.8%.
- La probabilidad de desarrollo del modo de fallo por erosión interna a través del cimiento se reduce en un orden de magnitud, pasando del 48.4% al 4.8%.

El coste de implantación ha sido estimado realizando un presupuesto estimativo de la obra necesaria para la construcción de esta pantalla y la sustitución del desagüe de fondo. El coste obtenido es de 7,500,000 €.

En la Figura 2.21 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

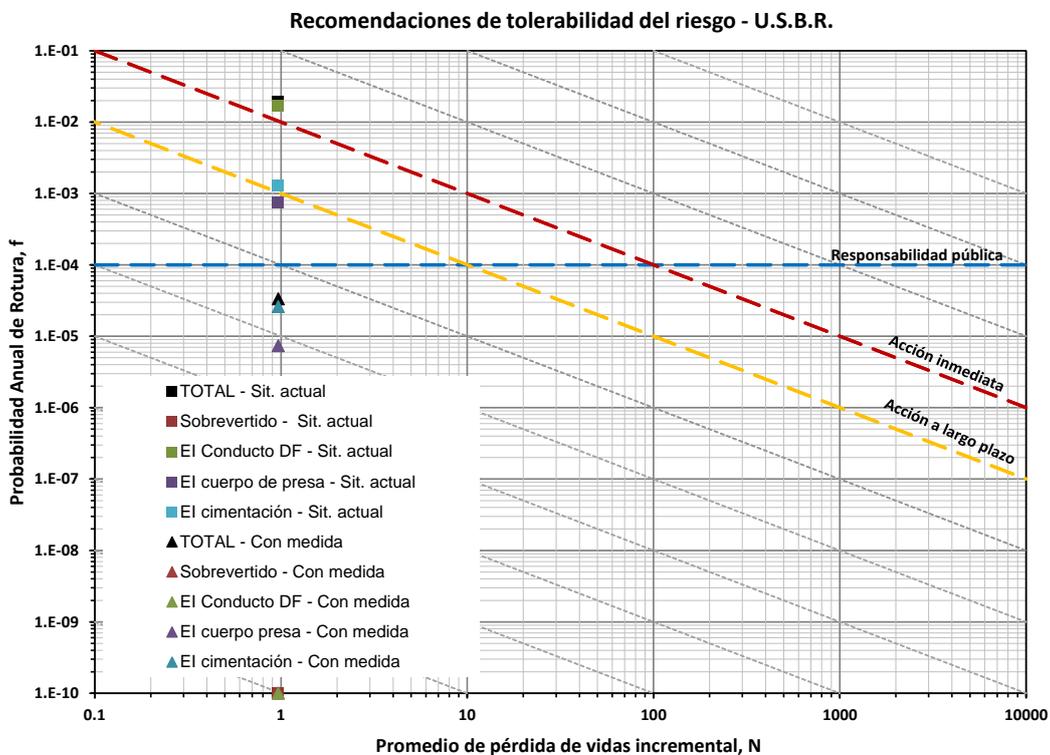


Figura 2.21: Efecto de la sustitución del desagüe de fondo sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida disminuye de forma considerable la probabilidad de todos los modos de fallo por erosión interna, especialmente de la erosión interna a través del desagüe de fondo. Por este motivo, la probabilidad de rotura y el riesgo de la presa disminuyen también considerablemente. La probabilidad de rotura en la presa pasa a ser un 0.2% de la probabilidad en la situación original.

A2.5.7 Alternativa 7: Puesta fuera de servicio de la presa

Esta medida se encuentra planteada en el informe de puesta de fuera de servicio de la presa D para eliminar el embalsamiento de aguas y eliminar de esta forma el riesgo asociado a la presa. La actuación propuesta consiste en:

Fase 1: Trabajos previos

Fase 2: Vaciado progresivo del embalse

Fase 3: Desmantelamiento del cuerpo de presa

Fase 4: Demolición del aliviadero y del desagüe de fondo

Fase 5: Medidas preventivas y correctivas

Fase 6: Puesta fuera de servicio

Si esta medida es implantada, desaparece la presa D como tal y por lo tanto su probabilidad de fallo y su riesgo, que pasarían a ser nulos.

El coste de implantación estimativo de esta medida se encuentra en el mencionado informe y es de 313,950 €.

A2.5.8 Resumen

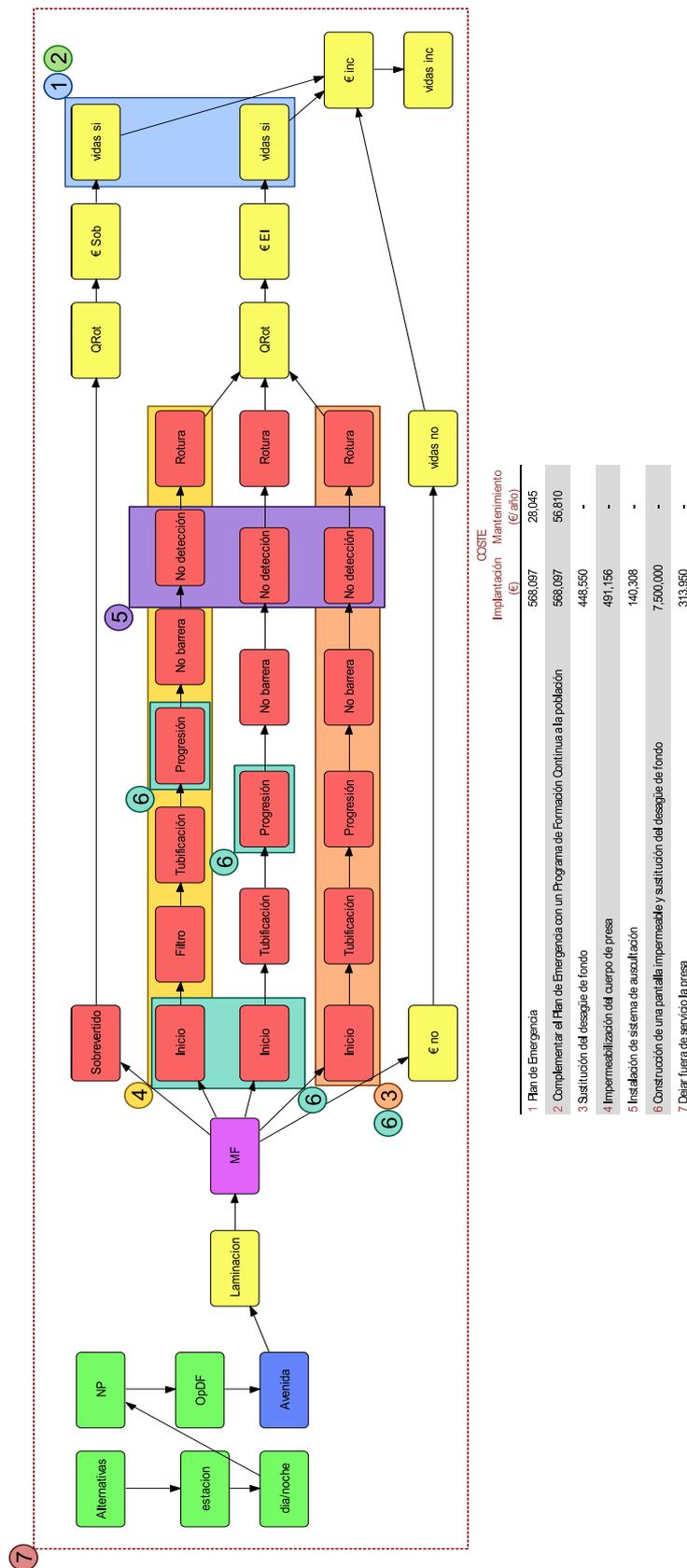


Figura 2.22: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medidas de reducción de riesgo planteadas en la presa D.

A2.6 Medidas en la presa E

A2.6.1 Alternativa 1: Renovación del cuenco amortiguador

Esta medida se ha planteado a partir de las recomendaciones incluidas en la Primera Revisión y Análisis General de la Seguridad del azud, así como en el Informe de Identificación de Modos de Fallo. En dichos documentos se pone de relieve que el estado actual del hormigón es deficiente, con abrasiones, desconchones, agrietamientos y vegetación.

El objetivo es mejorar el monolitismo del azud y asegurar la resistencia del hormigón frente a la erosión. La actuación propuesta consiste en realizar una renovación del cuenco amortiguador, de la losa del desagüe de fondo y del hormigón superficial, con el objetivo de reducir la probabilidad de progreso de la erosión. Asimismo, se reforzaría el monolitismo del azud.

Esta alternativa afecta tanto al modo de fallo 1, rotura por sobrevertido, como al 3, erosión del cuenco durante una avenida. El efecto estimado sobre los nodos que componen el modo de fallo es:

- **Nodo sobrevertido.** Se considera que la intervención refuerza el cuerpo del azud, aumentando su monolitismo, su resistencia a la erosión y mejorando su contacto con el terreno. Por tanto, se sustituye la curva de probabilidad de rotura por sobrevertido que se había empleado en el caso base, correspondiente a una presa arco, por la correspondiente a una presa tipo azud. Estas curvas se representan en la Figura 2.23.
- **Nodo erosión superficial del cuenco.** Se considera que la probabilidad de erosión superficial del cuenco frente a una avenida, que se estimó por juicio de experto, se reduce a 1/10 por efecto de la renovación del hormigón.
- **Nodo erosión profunda del cuenco.** Se considera que la probabilidad de erosión profunda del cuenco frente a una avenida, que se estimó por juicio de experto, se reduce a 1/5 por efecto de la renovación del hormigón.

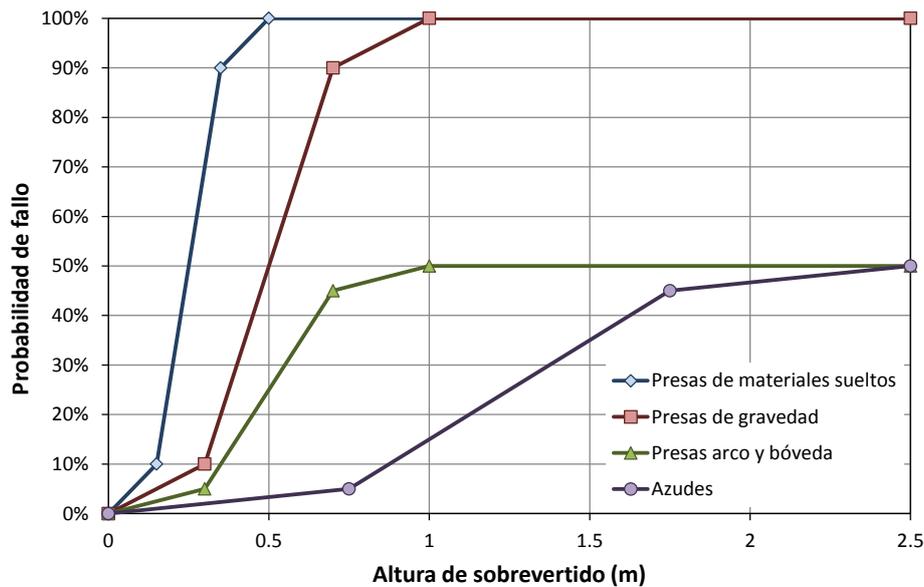


Figura 2.23: Curvas de probabilidad de rotura por sobrevertido frente a la cota de agua (en msnm) para el azud E, en el caso base y tras realizar una renovación del cuenco amortiguador.

El coste de implantación de esta medida ha sido estimado mediante un presupuesto estimativo de las obras a realizar y de los equipos necesarios. El coste obtenido es de 640.000 €.

En la Figura 2.24 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

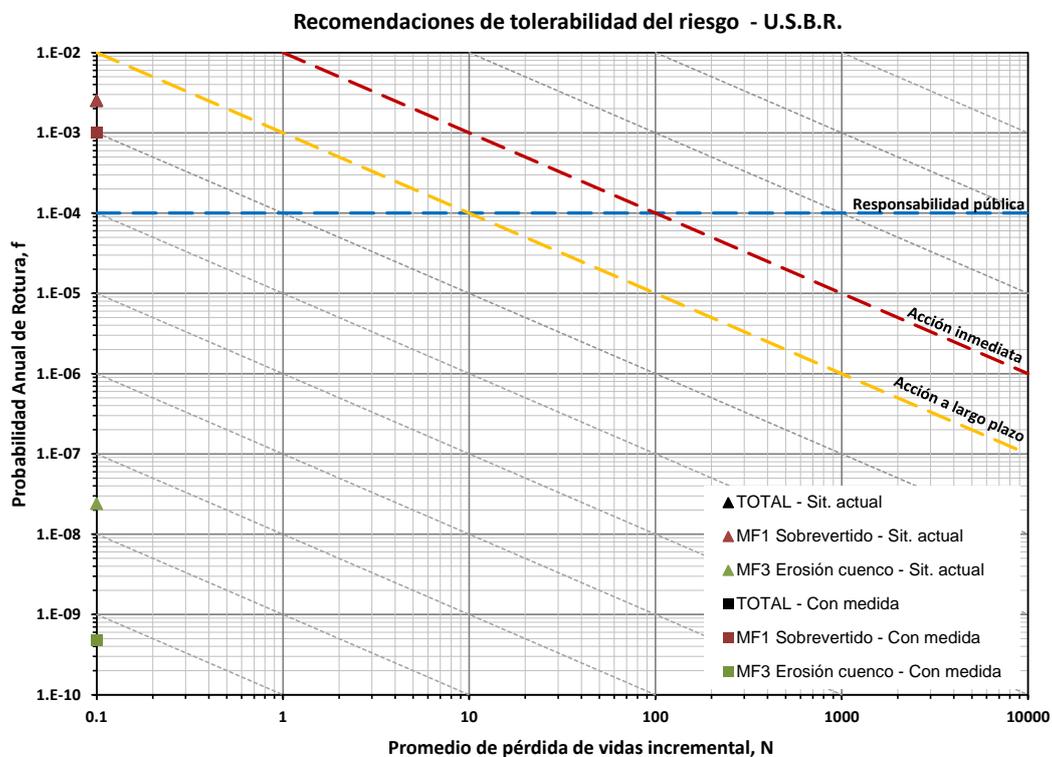


Figura 2.24: Efecto de la instalación de un sistema de auscultación sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida tiene un efecto importante sobre los dos modos de fallo, ya que ayuda a resistir a la estructura frente al sobrevvertido y evita que se erosione el cuenco. Este hecho produce que la probabilidad de fallo de la presa disminuya significativamente.

A2.6.2 Alternativa 2: Renovación de las compuertas del aliviadero y renovación de sus mecanismos

Esa medida se ha planteado a partir de las recomendaciones incluidas en el Informe de Identificación de Modos de Fallo. En dicho documento se ponen de relieve las siguientes características de las compuertas del aliviadero:

- Las compuertas presentan aspecto envejecido, con algunas fugas en los laterales.
- Los mecanismos de operación de las compuertas se encuentran a la intemperie.
- La compuerta en la margen izquierda no se ha empleado desde el año 2000, para proteger la escala de peces.

Por tanto, se plantea una puesta a punto de las compuertas del aliviadero, incluyendo la renovación de sus accionamientos, la corrección de fugas y la habilitación de la compuerta en la margen izquierda.

El coste de implantación de esta medida ha sido estimado mediante un presupuesto estimativo de las obras a realizar y de los equipos necesarios. El coste obtenido es de 770.000 €.

Esta alternativa afecta principalmente al modo de fallo 1, vertido por coronación. El efecto estimado sobre los nodos que componen el modelo es:

- Nodo de operatividad de compuertas del aliviadero. La puesta a punto y la renovación de los accionamientos mejoran la fiabilidad de las compuertas, de forma que reduce la probabilidad de que se mantengan inoperativas durante una avenida. Por tanto, se asigna un 95% de fiabilidad a cada una de las tres compuertas del aliviadero.

En la Figura 2.25 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

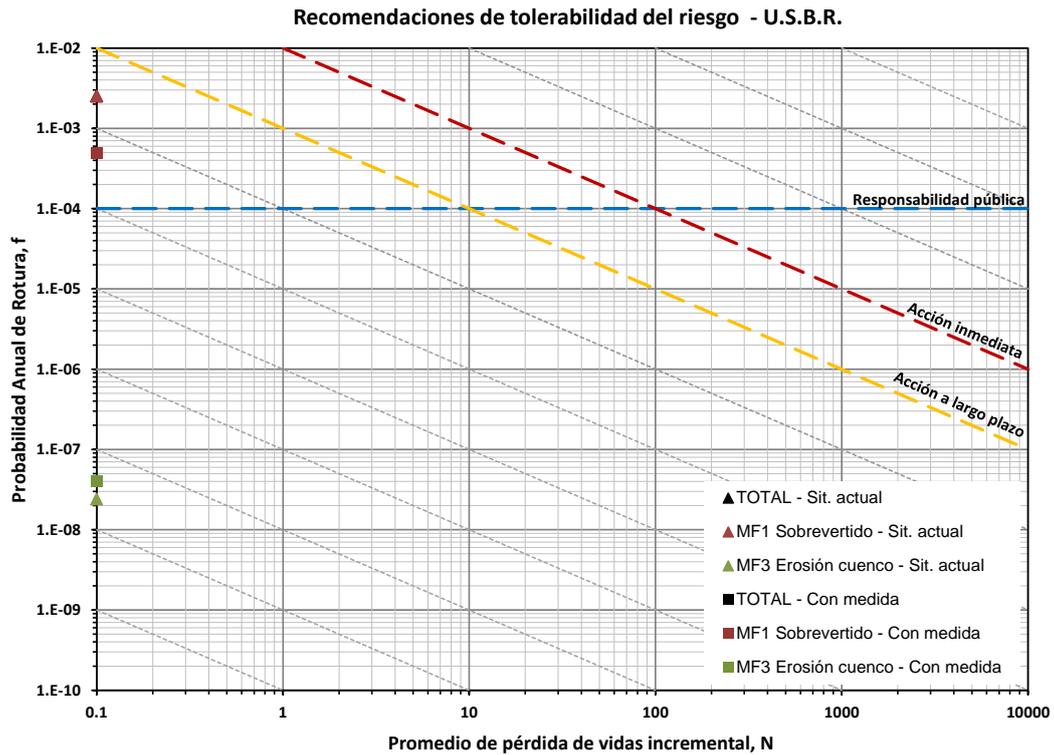


Figura 2.25: Efecto de la instalación de un sistema de auscultación sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida reduce de forma importante la probabilidad de fallo por sobrevvertido, ya que la mejora de los órganos de desagüe reduce la probabilidad de alcanzar niveles de agua elevados en el embalse. En cambio, esta medida aumenta la probabilidad de erosión del cuenco, al aumentar los caudales laminados. En el total de la presa, la probabilidad de fallo se reduce significativamente al ser el sobrevvertido el modo de fallo predominante.

A2.6.3 Resumen

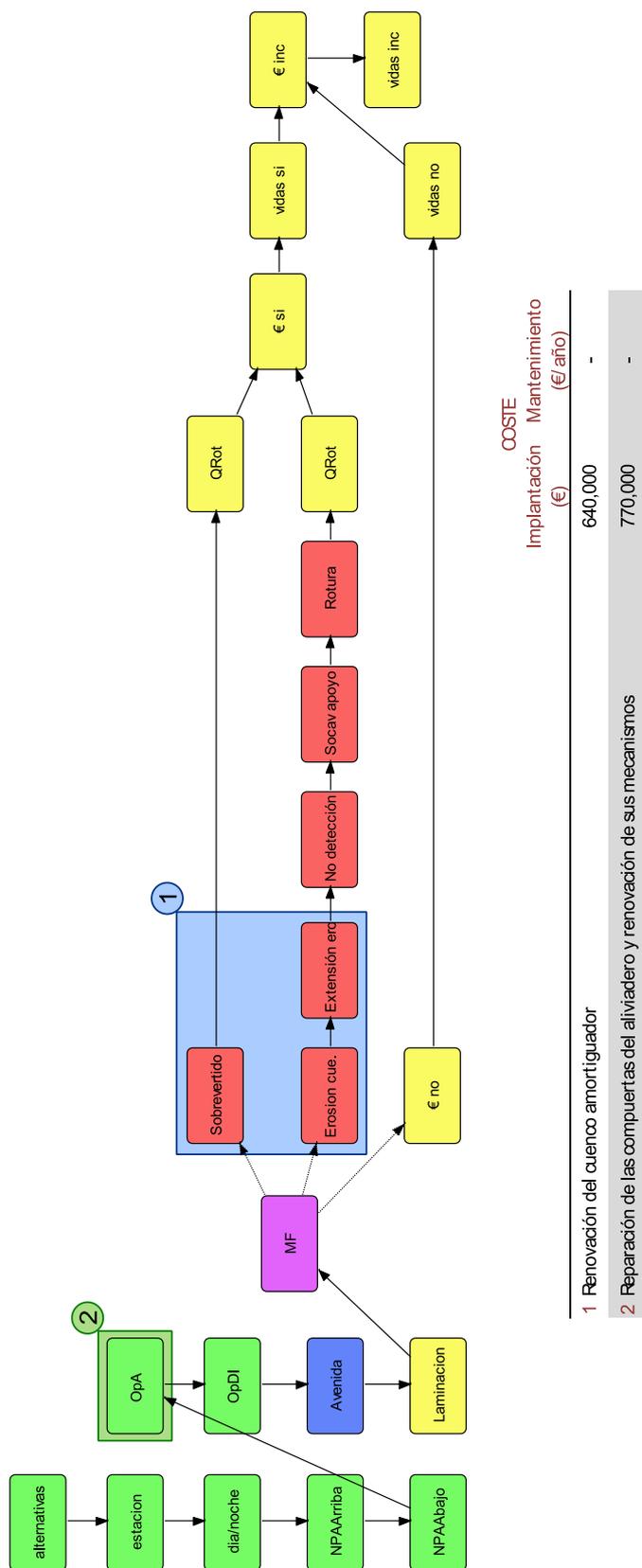


Figura 2.26: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medidas de reducción de riesgo planteadas en la presa E.

A2.7 Medidas en la presa F

A2.7.1 Alternativa 1: Implantación del Plan de Emergencia

Esta mejora consiste en la implantación del Plan de Emergencia de la presa F, que conlleva la mejora de los procedimientos de actuación ante emergencias y una mejor comunicación del peligro a la población a través de sistemas de aviso.

En este caso, esta medida afecta a la pérdida de vidas en los casos de rotura y de no rotura de la presa.

Para incluir el efecto de esta medida dentro del modelo de riesgo, se ha calculado de nuevo la pérdida de vidas utilizando unas menores tasas de mortalidad y un mayor tiempo de aviso.

El coste aproximado de la implantación de esta alternativa es de 359,594 €. Además, el coste anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en un 5% del valor de implantación, resultando en 17,979 €.

En la Figura 2.27 se muestra el efecto de esta medida sobre el riesgo de la presa.

A2.7.2 Alternativa 2: Mejora de los equipos electrohidráulicos

Esta alternativa consiste en la mejora y puesta a punto de los equipos electrohidráulicos de todos los órganos de desagüe de la presa, para mejorar su fiabilidad para la laminación de venidas.

La rehabilitación y mejora de equipos hidromecánicos afecta a la probabilidad de que durante una avenida, se puedan operar los órganos de desagüe. Si esta probabilidad aumenta, la probabilidad de que se alcancen niveles altos en el embalse disminuye. Es por lo tanto una medida que afecta a las cargas del modelo. Los nodos que es necesario modificar son los de la operatividad de los órganos de desagüe. El resultado de esta medida es una reducción de la probabilidad de rotura y por lo tanto también del riesgo.

Según el proyecto de aplicación de esta medida, su coste de implantación es de 3,632,890 €.

A2.7.3 Alternativa 3: Pantallas de impermeabilización y rehabilitación de los sistemas de drenaje

Esta medida se implementa para aumentar la impermeabilización del cimiento y mejorar el sistema de drenaje para conseguir disminuir las subpresiones bajo el cimiento, y de esta forma reducir la probabilidad de deslizamiento de la presa. Esta medida es una de las actuaciones previstas para mejorar la seguridad de esta presa.

Según el proyecto realizado para la implantación de esta medida, el coste de implantación de esta medida es de 823,650 €.

En la Figura 2.27 se muestra el efecto de esta medida sobre el riesgo de la presa.

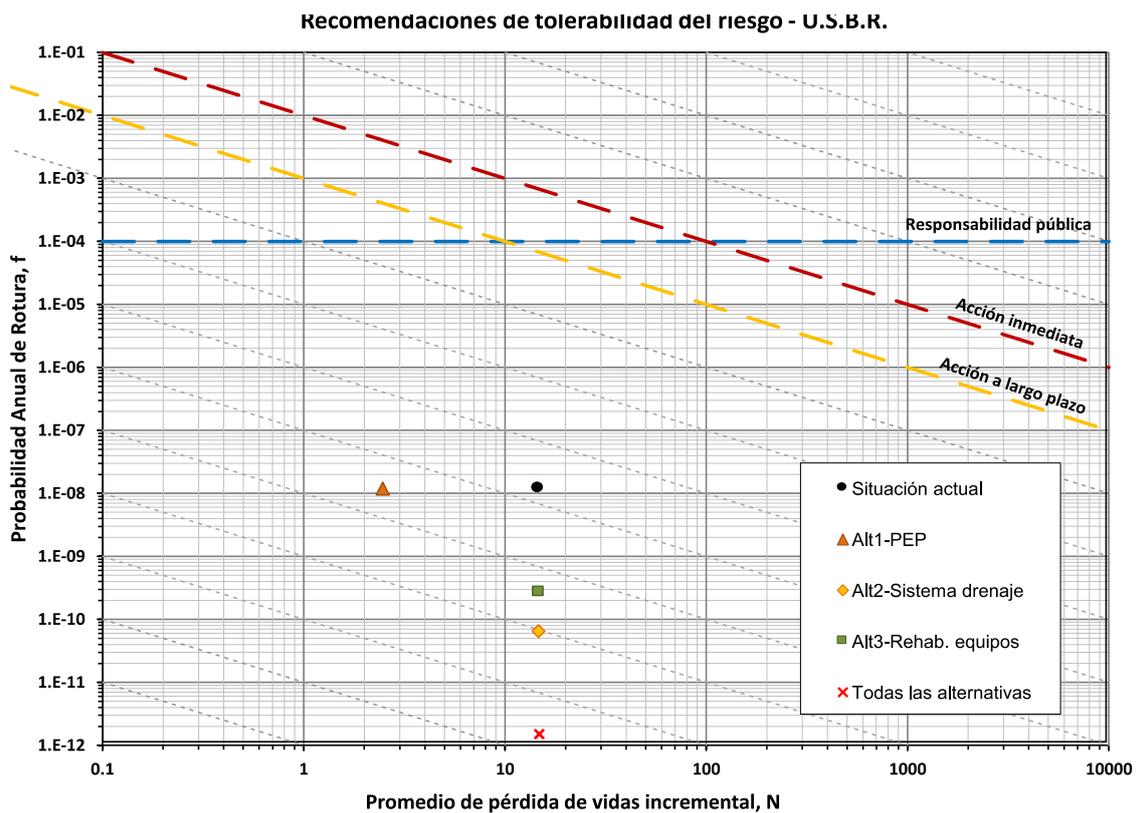


Figura 2.27: Efecto de las medidas en la presa F sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

A2.8 Medidas en la presa G

A2.8.1 Alternativa 1: Implantación del Plan de Emergencia

Esta mejora consiste en la implantación del Plan de Emergencia de la presa G, que conlleva la mejora de los procedimientos de actuación ante emergencias y una mejor comunicación del peligro a la población a través de sistemas de aviso.

En este caso, esta medida afecta a la pérdida de vidas en los casos de rotura y de no rotura de la presa.

Para incluir el efecto de esta medida dentro del modelo de riesgo, se ha calculado de nuevo la pérdida de vidas utilizando el método de Graham. Para ello se han empleado las tasas de mortalidad empleadas en el proyecto europeo SUFRI [10]. Las tasas de este método se han adaptado para poder estudiar diferentes grados de entendimiento de la severidad de la inundación en función de los sistemas de aviso, la existencia o no de un Plan de Emergencia y la coordinación entre los servicios de emergencia y la formación de la población.

El coste de implantación de esta medida es de 530,962 €, según el Proyecto de Implantación del Plan de Emergencia. Además, el coste anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en un 5% del valor de implantación, resultando en 26,458 €.

En la Figura 2.28 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

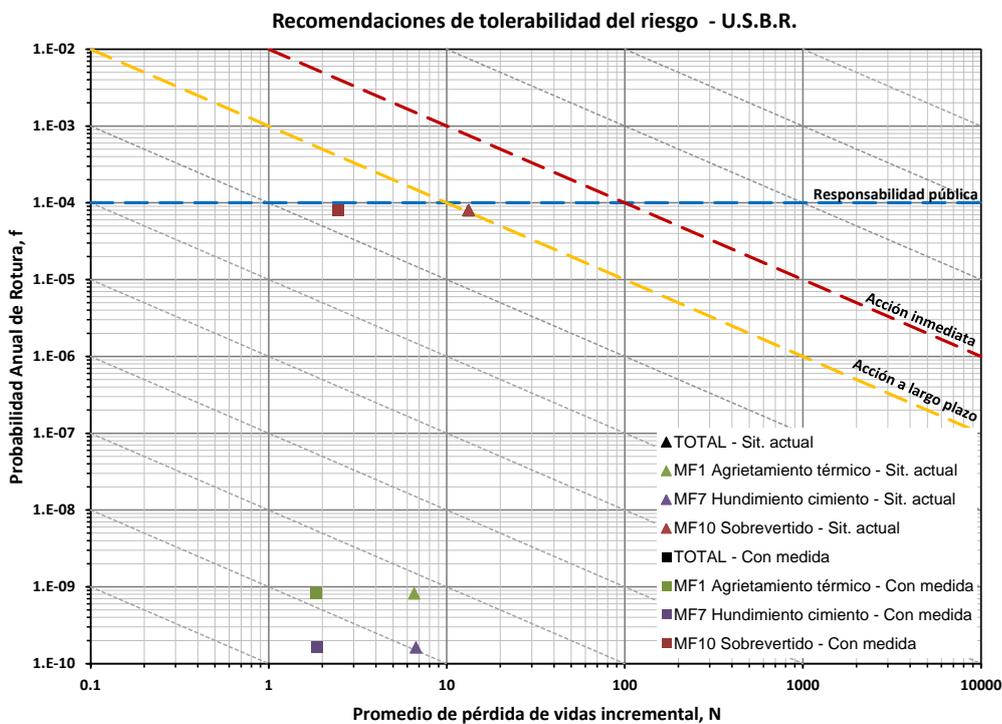


Figura 2.28: Efecto de la implementación del Plan de Emergencia sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, el Plan de Emergencia no modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia reduce el riesgo en vidas al 19% del riesgo original.

A2.8.2 Alternativa 2: Complementar el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua a la población

Esta alternativa consiste en complementar la implantación del Plan de Emergencia de la Presa G con un Programa de Formación Continua a la población aguas abajo de la presa, con el fin de que ésta conozca perfectamente los procedimientos a seguir y los lugares de refugio a los que deben acudir en el caso de rotura de la presa. Para ello, es necesario un programa de formación continua a la población, incluyendo simulacros, y un funcionamiento eficaz de los medios de comunicación a la población en estos casos y de los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad, con el fin de reducir la pérdida de vidas lo máximo posible.

Como la alternativa anterior, esta alternativa afecta únicamente a la pérdida de vidas. Por ello, los cálculos realizados de pérdida de vidas utilizando el método de Graham se han vuelto a realizar con nuevas tasas de mortalidad que incluyen esta mayor formación de la población.

El coste de implantación de esta alternativa es el mismo que en la alternativa 1. El coste aproximado anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto como el doble del coste de mantenimiento del Plan de Emergencia de la alternativa 1, ya que es necesario un mayor número de recursos y de personal para formar correctamente a la población. Por lo tanto, el coste anual de esta medida es de 53,096 €.

En la Figura 2.29 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

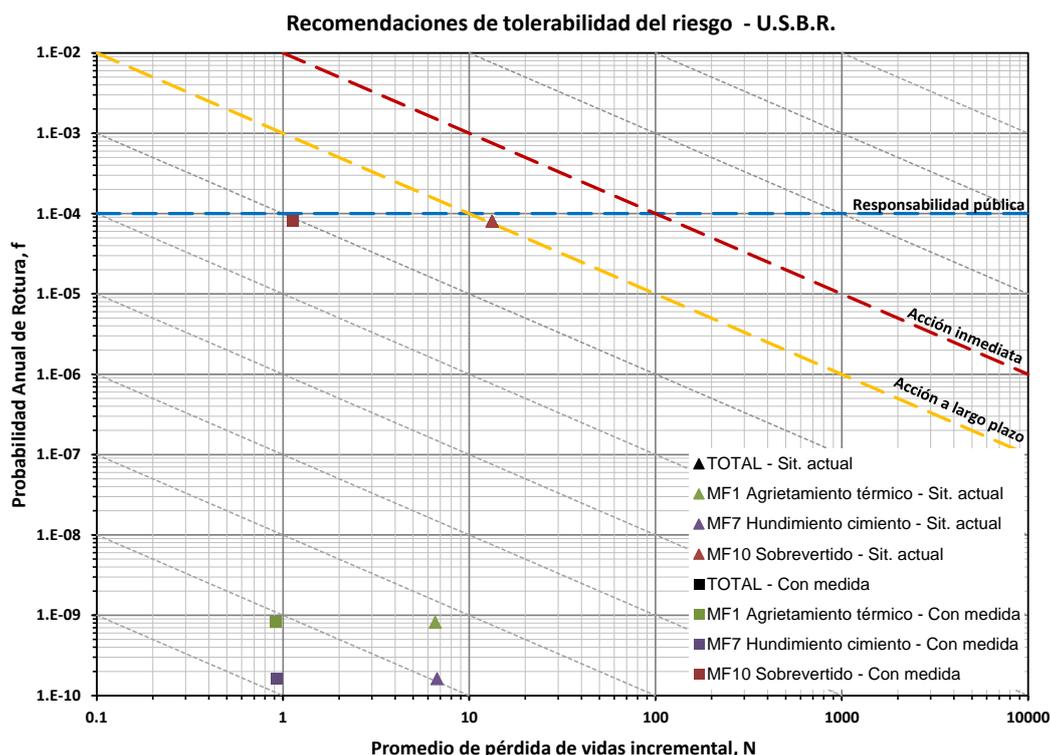


Figura 2.29: Efecto de la implementación del PEP con un Programa de Formación Continua sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, esta medida tampoco modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua reduce el riesgo en vidas al 9% del riesgo original.

A2.8.3 Alternativa 3: Inyección de fisuras en el cuerpo de presa

Esa medida se ha planteado a partir de las inyecciones previstas en el Proyecto de Adecuación al Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses. Aunque las fisuras que se proponen inyectar con esta medida no son las propuestas en este proyecto, sino la familia de fisuras existente producida por efectos térmicos. De esta forma se consigue disminuir la probabilidad de que se desarrolle el modo de fallo por agrietamiento térmico.

Por lo tanto, esta medida consiste en la realización de inyecciones en el cuerpo de presa con resinas tipo epoxi desde las galerías para llegar a la familia de fisuras existentes producida por efectos térmicos y que se desarrolla paralelamente a la galería perimetral entre los bloques 7 y 15 de la presa.

Esta alternativa afecta al modo de fallo por agrietamiento térmico en el cuerpo de presa y formación de inestabilidad. El efecto estimado sobre los nodos que componen el modo de fallo es:

- **Nodo formación de fisuras:** La realización de inyecciones disminuye considerablemente la probabilidad de que se produzcan y aumenten las fisuras por agrietamiento térmico del cuerpo de presa. Cómo esta medida afecta directamente al proceso principal de este nodo, la probabilidad se ha disminuido un orden de magnitud, pasando de 2.7% a 0.27%.
- **Nodo agrietamiento del cuerpo de presa:** La realización de inyecciones disminuye considerablemente la probabilidad de que se agriete el cuerpo de presa a partir de la fisuración térmica. Cómo esta medida afecta directamente al proceso principal de este nodo, la probabilidad se ha disminuido un orden de magnitud, pasando de 0.79% a 0.079%.

El coste de implantación de esta medida ha sido estimado mediante un presupuesto estimativo de las obras a realizar y de los equipos necesarios. El coste obtenido es de 110,000 €. En la Figura 2.30 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

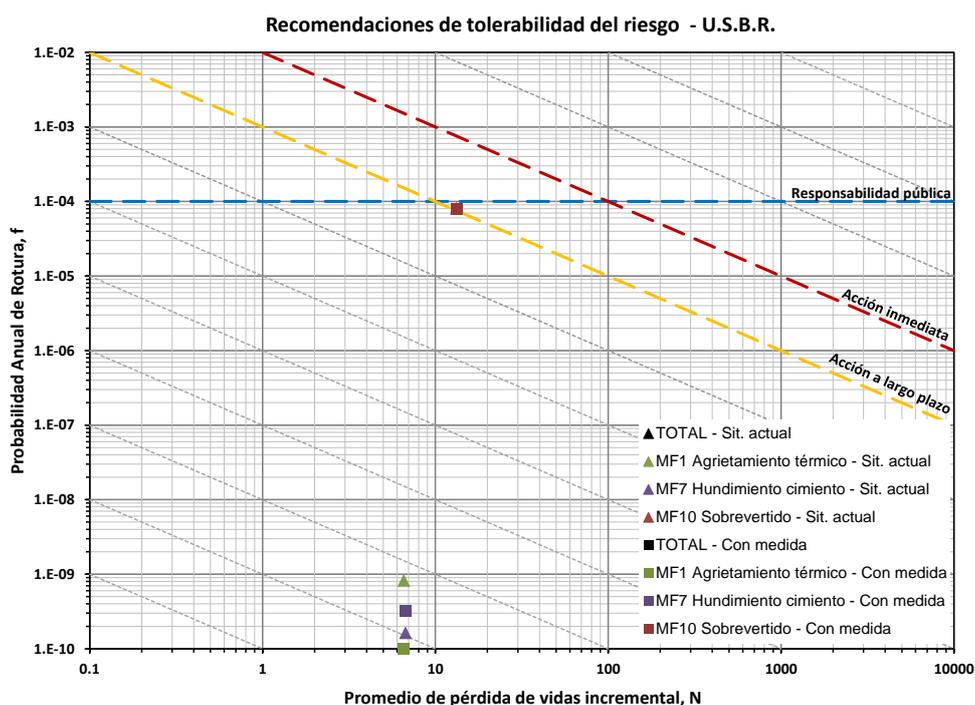


Figura 2.30: Efecto de la inyección de fisuras en el cuerpo de presa sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida tiene un efecto importante sobre el modo de fallo al que afecta, fallo por agrietamiento térmico, disminuyendo su probabilidad de fallo en dos órdenes de magnitud. Aunque cómo la probabilidad de este modo de fallo respecto al sobrevvertido es muy baja, el efecto de esta medida sobre el riesgo total de la presa es muy bajo también.

A2.8.4 Resumen

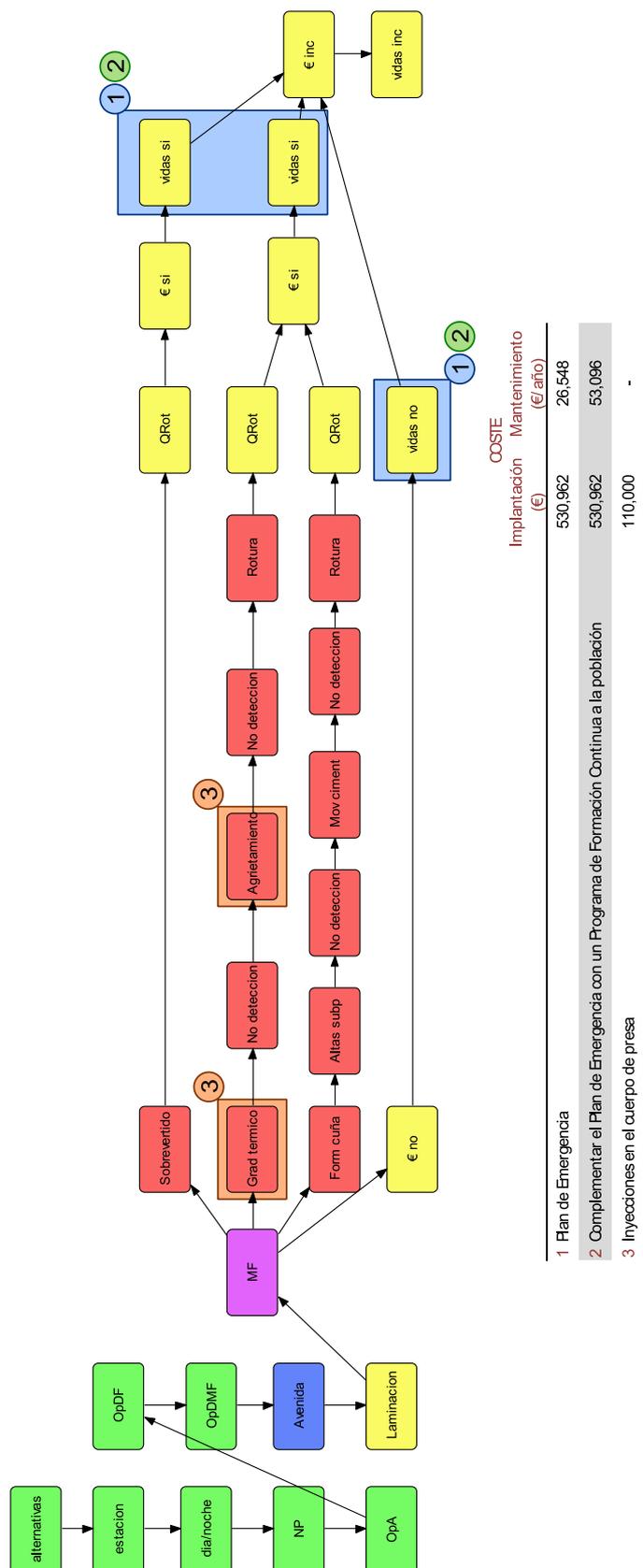


Figura 2.31: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medidas de reducción de riesgo planteadas en la presa G.

A2.9 Medidas en la presa H

A2.9.1 Alternativa 1: Complementar el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua a la población

Esta alternativa consiste en complementar el Plan de Emergencia de la Presa H ya implantado con un Programa de Formación Continua a la población aguas abajo de la presa, con el fin de que ésta conozca perfectamente los procedimientos a seguir y los lugares de refugio a los que deben acudir en el caso de rotura de la presa. Para ello, es necesario un programa de formación continua a la población, incluyendo simulacros, y un funcionamiento eficaz de los medios de comunicación a la población en estos casos y de los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad, con el fin de reducir la pérdida de vidas lo máximo posible.

Como la alternativa anterior, esta alternativa afecta únicamente a la pérdida de vidas. Por ello, los cálculos realizados de pérdida de vidas utilizando el método de Graham se han vuelto a realizar con nuevas tasas de mortalidad que incluyen esta mayor formación de la población.

En el caso de desarrollar un Programa de Formación Continua a la población, se ha supuesto que el coste anual de funcionamiento del Plan de Emergencia pasa a ser del 10% del coste de implantación. Por lo tanto, la implantación de esta alternativa supone un incremento en el coste anual de mantenimiento del Plan de Emergencia del 5% del coste de implantación respecto al caso base. Este coste equivale a 30,043.97 €.

En la Figura 2.32 se muestra el efecto de esta medida sobre el riesgo de la presa.

A2.9.2 Alternativa 2: Encepado con micropilotes

Esta alternativa ha sido definida a raíz de la descripción del Proyecto Modificado de la presa H, que explica se han previsto unas actuaciones de tratamiento del terreno en los 6 bloques centrales, consistentes en la ejecución de un encepado de dimensiones 5 x 5 x 73 m, con 115 micropilotes por bloque (con camisa de chapa de 10 mm de espesor y 273 mm de diámetro, de una longitud media de 30 m). La función de los micropilotes es “coser” posibles planos de deslizamiento más profundos y, colaborando con los encepados, aumentar la seguridad al deslizamiento de la presa en las secciones máximas.

En esta alternativa se estudia cómo afecta al riesgo de la presa la construcción de este encepado con micropilotes en los bloques centrales. El principal efecto de estas estructuras es un aumento de la resistencia a deslizamiento de la presa en la zona central, gracias a la resistencia a cortante de los micropilotes que cose los posibles planos a deslizamiento. Por lo tanto, introduce una fuerza estabilizadora en los modelos numéricos de deslizamiento del modo de fallo 3. Para estimar esta fuerza se ha seguido la fórmula propuesta por la “Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera” para el cálculo de la resistencia a cortante.

El presupuesto de construcción de los micropilotes aparece en el Proyecto Modificado del embalse. Esta obra tiene un valor de 20,997,460.16 € con un IVA del 18%.

En la Figura 2.32 se muestra el efecto de esta medida sobre el riesgo de la presa.

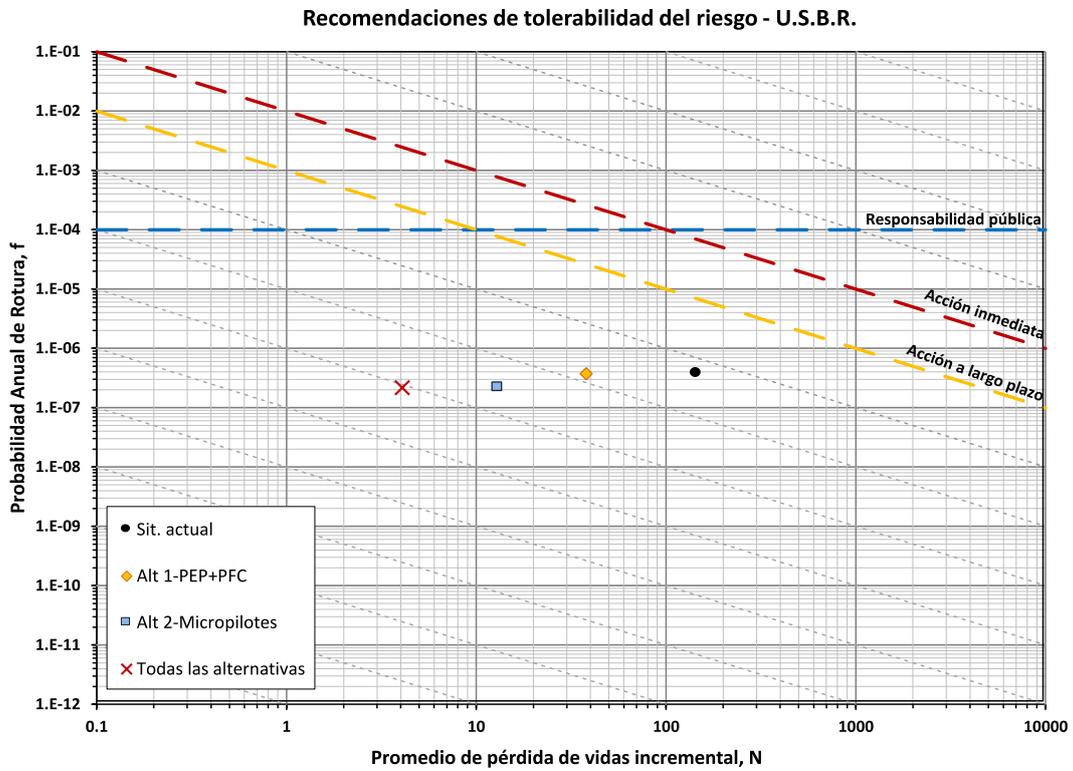


Figura 2.32: Efecto de las medidas en la presa H sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

A2.9.3 Resumen

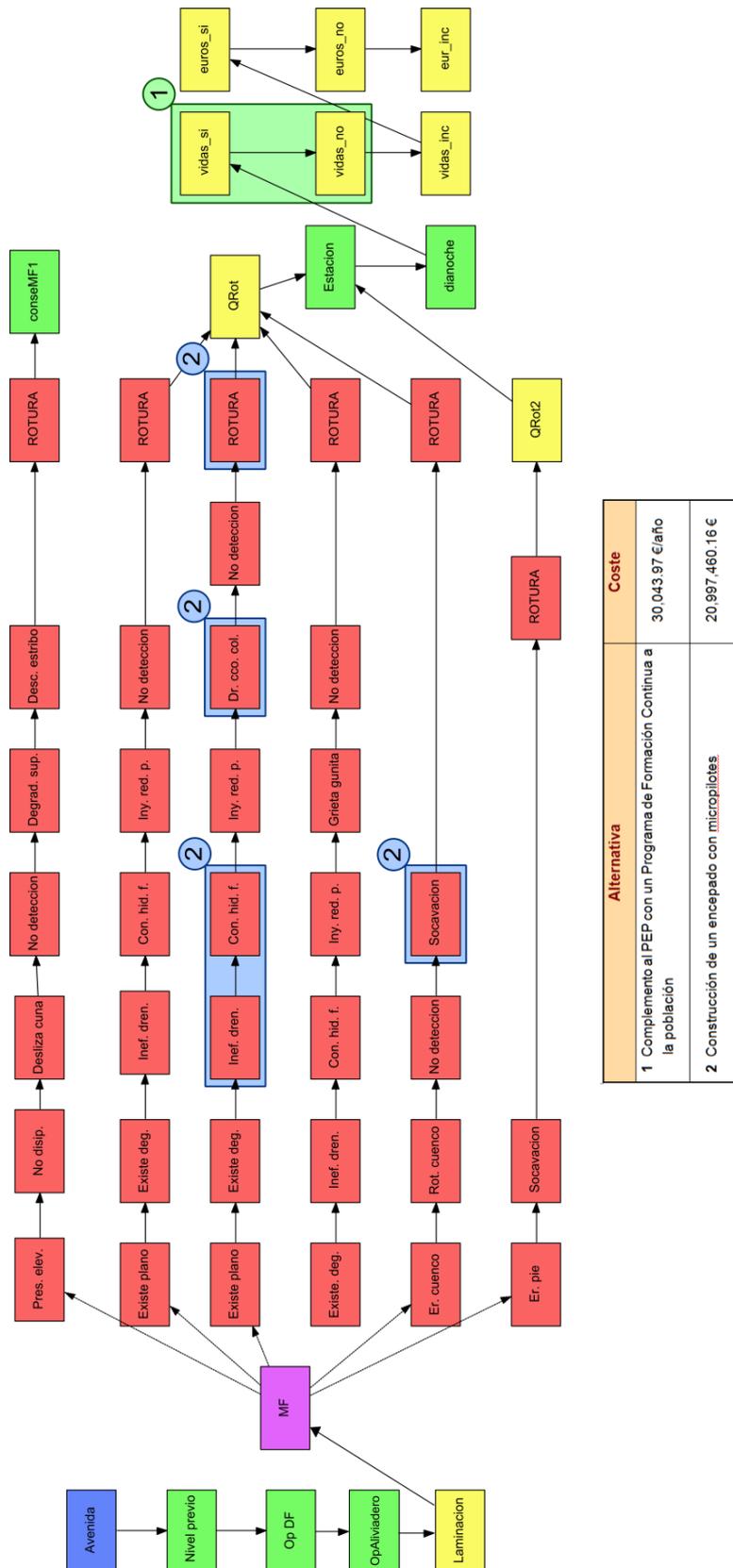


Figura 2.33: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medidas de reducción de riesgo planteadas en la presa H.

A2.10 Medidas en la presa I

A2.10.1 Alternativa 1: Implantación del plan de emergencia

Esta mejora consiste en la implantación del Plan de Emergencia de la presa I, que conlleva la mejora de los procedimientos de actuación ante emergencias y una mejor comunicación del peligro a la población a través de sistemas de aviso. Estas medidas permiten la reducción de la pérdida de vidas humanas provocada por la rotura de la presa, por lo que afectan a los nodos de pérdida de vidas del modelo.

Las tasas de este método se han adaptado para poder estudiar diferentes grados de entendimiento de la severidad de la inundación en función de los sistemas de aviso, la existencia o no de un Plan de Emergencia y la coordinación entre los servicios de emergencia y la formación de la población.

El coste aproximado de la implantación de esta alternativa es de 482,172 € con un IVA del 18%. Además, el coste anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en un 5% del valor de implantación, resultando en 24,109 €.

En la Figura 2.34 se muestra el efecto de esta medida sobre el riesgo de la presa.

A2.10.2 Alternativa 2: Complementar el plan de emergencia con un programa de formación continua a la población

Esta alternativa consiste en complementar la implantación del Plan de Emergencia de la Presa I con un programa de formación continua a la población aguas abajo de la presa, con el fin de que ésta conozca perfectamente los procedimientos a seguir y los lugares de refugio a los que deben acudir en el caso de rotura de la presa. Para ello, es necesario un programa de formación continua a la población, incluyendo simulacros, y un funcionamiento eficaz de los medios de comunicación a la población en estos casos y de los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad, con el fin de reducir la pérdida de vidas lo máximo posible.

Como la alternativa anterior, esta alternativa afecta únicamente a la pérdida de vidas. Por ello, los cálculos realizados de pérdida de vidas utilizando el método de Graham se han vuelto a realizar con nuevas tasas de mortalidad que incluyen esta mayor formación de la población.

El coste de implantación de esta alternativa es el mismo que en la alternativa 1. El coste aproximado anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto como el doble del coste de mantenimiento del Plan de Emergencia de la alternativa 1, ya que es necesario un mayor número de recursos y de personal para formar correctamente a la población. Por lo tanto, el coste anual de esta medida es de 48,217 €.

En la Figura 2.34 se muestra el efecto de esta medida sobre el riesgo de la presa.

A2.10.3 Alternativa 3: Implantación de resguardos según la Primera Revisión de Seguridad

Esta alternativa consiste en una disminución del Nivel Máximo Normal (NMN) en la presa según las recomendaciones de la Primera Revisión de Seguridad de la presa I para tener un resguardo suficiente en el embalse que permita la laminación de las avenidas. En este documento se propuso como NMN para la explotación el máximo nivel que satisface las condiciones marcadas por el Reglamento de 1996 y la Guía Técnica nº4:

- Partiendo del Nivel Máximo Normal, la presa es capaz de evacuar una Avenida de Proyecto de periodo de retorno 1.000 años funcionando correctamente los órganos de desagüe.
- Partiendo del Nivel Máximo Normal, la presa es capaz de evacuar una Avenida Extrema de periodo de retorno 5.000 años sin provocar un vertido por coronación.
- El Resguardo Normal, relativo al (NMN), además de ser suficiente para el desagüe de avenidas, es igual o superior a las sobre elevaciones producidas por los oleajes máximos.

La disminución del NMN produce en primer lugar, una modificación en las curvas de probabilidad de excedencia de niveles previos. Estas curvas se han truncado en el nuevo NMN, ya que si la presa se opera según este resguardo, no debe haber un nivel previo superior a él.

Además, como en la alternativa anterior, esta modificación también afecta a la laminación de la presa, ya que se los niveles máximos alcanzados en el embalse sean inferiores.

Para estimar las consecuencias económicas por disminución de las garantías de las demandas de agua satisfechas por el embalse que puede tener esta alternativa se ha utilizado, un modelo de simulación del sistema de recursos hídricos con el software AQUATOOL [28]. El resultado de este análisis es que estos resguardos no afectan a las demandas y por lo tanto, no tienen un coste económico.

En la Figura 2.32 se muestra el efecto de esta medida sobre el riesgo de la presa.

A2.10.4 Alternativa 4: Refuerzo del pretil de coronación de la presa

Esta alternativa consiste en reforzar y realizar un mantenimiento del pretil situado en la coronación de la Presa I con el fin de que tenga suficiente fuerza para resistir el empuje del agua y por lo tanto, no permita que se produzca sobrevertido hasta que el agua pase por encima de él.

Al aplicar esta alternativa se considera que se produce sobrevertido únicamente cuando el agua sobrepasa el nivel del pretil, calculando la probabilidad de rotura por sobrevertido a partir de este nivel.

El coste de reparación del pretil se ha estimado realizando un presupuesto estimativo con las diferentes unidades de obra. En este presupuesto se estima el coste de construcción de un muro de hormigón armado de las dimensiones de este pretil. En total se ha obtenido un coste de implantación de 96,730 €.

En la Figura 2.34 se muestra el efecto de esta medida sobre el riesgo de la presa.

A2.10.5 Alternativa 5: Rehabilitación del desagüe de fondo izquierdo

En esta alternativa se estudia el efecto de rehabilitar el desagüe de fondo izquierdo I para que pueda ser usado también en la laminación de avenidas, como se contempla en el Proyecto de Adecuación al Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses de la presa I.

Para poder incluir este órgano de desagüe en la laminación se ha modificado su fiabilidad, que ha pasado de ser un 0% para el caso base (ya que no se usaba para la laminación) al 95% con esta alternativa. Este valor de la fiabilidad ha sido elegido porque entra dentro del rango de valores habituales para este tipo de desagües cuando se encuentran en buenas condiciones y con un alto mantenimiento, como será el caso de este desagüe tras su rehabilitación.

Para estimar el coste de esta medida se ha utilizado el presupuesto realizado para el Proyecto de Adecuación al RTSPE, que es de 229,484 €.

En la Figura 2.32 se muestra el efecto de esta medida sobre el riesgo de la presa.

A2.10.6 Alternativa 6: Instalación de compuertas en el aliviadero

Mediante esta alternativa se estudia conjuntamente la reparación de solera y cajeros en el canal del aliviadero, el recrecimiento de muros y la colocación de dos compuertas vagón, como se contempla en el Proyecto de Adecuación al Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses de la presa I. Del conjunto de medidas incluidas, únicamente se tiene en cuenta el impacto en riesgo de la colocación de las compuertas de regulación en el aliviadero

Las compuertas vagón propuestas van colocadas en el muro longitudinal del canal del aliviadero, con una anchura de 2,5 metros y compuertas de actuador y reductor motorizable.

Esta alternativa presenta un nuevo órgano de desagüe a considerar en la laminación del embalse I; con él se pueden desaguar caudales por el aliviadero de forma controlada. Además, la instalación de estas compuertas permite aliviar agua para un nivel más bajo en el embalse, ya que el aliviadero actual tiene su labio más alto.

La inclusión de esta alternativa conlleva incluir dos nuevos nodos en el modelo para incluir la operatividad de cada una de las compuertas. En ambos casos se ha considerado una operatividad del 95%, ya que son compuertas nuevas por lo que su estado será bueno.

Según el presupuesto extraído del Proyecto de Adecuación al Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses de la presa I, la implantación de esta alternativa supone un coste de 560,072 €.

En la Figura 2.34 se muestra el efecto de esta medida sobre el riesgo de la presa.

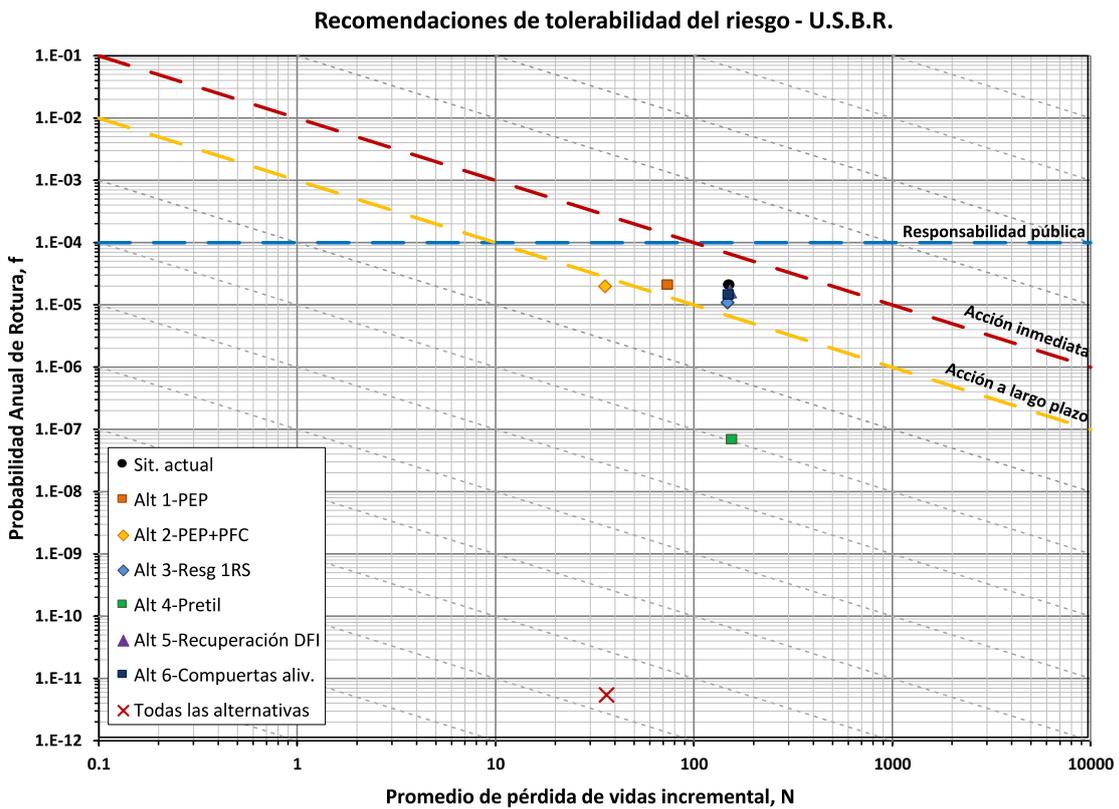


Figura 2.34: Efecto de las medidas en la presa I sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

A2.10.7 Resumen

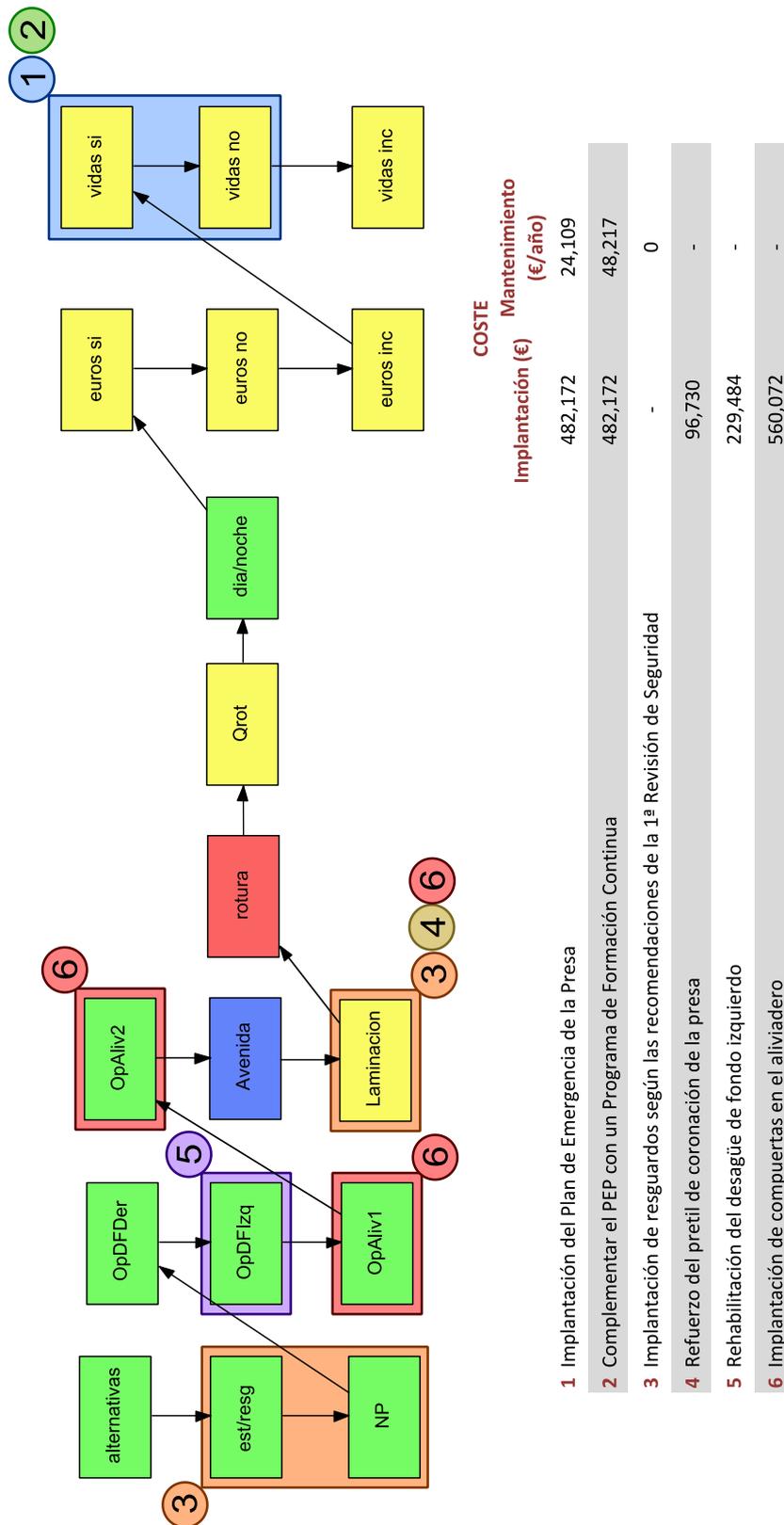


Figura 2.35: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medidas de reducción de riesgo planteadas en la presa I.

A2.11 Medidas en la presa J

A2.11.1 Alternativa 1: Implantación del Plan de Emergencia

Esta mejora consiste en la implantación del Plan de Emergencia de la presa J, que conlleva la mejora de los procedimientos de actuación ante emergencias y una mejor comunicación del peligro a la población a través de sistemas de aviso.

En este caso, esta medida afecta a la pérdida de vidas en los casos de rotura y de no rotura de la presa.

Para incluir el efecto de esta medida dentro del modelo de riesgo, se ha calculado de nuevo la pérdida de vidas utilizando unas menores tasas de mortalidad y un mayor tiempo de aviso.

El coste aproximado de la implantación de esta alternativa es de 446,559 €. Además, el coste anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en un 5% del valor de implantación, resultando en 22,328 €.

En la Figura 2.36 se muestra el efecto de esta medida sobre el riesgo de la presa.

A2.11.2 Alternativa 2: Mejora de los equipos electrohidráulicos

Esta alternativa consiste en la mejora y puesta a punto de los equipos electrohidráulicos de todos los órganos de desagüe de la presa, para mejorar su fiabilidad para la laminación de venidas.

La rehabilitación y mejora de equipos hidromecánicos afecta a la probabilidad de que durante una avenida, se puedan operar los órganos de desagüe. Si esta probabilidad aumenta, la probabilidad de que se alcancen niveles altos en el embalse disminuye. Es por lo tanto una medida que afecta a las cargas del modelo. Los nodos que es necesario modificar son los de la operatividad de los órganos de desagüe. El resultado de esta medida es una reducción de la probabilidad de rotura y por lo tanto también del riesgo.

Según el proyecto de aplicación de esta medida, su coste de implantación es de 4,997130 €.

En la Figura 2.36 se muestra el efecto de esta medida sobre el riesgo de la presa.

A2.11.3 Alternativa 3: Pantallas de impermeabilización y rehabilitación de los sistemas de drenaje

Esta medida se implementa para aumentar la impermeabilización del cimiento y mejorar el sistema de drenaje para conseguir disminuir las subpresiones bajo el cimiento, y de esta forma reducir la probabilidad de deslizamiento de la presa. Esta medida es una de las actuaciones previstas para mejorar la seguridad de esta presa.

Según el proyecto realizado para la implantación de esta medida, el coste de implantación de esta medida es de 823,650 €.

En la Figura 2.36 se muestra el efecto de esta medida sobre el riesgo de la presa.

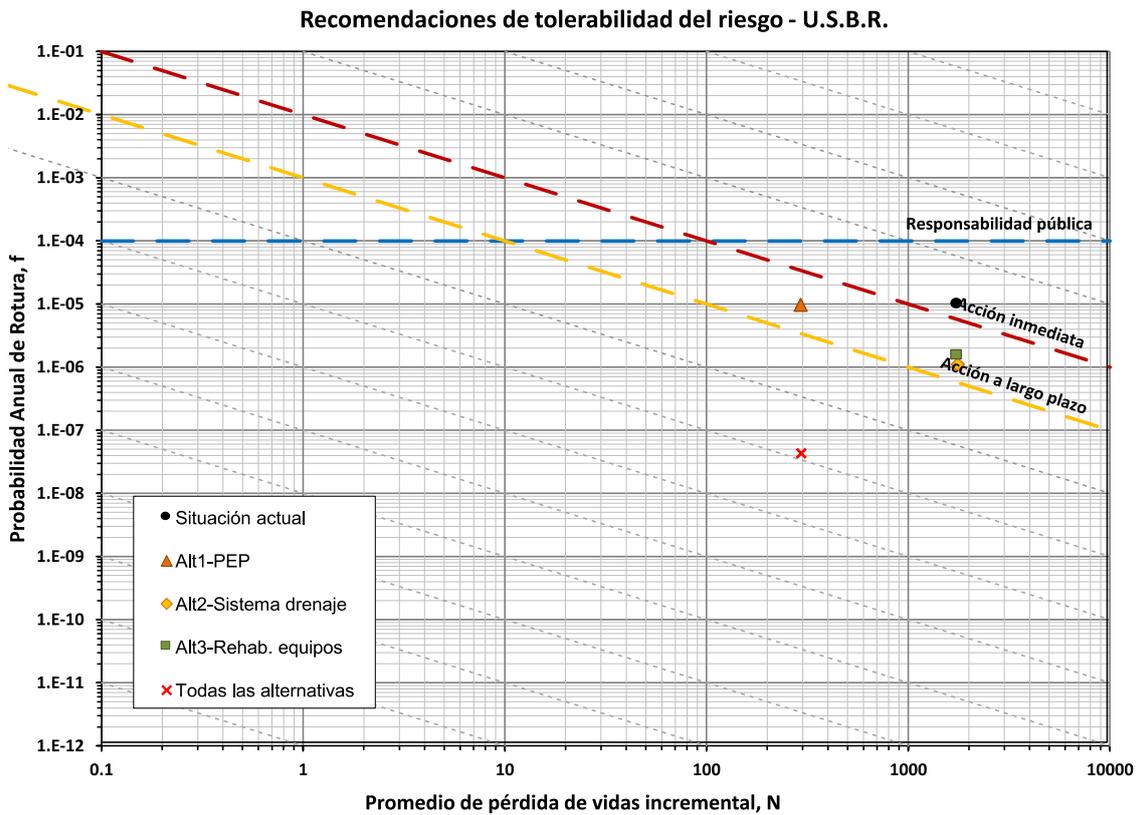


Figura 2.36: Efecto de las medidas en la presa J sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

A2.12 Medidas en la presa K

A2.12.1 Alternativa 1: Implantación del Plan de Emergencia

Esta mejora consiste en la implantación del Plan de Emergencia de la presa K, que conlleva la mejora de los procedimientos de actuación ante emergencias y una mejor comunicación del peligro a la población a través de sistemas de aviso.

En este caso, esta medida afecta a la pérdida de vidas en los casos de rotura y de no rotura de la presa.

Para incluir el efecto de esta medida dentro del modelo de riesgo, se ha calculado de nuevo la pérdida de vidas utilizando el método de Graham. Dentro del proyecto europeo SUFRI [10], las tasas de este método se han adaptado para poder estudiar diferentes grados de entendimiento de la severidad de la inundación en función de los sistemas de aviso, la existencia o no de un Plan de Emergencia y la coordinación entre los servicios de emergencia y la formación de la población.

El coste de implantación de esta medida es de 332.303 €, según el Proyecto de Implantación del Plan de Emergencia. Además, el coste anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en un 5% del valor de implantación, resultando en 16.615 €.

En la Figura 2.37 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

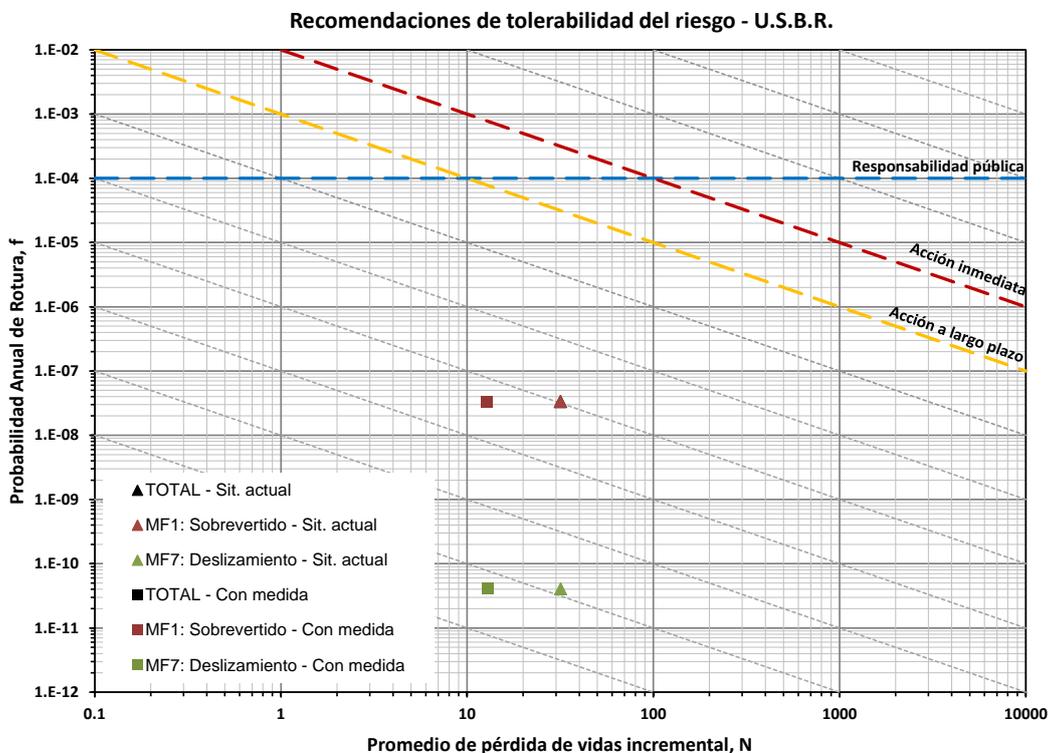


Figura 2.37: Efecto de la implementación del Plan de Emergencia sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, el Plan de Emergencia no modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia reduce el riesgo en vidas al 40% del riesgo original.

A2.12.2 Alternativa 2: Complementar el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua a la población

Esta alternativa consiste en complementar la implantación del Plan de Emergencia de la Presa K con un Programa de Formación Continua a la población aguas abajo de la presa, con el fin de que ésta conozca perfectamente los procedimientos a seguir y los lugares de refugio a los que deben acudir en el caso de rotura de la presa. Para ello, es necesario un programa de formación continua a la población, incluyendo simulacros, y un funcionamiento eficaz de los medios de comunicación a la población en estos casos y de los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad, con el fin de reducir la pérdida de vidas lo máximo posible.

Como la alternativa anterior, esta alternativa afecta únicamente a la pérdida de vidas. Por ello, los cálculos realizados de pérdida de vidas utilizando el método de Graham se han vuelto a realizar con nuevas tasas de mortalidad que incluyen esta mayor formación de la población.

El coste de implantación de esta alternativa es el mismo que en la alternativa 1. El coste aproximado anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto como el doble del coste de mantenimiento del Plan de Emergencia de la alternativa 1, ya que es necesario un mayor número de recursos y de personal para formar correctamente a la población. Por lo tanto, el coste anual de esta medida es de 33.230 €.

En la Figura 2.38 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

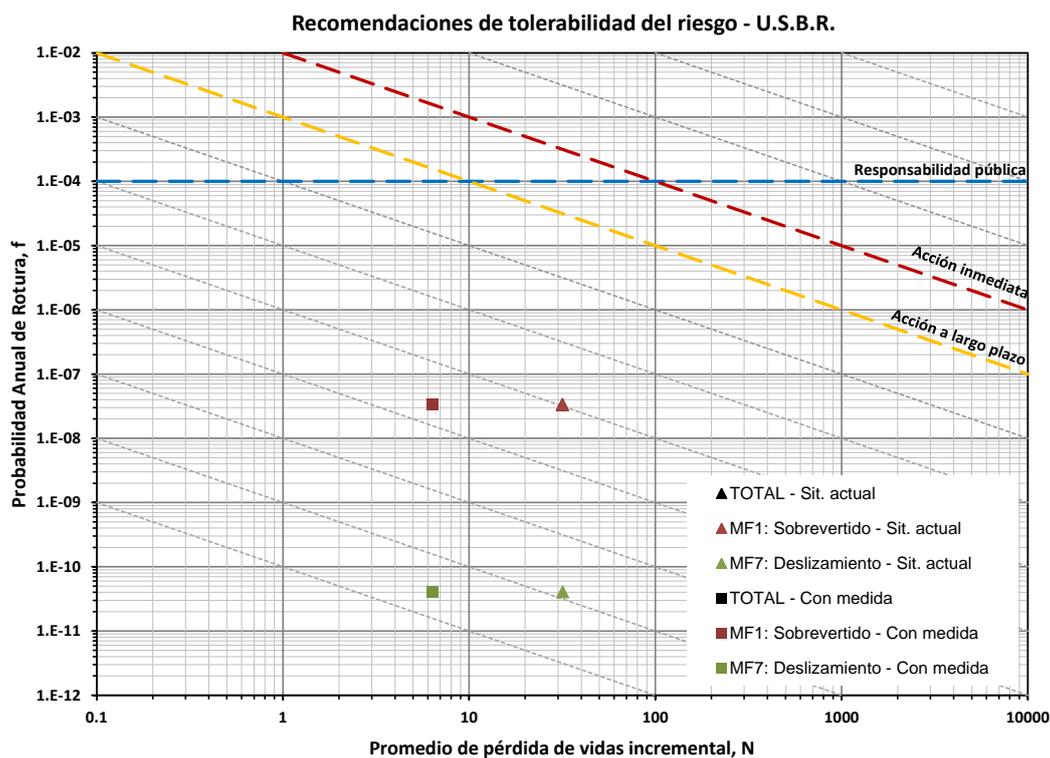


Figura 2.38: Efecto de la implementación del PEP con un Programa de Formación Continua sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, esta medida tampoco modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua reduce el riesgo en vidas al 20% del riesgo original.

A2.12.3 Alternativa 3: Reparación de las compuertas del aliviadero y renovación de sus mecanismos

Esta medida se halla planteada en el “Anteproyecto de sustitución de los mecanismos de accionamiento de las compuertas Taintor y de instalación en ellas de elementos de seguridad para el mantenimiento”, de junio de 2008. Todavía no se ha redactado, a fecha del presente informe, un proyecto completo con las actuaciones propuestas, algunas de las cuales podrían ser finalmente anuladas o modificadas respecto de su formulación actual, a la hora de realizarse los trabajos en un futuro.

Se plantea la renovación de los sistemas de accionamiento y la puesta a punto y refuerzo estructural de las compuertas Taintor del aliviadero, aunque sin proceder a la sustitución completa de las mismas. Según el Anteproyecto, el coste de la actuación es de 591.917 €.

Esta alternativa afecta principalmente al modo de fallo 1, vertido por coronación, aunque también contribuye a evitar un fallo por deslizamiento (modo de fallo 7), reduciendo la probabilidad de alcanzar niveles de embalse superiores al NMN. El efecto estimado sobre los nodos que componen el modelo es:

- Nodo de operatividad de compuertas del aliviadero. La puesta a punto y la renovación de los accionamientos mejoran la fiabilidad de las compuertas, de forma que reduce la probabilidad de que se mantengan inoperativas durante una avenida. Por tanto, se asigna un 95% de fiabilidad a cada una de las tres compuertas del aliviadero.

En la Figura 2.39 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

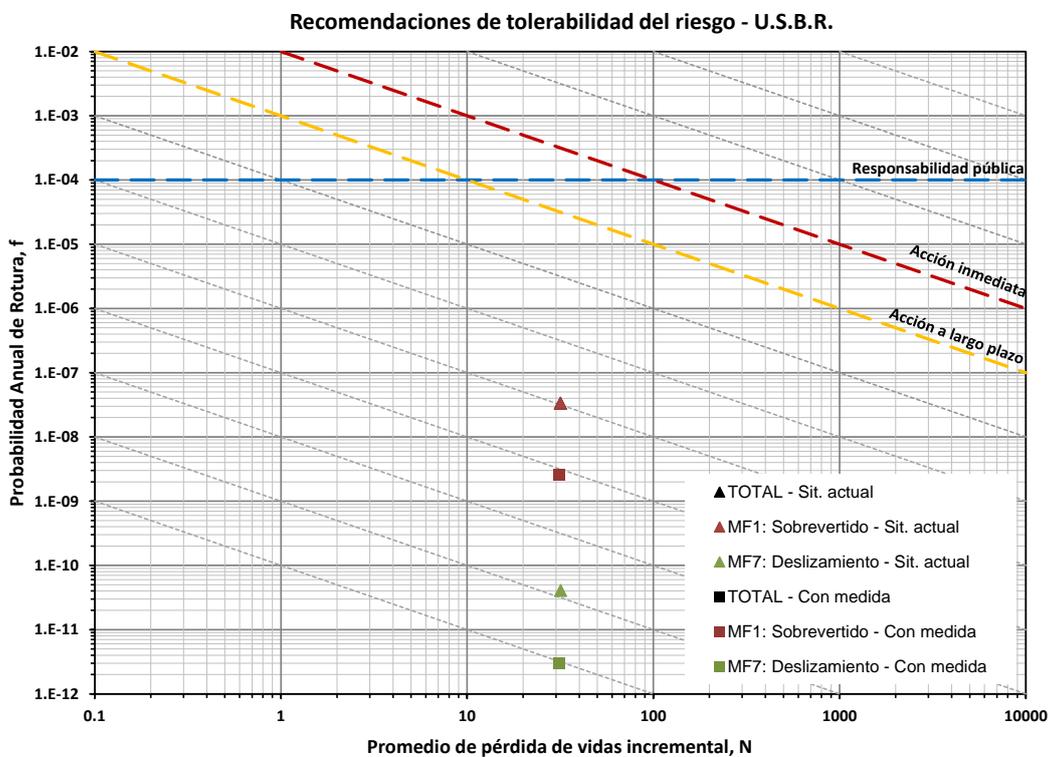


Figura 2.39: Efecto de la mejora de las compuertas sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida tiene un efecto sobre los dos modos de fallo, ya que una mejora de la fiabilidad reduce la probabilidad de alcanzar niveles muy altos en el embalse, por lo que se reduce la probabilidad de rotura por deslizamiento y por sobrevertido.

A2.12.4 Resumen

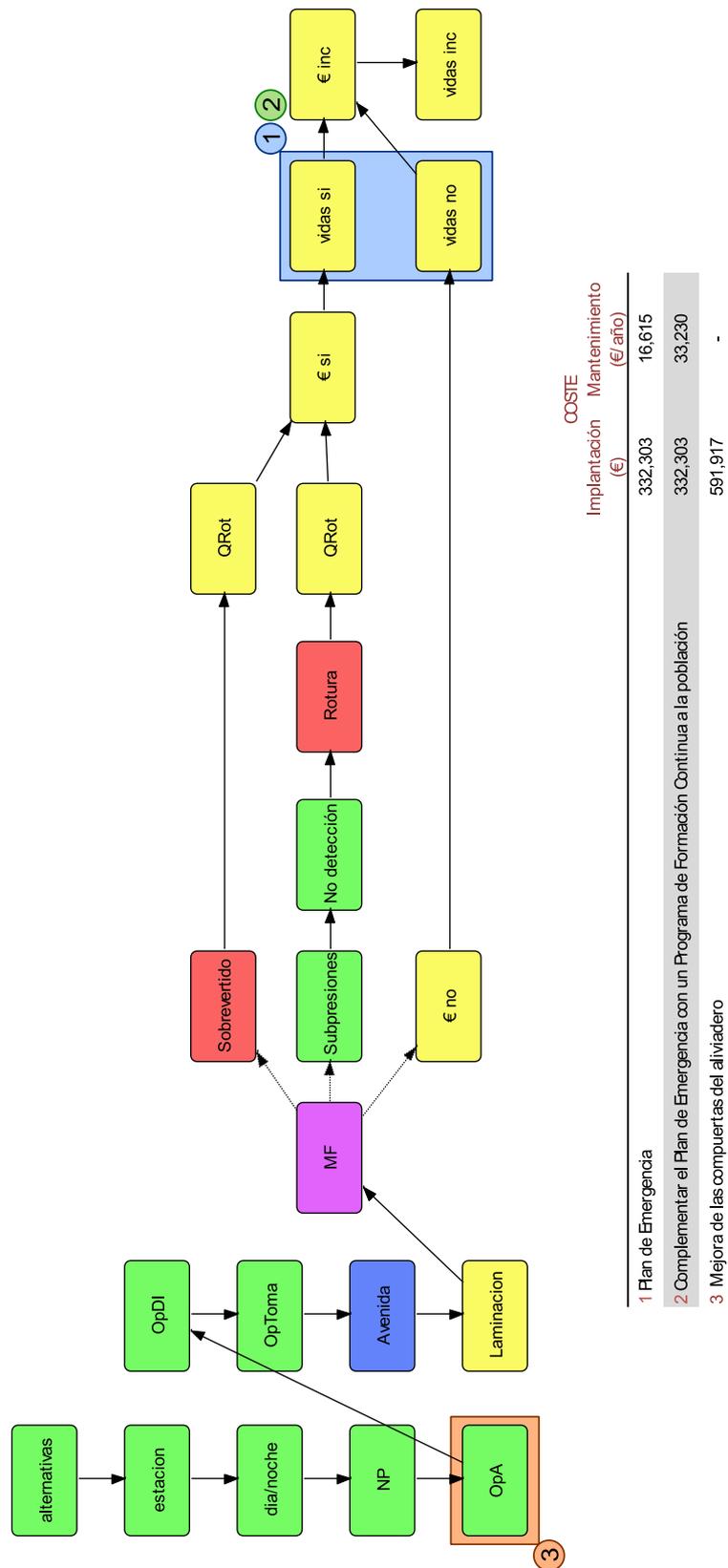


Figura 2.40: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medidas de reducción de riesgo planteadas en la presa K.

A2.13 Medidas en la presa L

A2.13.1 Alternativa 1: Complementar el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua a la población

Esta alternativa consiste en complementar el Plan de Emergencia de la Presa L con un Programa de Formación Continua a la población aguas abajo de la presa, con el fin de que ésta conozca perfectamente los procedimientos a seguir y los lugares de refugio a los que deben acudir en el caso de rotura de la presa. Para ello, es necesario un programa de formación continua a la población, incluyendo simulacros, y un funcionamiento eficaz de los medios de comunicación a la población en estos casos y de los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad, con el fin de reducir la pérdida de vidas lo máximo posible.

Esta alternativa afecta únicamente a la pérdida de vidas. Por ello, los cálculos realizados de pérdida de vidas utilizando el método de Graham se han vuelto a realizar con nuevas tasas de mortalidad que incluyen esta mayor formación de la población.

El coste anual de esta medida se ha estimado en 30,000 €/año.

A2.14 Medidas en la presa M

A2.14.1 Alternativa 1: Implantación del Plan de Emergencia

Esta mejora consiste en la implantación del Plan de Emergencia de la presa M, que conlleva la mejora de los procedimientos de actuación ante emergencias y una mejor comunicación del peligro a la población a través de sistemas de aviso.

En este caso, esta medida afecta a la pérdida de vidas en los casos de rotura y de no rotura de la presa.

Para incluir el efecto de esta medida dentro del modelo de riesgo, se ha calculado de nuevo la pérdida de vidas utilizando el método de Graham. Dentro del proyecto europeo SUFRI [10], las tasas de este método se han adaptado para poder estudiar diferentes grados de entendimiento de la severidad de la inundación en función de los sistemas de aviso, la existencia o no de un Plan de Emergencia y la coordinación entre los servicios de emergencia y la formación de la población.

El coste de implantación de esta medida es de 694,154 €, según el Proyecto de Implantación del Plan de Emergencia. Además, el coste anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en un 5% del valor de implantación, resultando en 34,708 €.

En la Figura 2.41 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

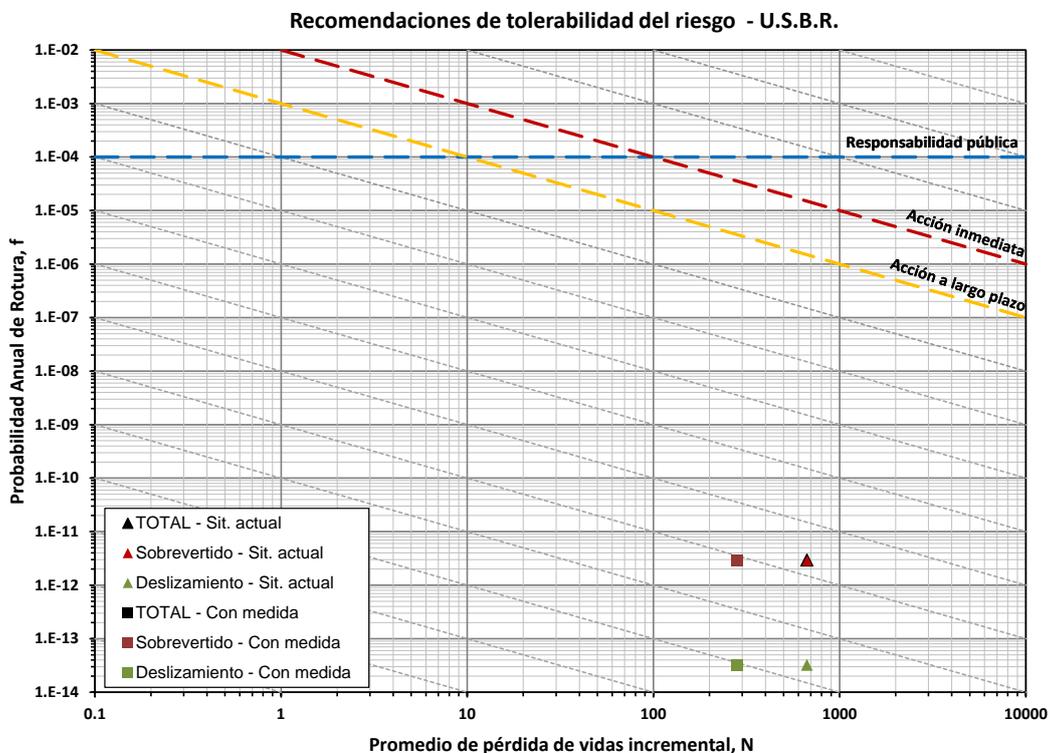


Figura 2.41: Efecto de la implementación del Plan de Emergencia sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, el Plan de Emergencia no modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia reduce el riesgo en vidas al 42% del riesgo original.

A2.14.2 Alternativa 2: Complementar el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua a la población

Esta alternativa consiste en complementar la implantación del Plan de Emergencia de la Presa M con un Programa de Formación Continua a la población aguas abajo de la presa, con el fin de que ésta conozca perfectamente los procedimientos a seguir y los lugares de refugio a los que deben acudir en el caso de rotura de la presa. Para ello, es necesario un programa de formación continua a la población, incluyendo simulacros, y un funcionamiento eficaz de los medios de comunicación a la población en estos casos y de los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad, con el fin de reducir la pérdida de vidas lo máximo posible.

Como la alternativa anterior, esta alternativa afecta únicamente a la pérdida de vidas. Por ello, los cálculos realizados de pérdida de vidas utilizando el método de Graham se han vuelto a realizar con nuevas tasas de mortalidad que incluyen esta mayor formación de la población.

El coste de implantación de esta alternativa es el mismo que en la alternativa 1. El coste aproximado anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto como el doble del coste de mantenimiento del Plan de Emergencia de la alternativa 1, ya que es necesario un mayor número de recursos y de personal para formar correctamente a la población. Por lo tanto, el coste anual de esta medida es de 69,415 €.

En la Figura 2.42 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

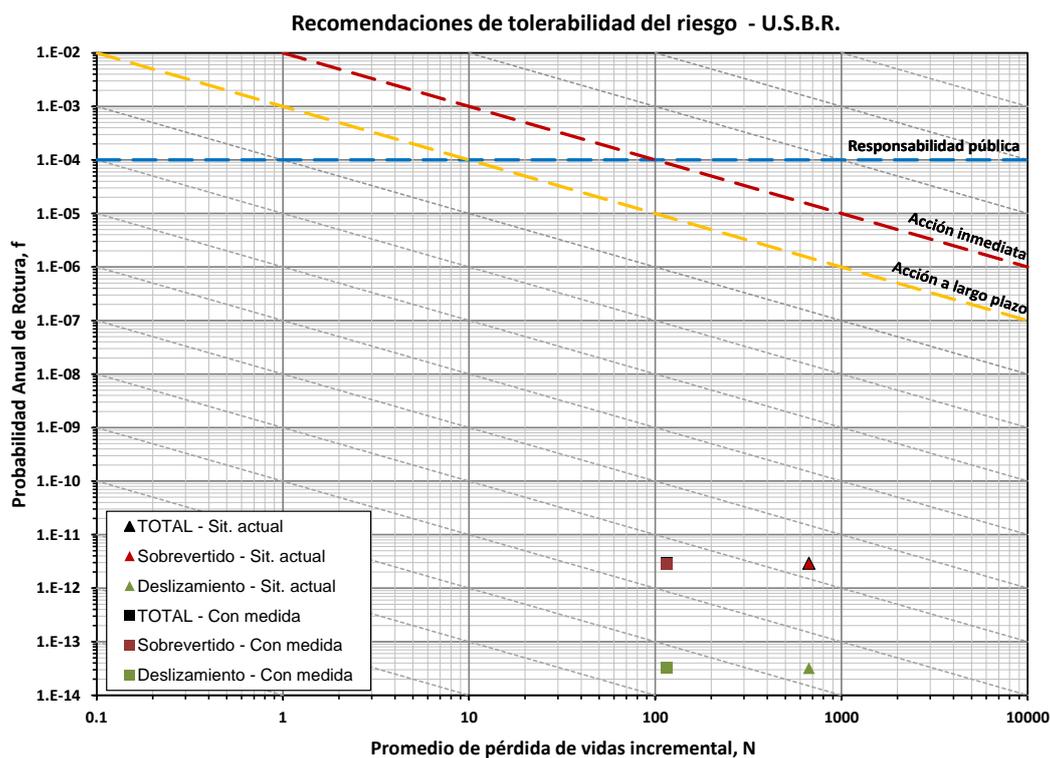


Figura 2.42: Efecto de la implementación del PEP con un Programa de Formación Continua sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, esta medida tampoco modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua reduce el riesgo en vidas al 17% del riesgo original.

A2.14.3 Alternativa 3: Mejora de las compuertas del aliviadero

Esta medida se ha planteado a partir de las actuaciones previstas en el Proyecto de Adecuación al Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses. El objetivo de estas actuaciones es mejorar el funcionamiento de las compuertas del aliviadero de forma que se pueda aumentar su fiabilidad. En concreto, esta medida consiste en:

- Mejora del sistema de accionamiento de las compuertas Taintor del aliviadero.
- Mejora de los accesos a las compuertas/cámaras de accionamiento.
- Protección de los brazos de las compuertas Taintor frente a avenidas.

Esta alternativa afecta al nodo de operatividad del aliviadero, ya que mejora la fiabilidad de sus compuertas. En este caso, se ha considerado que estas actuaciones producen una mejora en la fiabilidad individual de las compuertas del 85% al 95%.

El coste de implantación de esta medida se encuentra en el Proyecto Adecuación al Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses. Este coste es de 429,827 €.

En la Figura 2.43 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

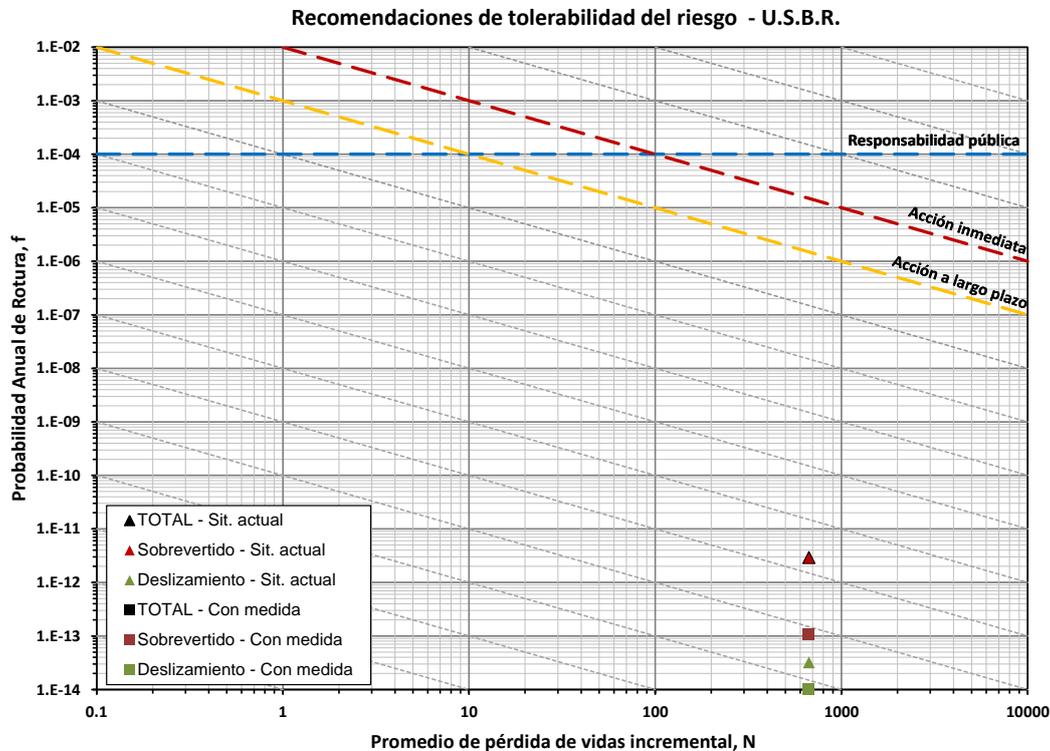


Figura 2.43: Efecto de la mejora de las compuertas sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida tiene un efecto importante sobre los dos modos de fallo, ya que una mejora de la fiabilidad reduce la probabilidad de alcanzar niveles muy altos en el embalse, por lo que se reduce la probabilidad de sobrevertido y deslizamiento.

A2.14.4 Alternativa 4: Inyecciones bajo el bloque 8

Esta medida se ha planteado a partir de las recomendaciones del informe de Identificación de Modos de Fallo. El objetivo de estas actuaciones es reducir las subpresiones bajo este bloque, ya que se han detectado los siguientes problemas:

- Se ha detectado arrastre de material procedente del cemento y mayores filtraciones en la zona de los bloques 8 y 7 (dren 2 del bloque 8, especialmente).
- El dren 2 del bloque 8 adquiere presión manométrica con gran rapidez, alcanzando más de 3 kg/cm² en pocos minutos.
- Los piezómetros de cuerda vibrante muestran un comportamiento anómalo, por lo que no puede contarse con ellos para controlar las subpresiones en el contacto con el cemento.

Esta alternativa afecta al nodo de altas subpresiones, ya que la realización de estas inyecciones reduce la probabilidad de tener altas subpresiones bajo la presa. Por lo tanto, esta medida únicamente reduce la probabilidad del modo de fallo por deslizamiento. Esta medida ha sido introducida en el modelo de riesgo modificando el nodo de altas subpresiones del 5% al 2%.

El coste de implantación de esta medida ha sido estimado mediante un presupuesto estimativo de las obras a realizar y de los equipos necesarios. El coste obtenido es de 135,000 €.

En la Figura 2.44 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

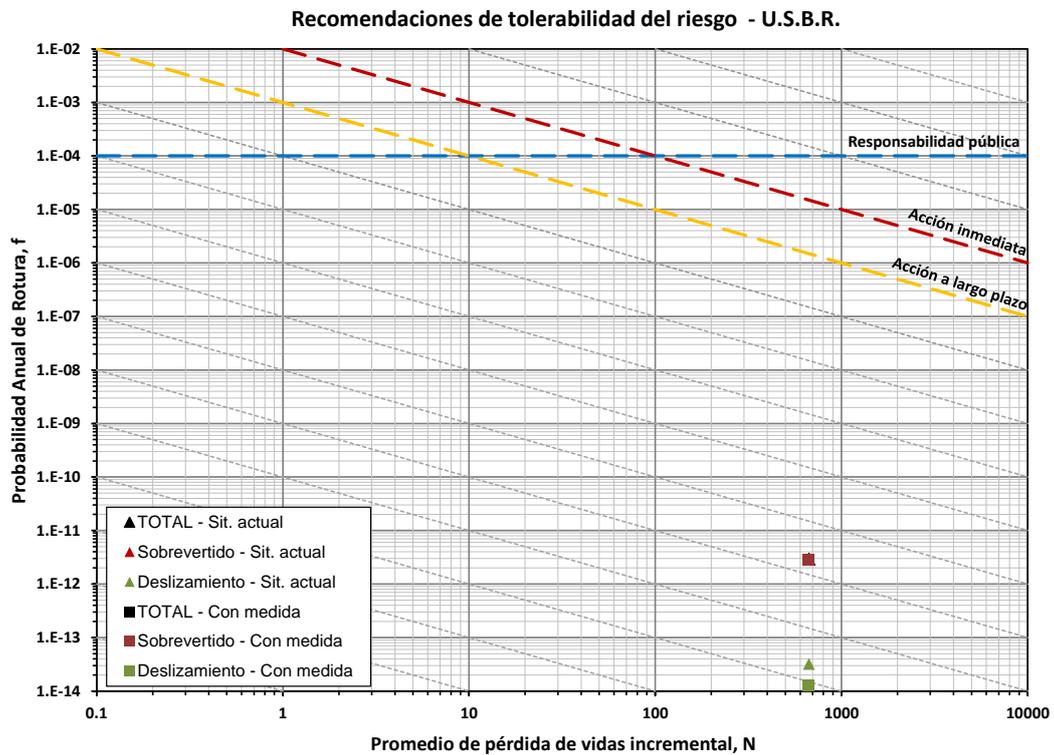


Figura 2.44: Efecto de las inyecciones bajo el bloque 8 en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida afecta principalmente al modo de fallo por deslizamiento, reduciendo de forma apreciable su probabilidad de fallo. Aunque cómo la probabilidad de este modo de fallo respecto al sobrevvertido es muy baja, el efecto de esta medida sobre el riesgo total de la presa es muy bajo también.

A2.14.5 Resumen

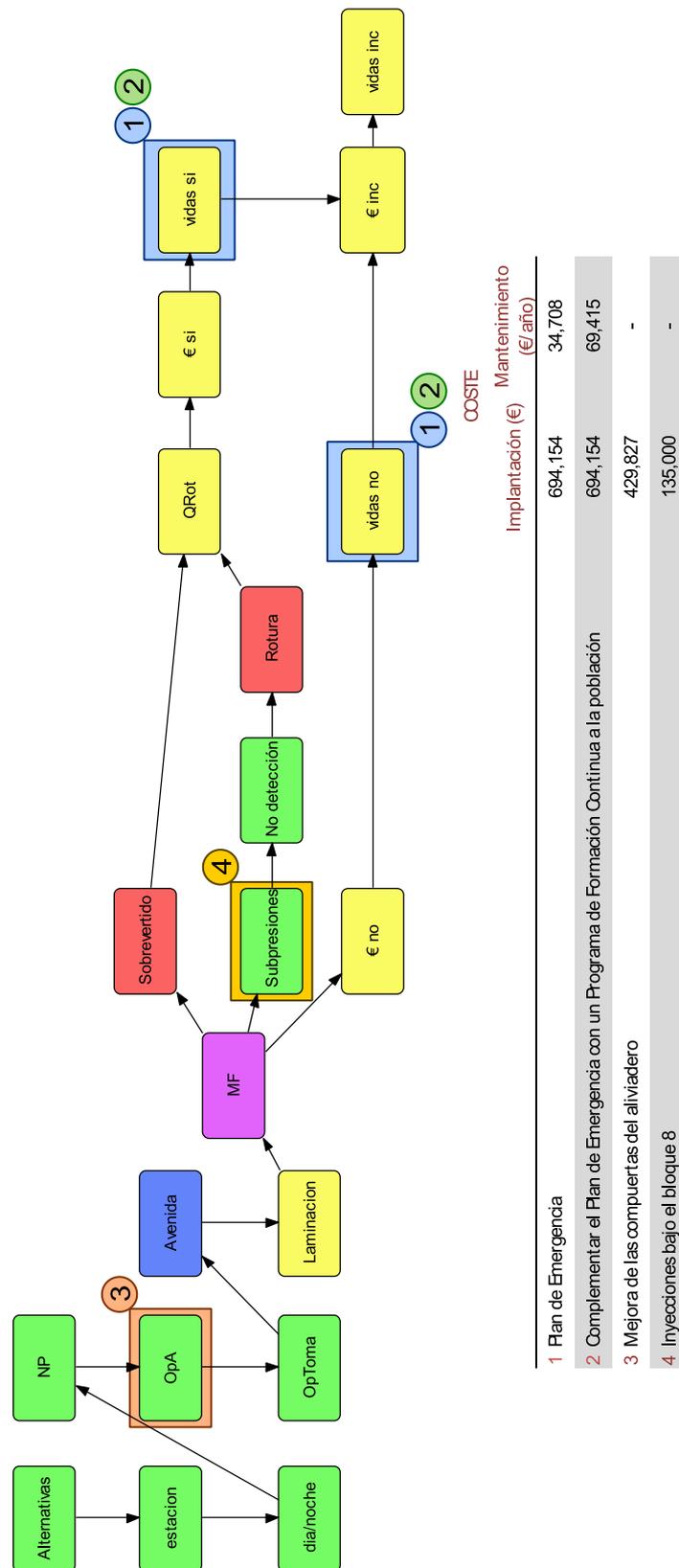


Figura 2.45: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medidas de reducción de riesgo planteadas en la presa M.

A2.15 Medida en la presa N

A2.15.1 Alternativa 1: Implantación del Plan de Emergencia

Esta mejora consiste en la implantación del Plan de Emergencia de la presa N, que conlleva la mejora de los procedimientos de actuación ante emergencias y una mejor comunicación del peligro a la población a través de sistemas de aviso.

En este caso, esta medida afecta a la pérdida de vidas de la presa en el caso de rotura y de no rotura. Por lo tanto, esta medida afecta a los nodos de pérdida de vidas del modelo.

Para incluir el efecto de esta medida dentro del modelo de riesgo, se ha calculado de nuevo la pérdida de vidas utilizando el método de Graham. Dentro del proyecto europeo SUFRI [10], las tasas de este método se han adaptado para poder estudiar diferentes grados de entendimiento de la severidad de la inundación en función de los sistemas de aviso, la existencia o no de un Plan de Emergencia y la coordinación entre los servicios de emergencia y la formación de la población.

El coste de implantación de esta medida se ha estimado en 350,000 € a partir del coste de implantación del Plan de Emergencia en presa similares. Además, el coste anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en un 5% del valor de implantación, resultando en 17,500 €.

En la Figura 2.46 se muestra el efecto de esta medida sobre el modo de fallo considerado en esta presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

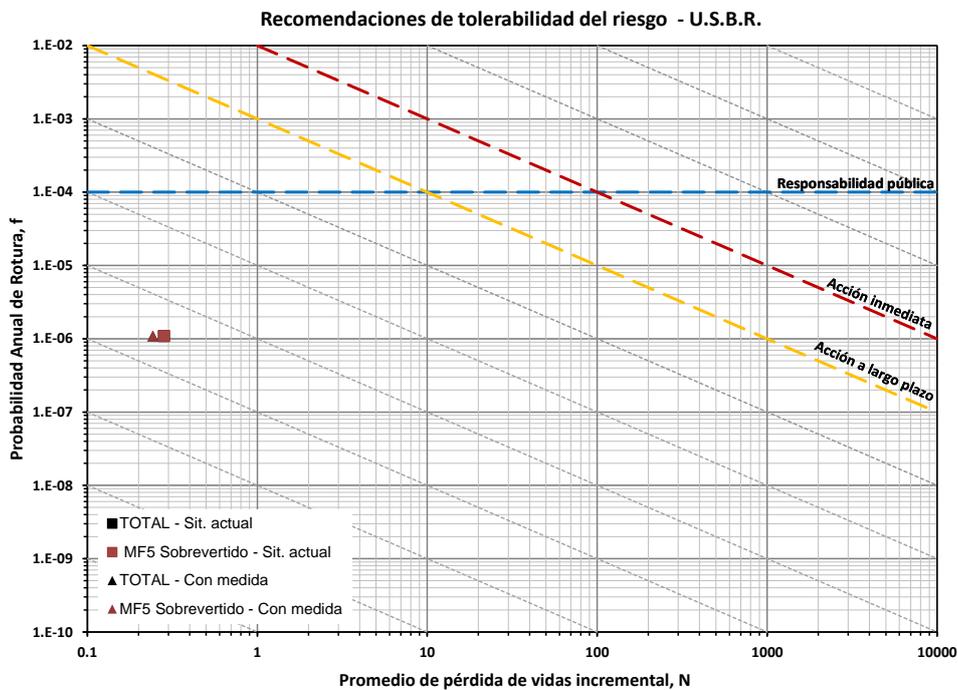


Figura 2.46: Efecto de la implementación del Plan de Emergencia sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, el Plan de Emergencia no modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia reduce el riesgo en vidas al 86% del riesgo original.

A2.15.2 Alternativa 2: Complementar el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua a la población

Esta alternativa consiste en complementar la implantación del Plan de Emergencia de la Presa N con un Programa de Formación Continua a la población aguas abajo de la presa, con el fin de que ésta conozca perfectamente los procedimientos a seguir y los lugares de refugio a los que deben acudir en el caso de rotura de la presa. Para ello, es necesario un programa de formación continua a la población, incluyendo simulacros, y un funcionamiento eficaz de los medios de comunicación a la población en estos casos y de los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad, con el fin de reducir la pérdida de vidas lo máximo posible.

Como la alternativa anterior, esta alternativa afecta únicamente a la pérdida de vidas. Por ello, los cálculos realizados de pérdida de vidas utilizando el método de Graham se han vuelto a realizar con nuevas tasas de mortalidad que incluyen esta mayor formación de la población.

El coste de implantación de esta alternativa es el mismo que en la alternativa 1. El coste aproximado anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto como el doble del coste de mantenimiento del Plan de Emergencia de la alternativa 1, ya que es necesario un mayor número de recursos y de personal para formar correctamente a la población. Por lo tanto, el coste anual de esta medida es de 350,000 €.

En la Figura 2.47 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

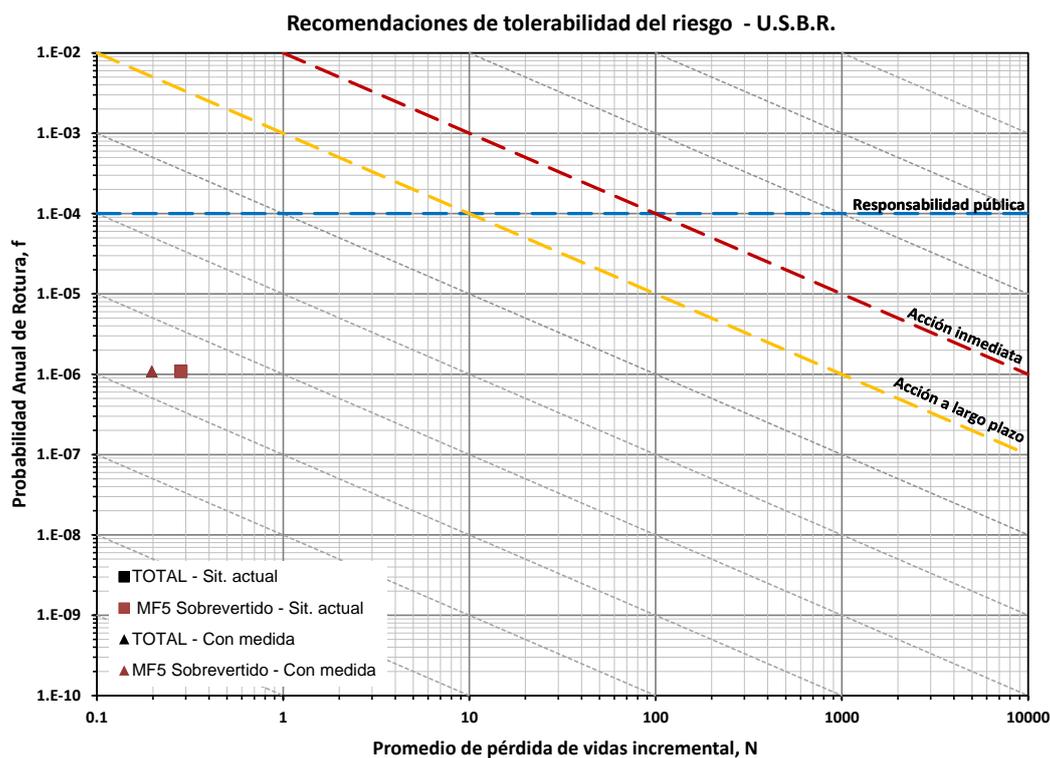


Figura 2.47: Efecto de la implementación del PEP con un Programa de Formación Continua sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, esta medida tampoco modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua reduce el riesgo en vidas al 70% del riesgo original.

A2.15.3 Resumen

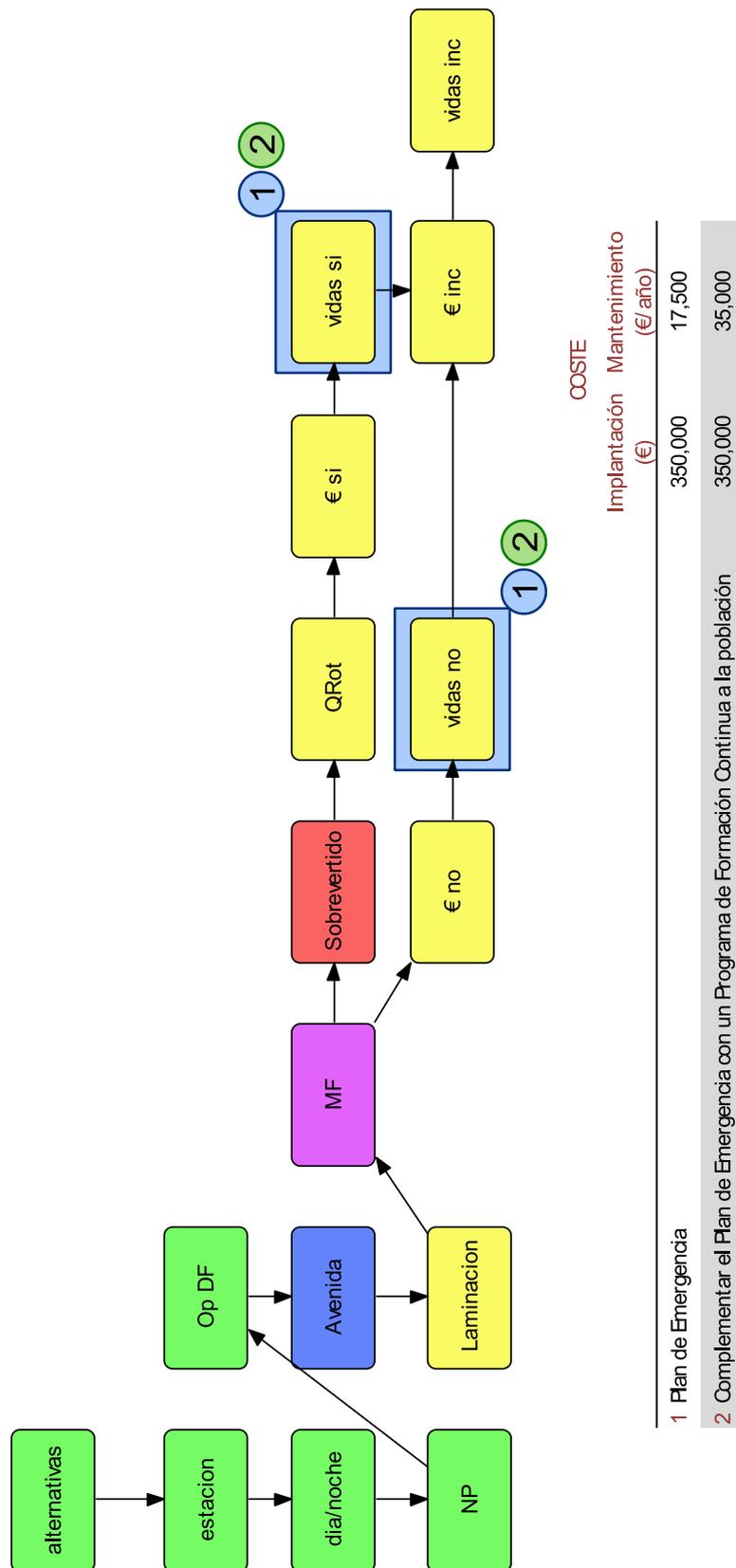


Figura 2.48: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medidas de reducción de riesgo planteadas en la presa N.

A2.16 Medidas en la presa O

A2.16.1 Alternativa 1: Implantación del Plan de Emergencia

Esta mejora consiste en la implantación del Plan de Emergencia de la presa O, que conlleva la mejora de los procedimientos de actuación ante emergencias y una mejor comunicación del peligro a la población a través de sistemas de aviso.

En este caso, esta medida afecta a la pérdida de vidas en los casos de rotura y de no rotura de la presa.

Para incluir el efecto de esta medida dentro del modelo de riesgo, se ha calculado de nuevo la pérdida de vidas utilizando el método de Graham. Dentro del proyecto europeo SUFRI [10], las tasas de este método se han adaptado para poder estudiar diferentes grados de entendimiento de la severidad de la inundación en función de los sistemas de aviso, la existencia o no de un Plan de Emergencia y la coordinación entre los servicios de emergencia y la formación de la población.

El coste de implantación de esta medida es de 602,765 €, según el Proyecto de Implantación del Plan de Emergencia. Además, el coste anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en un 5% del valor de implantación, resultando en 30,138 €.

En la Figura 2.49 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

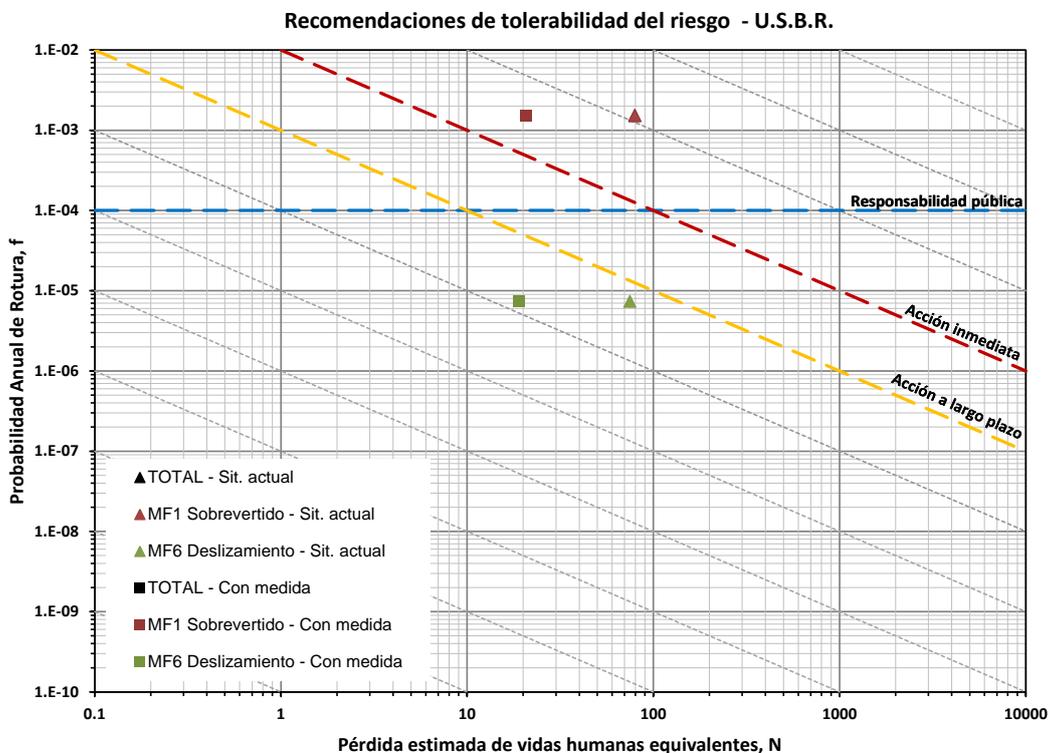


Figura 2.49: Efecto de la implementación del Plan de Emergencia sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, el Plan de Emergencia no modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia reduce el riesgo en vidas al 26% del riesgo original.

A2.16.2 Alternativa 2: Complementar el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua a la población

Esta alternativa consiste en complementar la implantación del Plan de Emergencia de la Presa O con un Programa de Formación Continua a la población aguas abajo de la presa, con el fin de que ésta conozca perfectamente los procedimientos a seguir y los lugares de refugio a los que deben acudir en el caso de rotura de la presa. Para ello, es necesario un programa de formación continua a la población, incluyendo simulacros, y un funcionamiento eficaz de los medios de comunicación a la población en estos casos y de los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad, con el fin de reducir la pérdida de vidas lo máximo posible.

Como la alternativa anterior, esta alternativa afecta únicamente a la pérdida de vidas. Por ello, los cálculos de pérdida de vidas utilizando el método de Graham se han vuelto a realizar con nuevas tasas de mortalidad que incluyen esta mayor formación de la población.

El coste de implantación de esta alternativa es el mismo que en la alternativa 1. El coste aproximado anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto como el doble del coste de mantenimiento del Plan de Emergencia de la alternativa 1, ya que es necesario un mayor número de recursos y de personal para formar correctamente a la población. Por lo tanto, el coste anual de esta medida es de 60,277 €.

En la Figura 2.50 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

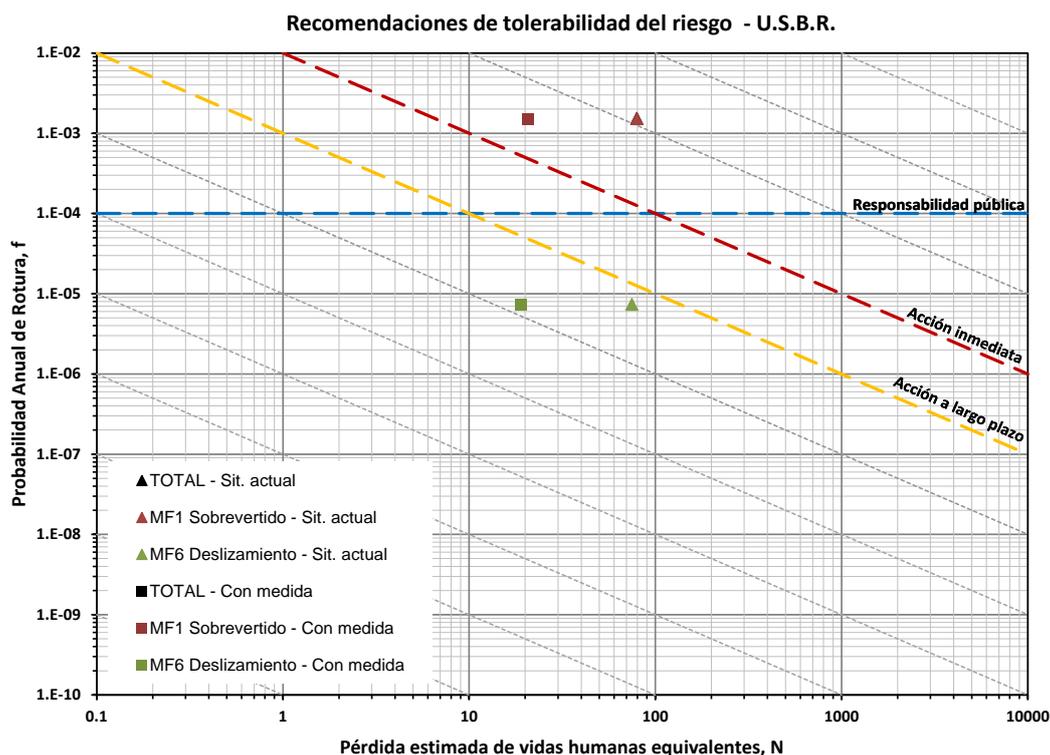


Figura 2.50: Efecto de la implementación del PEP con un Programa de Formación Continua sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, esta medida tampoco modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua reduce el riesgo en vidas al 5% del riesgo original.

A2.16.3 Alternativa 3: Sustitución de los órganos de desagüe

Esta medida ya ha sido proyectada y contratada para su ejecución, por lo que será realizada en un futuro próximo. El objetivo de estas actuaciones es mejorar el funcionamiento de las compuertas de los órganos de desagüe, de forma que se pueda aumentar su fiabilidad. En concreto, esta medida consiste en:

- Sustitución de las dos compuertas Taintor del aliviadero por dos nuevas compuertas Taintor.
- Sustitución de las cuatro compuertas de tipo Bureau del desagüe de fondo por dos nuevas compuertas Breau y dos nuevas compuertas anulares.
- Mejora de las instalaciones de accionamiento y de control de datos en las compuertas.

Esta alternativa afecta a los nodos de operatividad de los órganos de desagüe, ya que mejora su fiabilidad individual. En este caso, se ha considerado que estas actuaciones producen una mejora en la fiabilidad individual del 75% al 95%, tanto en el aliviadero como en el desagüe de fondo.

El coste de esta medida según el proyecto de implantación es de 2,631,603 €.

En la Figura 2.51 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

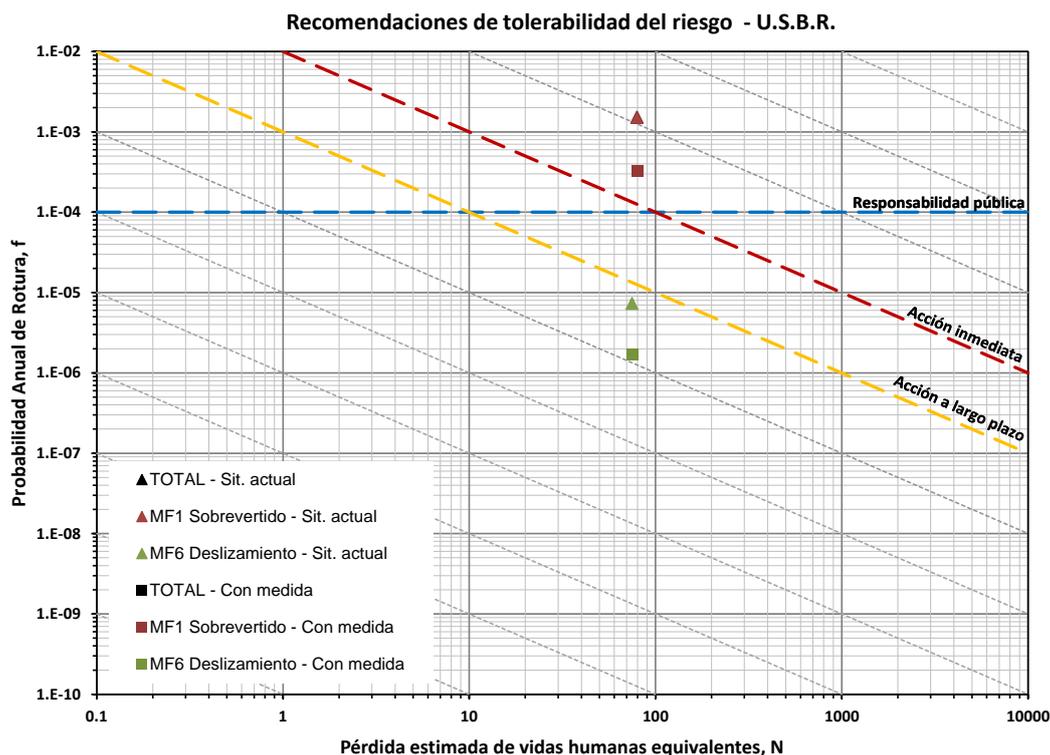


Figura 2.51: Efecto de la mejora de las compuertas sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida tiene un efecto importante sobre los dos modos de fallo, ya que una mejora de la fiabilidad de los órganos de desagüe reduce la probabilidad de alcanzar niveles muy altos en el embalse, por lo que se reduce la probabilidad de sobrevertido y deslizamiento.

A2.16.4 Alternativa 4: Implantación de los resguardos de las Normas de Explotación

Esta alternativa consiste en la implantación de resguardos estacionales en la presa según las recomendaciones de las Normas de Explotación O para tener un volumen libre suficiente en el embalse que permita la laminación de las avenidas, de forma que se cumplan las condiciones marcadas por el Reglamento de 1996 y la Guía Técnica nº4. En este documento se ha propuesto implantar los siguientes resguardos:

- De octubre a mayo un resguardo de 35,32 hm³.
- En junio un resguardo de 24,16 hm³.
- De julio a septiembre no es necesaria la implantación de resguardos.

La implantación de resguardos afecta principalmente al nodo de niveles previos, ya que el nivel al que se encuentra el embalse cuando llega la avenida no será superior al nivel de resguardo marcado. De esta forma, las curvas de probabilidad de nivel previo introducidas en el modelo se modifican con esta alternativa.

Esta medida también afecta a la laminación de las avenidas, ya que se modifican las consignas de operación porque se empieza a verter agua por los órganos de desagüe para niveles más bajos.

Para estimar las consecuencias económicas de estos resguardos por disminución de las garantías de las demandas de agua se ha utilizado un modelo de simulación del sistema de recursos hídricos en el programa AQUATOOL [28]. Mediante este modelo, se ha estimado la diferencia entre el volumen de agua satisfecho entre la situación actual y el caso con los resguardos de las normas de explotación. El resultado de este análisis es que estos resguardos no afectan a las demandas y por lo tanto, no tienen un coste económico.

En la Figura 2.52 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

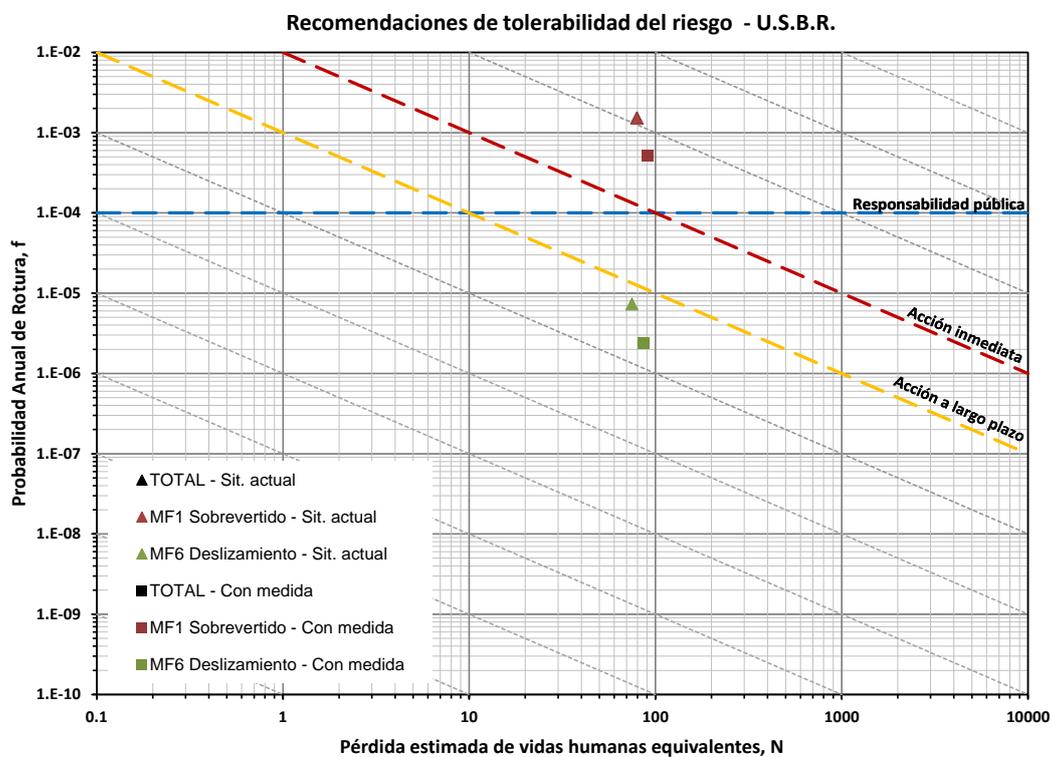


Figura 2.52: Efecto de la implantación de resguardos en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida tiene un efecto importante sobre los dos modos de fallo, ya que la implantación de resguardos reduce la probabilidad de alcanzar niveles muy altos en el embalse, por lo que se reduce la probabilidad de sobrevertido y deslizamiento.

A2.16.5 Alternativa 5: Ampliación de la capacidad del aliviadero

Tras analizar los resultados obtenidos en la laminación, se ha observado que una forma adecuada de reducir el riesgo en esta presa puede ser aumentar la capacidad de alivio, de forma que se reduzcan los niveles alcanzados en el embalse. Para ello, se han analizado diferentes alternativas:

- Rebaje del labio del aliviadero.
- Desagüe de fondo de gran capacidad.
- Aumento de la longitud de vertido del aliviadero.

Tras analizar las ventajas e inconvenientes de cada opción y estudiar las decisiones adoptadas para presas similares, se ha concluido que la mejor opción es el rebaje de la cota del aliviadero, ya que se trata de una presa muy encajada donde el resto de opciones serían poco viables.

Según los resultados de laminación obtenidos, se necesita aumentar la capacidad del aliviadero en $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ para el nivel en coronación, de forma que se cumplan las condiciones marcadas por el Reglamento de 1996 y la Guía Técnica nº4. Para ello, se ha analizado como aumenta la capacidad del aliviadero en el nivel de coronación en función del rebaje del labio del aliviadero. Según esta relación, la solución óptima es rebajar el labio del aliviadero en 2 metros aproximadamente.

Finalmente, se ha calculado el riesgo en la presa rebajando el labio del aliviadero 1m, 2m y 3m, siendo 2m la opción óptima para quedar de forma holgada por debajo de las recomendaciones de tolerabilidad de riesgo cuando se realizan todas las medidas.

Esta medida afecta principalmente al nodo de laminación de las avenidas, ya que se modifican las curvas de gasto del aliviadero, ya que empiezan a verte para un nivel más bajo.

El coste de implantación de esta medida ha sido estimado mediante un presupuesto estimativo de las obras a realizar y de los equipos necesarios. El coste obtenido es de 2,050,000 €.

En la Figura 2.53 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

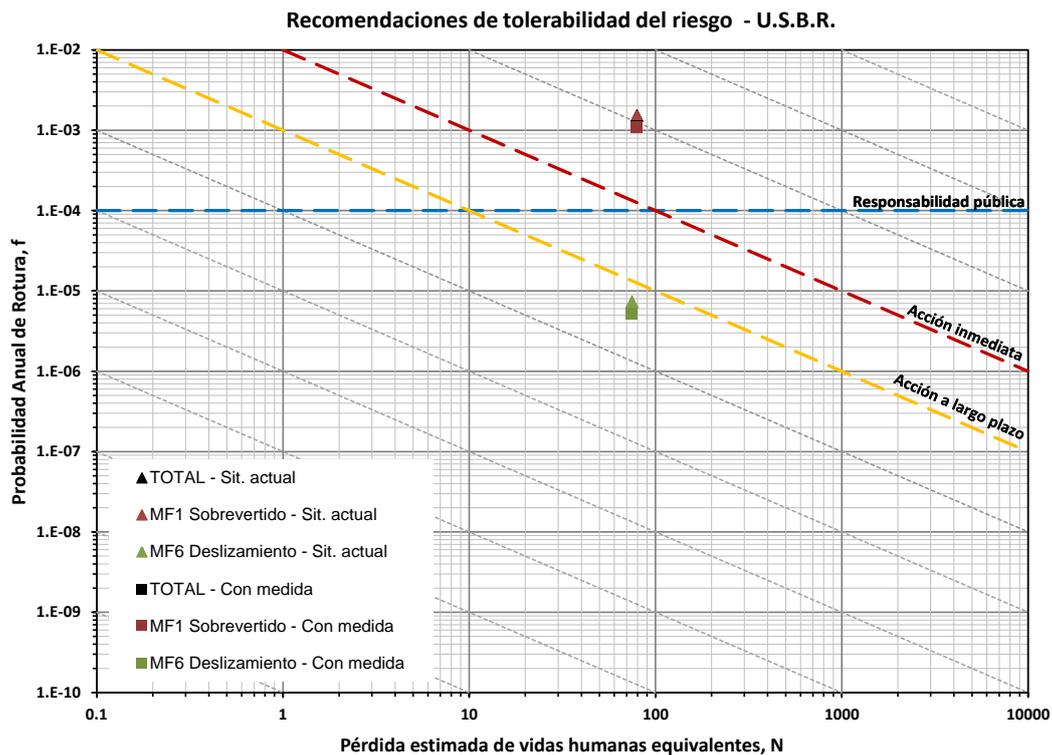


Figura 2.53: Efecto de la implantación de resguardos en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida tiene un efecto sobre los dos modos de fallo, ya que el aumento de la capacidad del aliviadero reduce la probabilidad de alcanzar niveles muy altos en el embalse, por lo que se reduce la probabilidad de sobrevertido y deslizamiento.

A2.16.6 Resumen

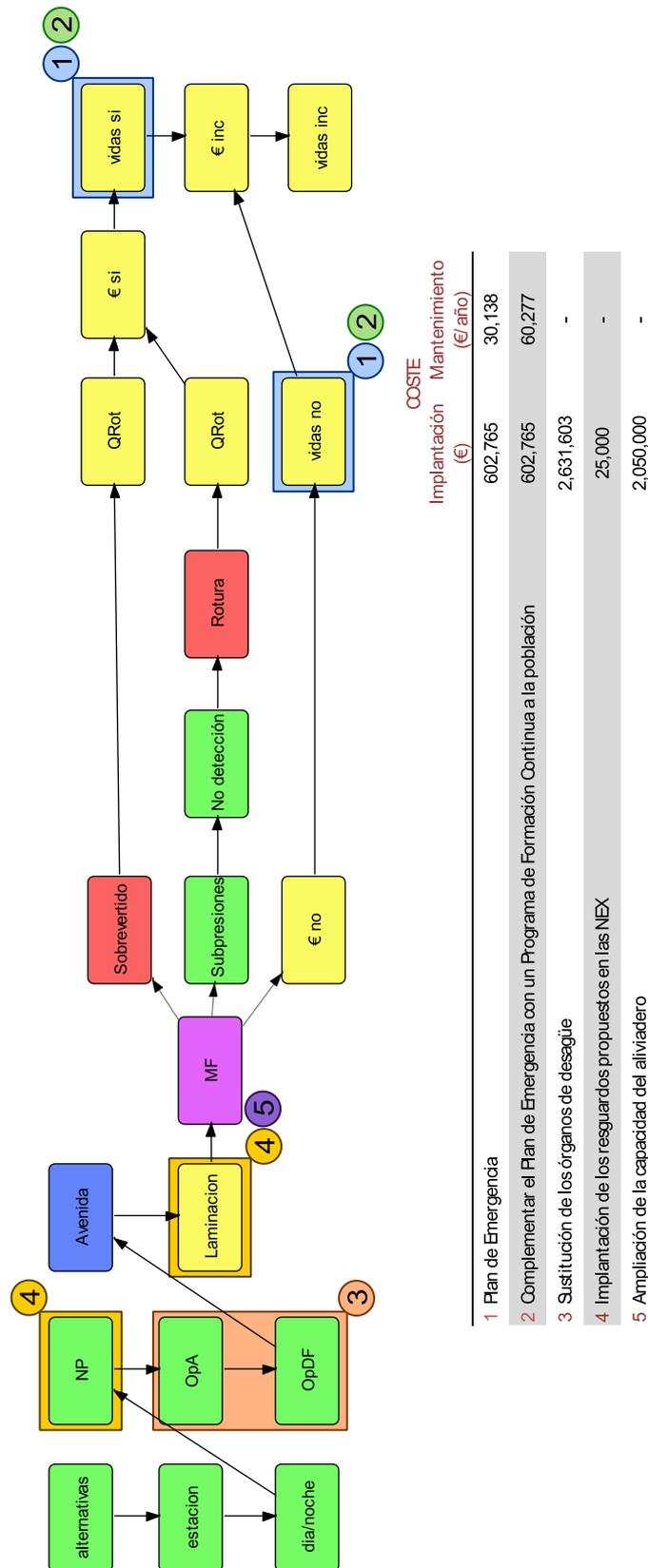


Figura 2.54: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medidas de reducción de riesgo planteadas en la presa O.

A2.17 Medidas en la presa P

A2.17.1 Alternativa 1: Implantación del Plan de Emergencia

Esta mejora consiste en la implantación del Plan de Emergencia de la presa P, que conlleva la mejora de los procedimientos de actuación ante emergencias y una mejor comunicación del peligro a la población a través de sistemas de aviso.

En este caso, esta medida afecta a la pérdida de vidas en los casos de rotura y de no rotura de la presa.

Para incluir el efecto de esta medida dentro del modelo de riesgo, se ha calculado de nuevo la pérdida de vidas utilizando el método de Graham. Dentro del proyecto europeo SUFRI [10], las tasas de este método se han adaptado para poder estudiar diferentes grados de entendimiento de la severidad de la inundación en función de los sistemas de aviso, la existencia o no de un Plan de Emergencia y la coordinación entre los servicios de emergencia y la formación de la población.

El coste de implantación de esta medida es de 482,172 €, según el Proyecto de Implantación del Plan de Emergencia. Además, el coste anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en un 5% del valor de implantación, resultando en 24,109 €.

En la Figura 2.55 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

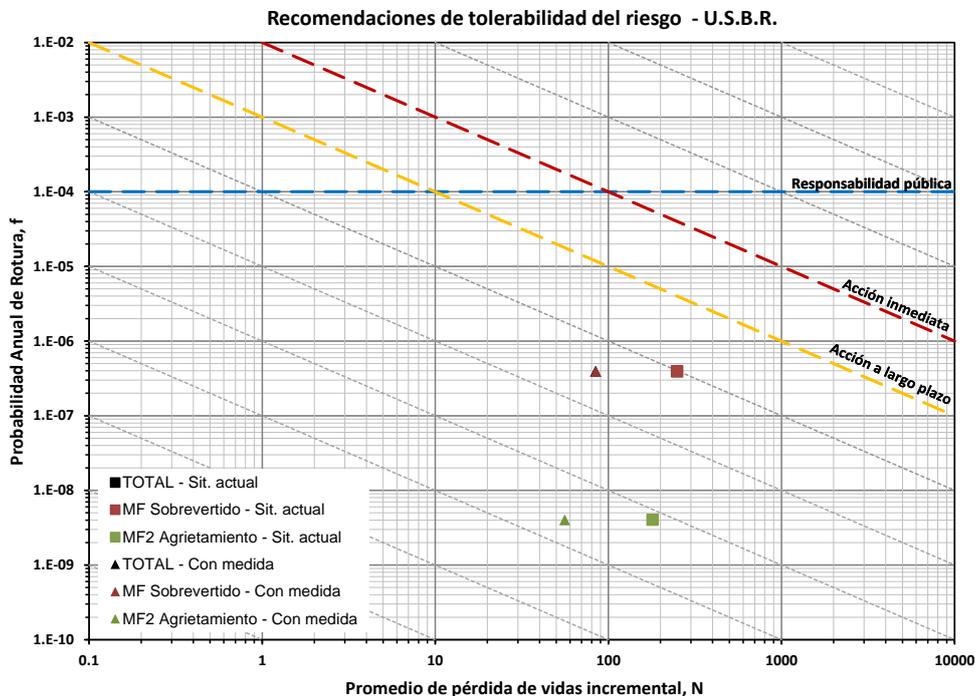


Figura 2.55: Efecto de la implementación del Plan de Emergencia sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, el Plan de Emergencia no modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia reduce el riesgo en vidas al 34% del riesgo original.

A2.17.2 Alternativa 2: Complementar el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua a la población

Esta alternativa consiste en complementar la implantación del Plan de Emergencia de la Presa P con un Programa de Formación Continua a la población aguas abajo de la presa, con el fin de que ésta conozca perfectamente los procedimientos a seguir y los lugares de refugio a los que deben acudir en el caso de rotura de la presa. Para ello, es necesario un programa de formación continua a la población, incluyendo simulacros, y un funcionamiento eficaz de los medios de comunicación a la población en estos casos y de los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad, con el fin de reducir la pérdida de vidas lo máximo posible.

Como la alternativa anterior, esta alternativa afecta únicamente a la pérdida de vidas. Por ello, los cálculos de pérdida de vidas utilizando el método de Graham se han vuelto a realizar con nuevas tasas de mortalidad que incluyen esta mayor formación de la población. En este caso, dentro de las diez categorías desarrolladas en la metodología del proyecto SUFRI para aplicar el método de Graham se ha elegido la categoría 10, que comprende la situación con una mayor formación de la población.

El coste de implantación de esta alternativa es el mismo que en la alternativa 1. El coste aproximado anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto como el doble del coste de mantenimiento del Plan de Emergencia de la alternativa 1, ya que es necesario un mayor número de recursos y de personal para formar correctamente a la población. Por lo tanto, el coste anual de esta medida es de 48,217 €.

En la Figura 2.56 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

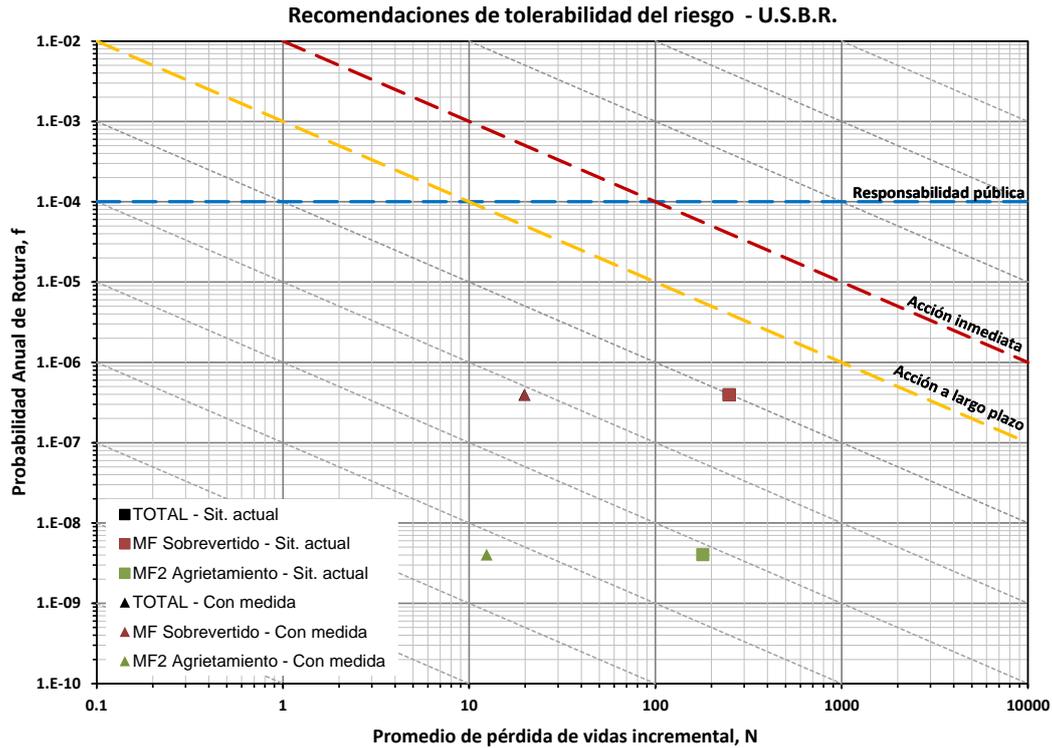


Figura 2.56: Efecto de la implementación del PEP con un Programa de Formación Continua sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, esta medida tampoco modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua reduce el riesgo en vidas al 8% del riesgo original.

A2.17.3 Alternativa 3: Inyección en las juntas horizontales

Esa medida se ha definido a partir de las inyecciones previstas en el Proyecto de Adecuación al Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses. El objetivo de estas inyecciones es disminuir las filtraciones por estas juntas y evitar el agrietamiento térmico en la zona de los estribos. De esta forma se consigue disminuir la probabilidad de que se desarrolle el modo de fallo por agrietamiento térmico.

Por lo tanto, esta medida consiste en la realización de inyecciones en las juntas horizontales del cuerpo de presa con resinas tipo epoxi en la zona limitada entre el paramento de aguas arriba y la galería correspondiente. La mayor parte de estas inyecciones corresponden a la galería superior.

Esta alternativa afecta al modo de fallo por agrietamiento térmico en el cuerpo de presa y formación de inestabilidad. El efecto estimado sobre los nodos que componen el modo de fallo es:

- **Nodo formación de fisuras:** La realización de inyecciones disminuye considerablemente la probabilidad de que se produzcan y aumenten las fisuras por agrietamiento térmico del cuerpo de presa. Cómo esta medida afecta directamente al proceso principal de este nodo, la probabilidad se ha disminuido un orden de magnitud, pasando de 1.58% a 0.158%.
- **Nodo agrietamiento del cuerpo de presa:** La realización de inyecciones disminuye considerablemente la probabilidad de que se agriete el cuerpo de presa a partir de la fisuración térmica. Cómo esta medida afecta directamente al proceso principal de este nodo, la probabilidad se ha disminuido un orden de magnitud, pasando de 0.75% a 0.075%.

El coste de implantación de esta medida se encuentra en el Proyecto Adecuación al Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses. Este coste es de 245,017 €.

En la Figura 2.57 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

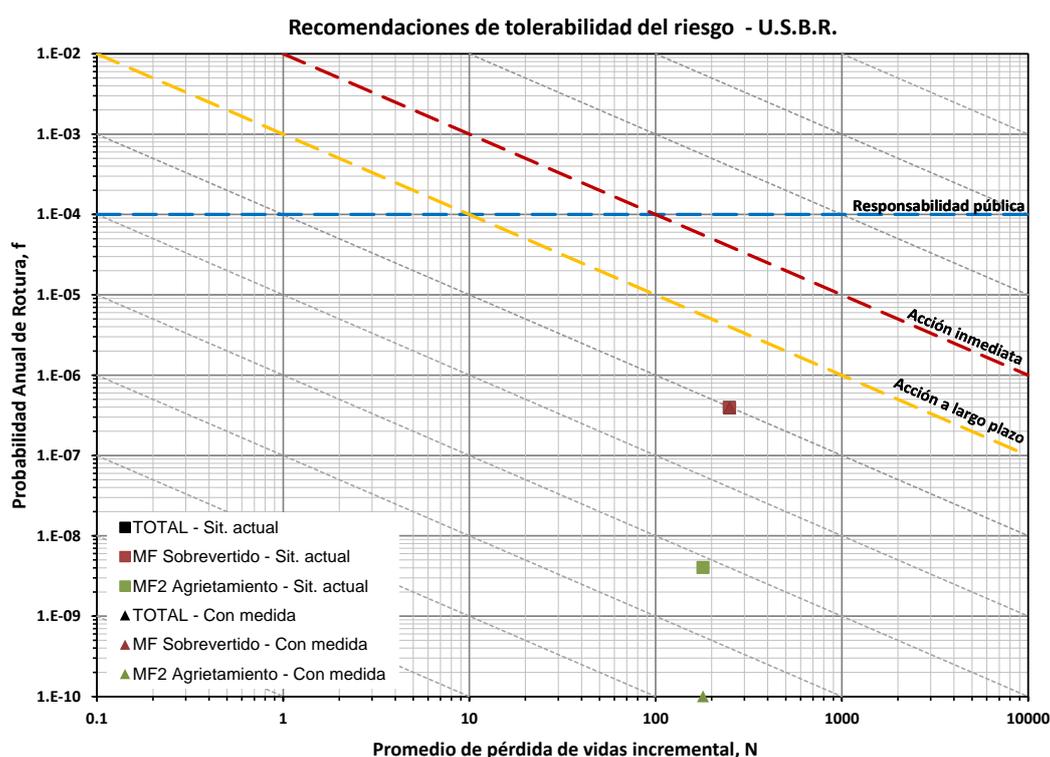


Figura 2.57: Efecto de las inyecciones en las juntas horizontales sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida tiene un efecto importante sobre el modo de fallo al que afecta, fallo por agrietamiento térmico, disminuyendo su probabilidad de fallo en dos órdenes de magnitud. Aunque cómo la probabilidad de este modo de fallo respecto al sobrevertido es muy baja, el efecto de esta medida sobre el riesgo total de la presa es muy bajo también.

A2.17.4 Resumen

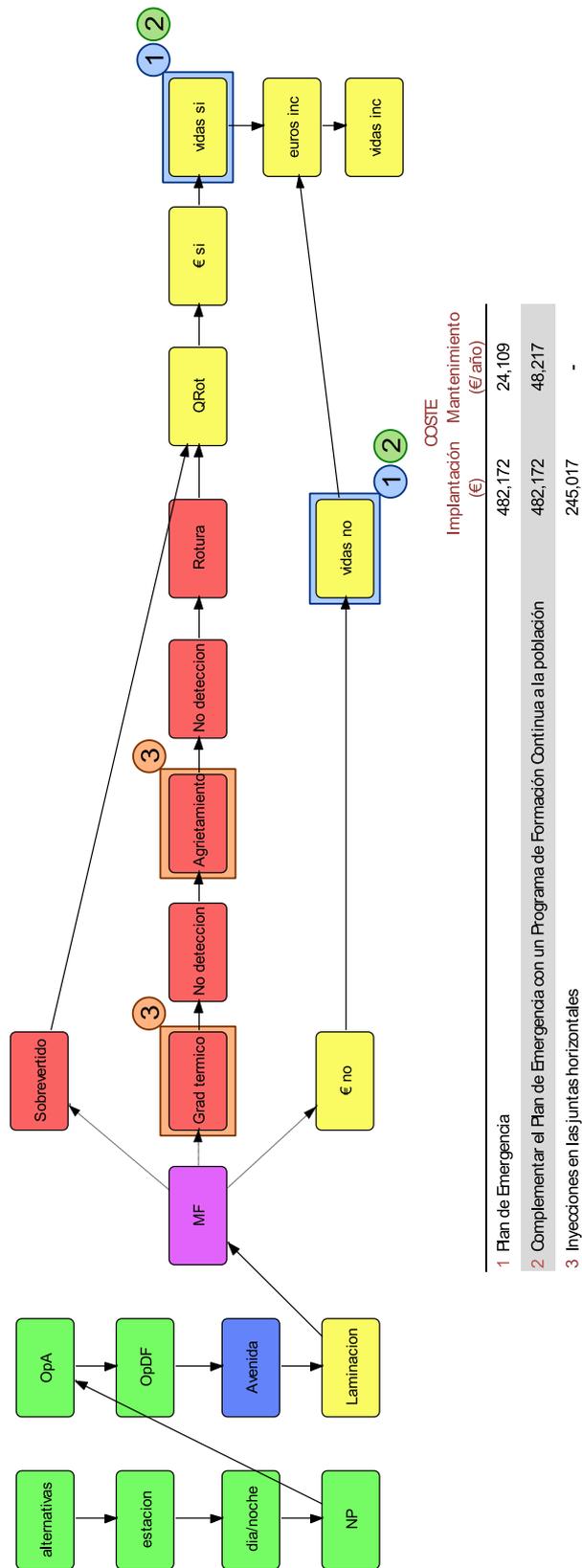


Figura 2.58: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medidas de reducción de riesgo planteadas en la presa P.

A2.18 Medidas en la presa Q

A2.18.1 Alternativa 1: Implantación del plan de emergencia

Esta mejora consiste en la implantación del Plan de Emergencia de la presa Q, que conlleva la mejora de los procedimientos de actuación ante emergencias y una mejor comunicación del peligro a la población a través de sistemas de aviso. Estas medidas permiten la reducción de la pérdida de vidas humanas provocada por la rotura de la presa, por lo que afectan a los nodos de pérdida de vidas del modelo.

Para incluir el efecto de esta medida dentro del modelo de riesgo, se ha calculado de nuevo la pérdida de vidas modificando el método de Graham de igual forma que en las presas anteriores.

El coste aproximado de la implantación de esta alternativa es de 880,524 € con un IVA del 18%. Además, el coste anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en un 5% del valor de implantación, resultando en 44,026 €.

En la Figura 2.59 se muestra el efecto de esta medida sobre el riesgo de la presa.

A2.18.2 Alternativa 2: Complementar el plan de emergencia con un programa de formación continua a la población

Esta alternativa consiste en complementar la implantación del Plan de Emergencia de la Presa Q con un programa de formación continua a la población aguas abajo de la presa, con el fin de que ésta conozca perfectamente los procedimientos a seguir y los lugares de refugio a los que deben acudir en el caso de rotura de la presa. Para ello, es necesario un programa de formación continua a la población, incluyendo simulacros, y un funcionamiento eficaz de los medios de comunicación a la población en estos casos y de los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad, con el fin de reducir la pérdida de vidas lo máximo posible.

Como la alternativa anterior, esta alternativa afecta únicamente a la pérdida de vidas. Por ello, se han vuelto a realizar los cálculos de pérdida de vidas utilizando el método de Graham, con nuevas tasas de mortalidad que incluyen esta mayor formación de la población.

El coste de implantación de esta alternativa es el mismo que en la alternativa 1. El coste aproximado anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto como el doble del coste de mantenimiento del Plan de Emergencia de la alternativa 1, ya que es necesario un mayor número de recursos y de personal para formar correctamente a la población. Por lo tanto, el coste anual de esta medida es de 88,052 €.

En la Figura 2.59 se muestra el efecto de esta medida sobre el riesgo de la presa.

A2.18.3 Alternativa 3: Implantación de resguardos según la Primera Revisión de Seguridad

Esta alternativa consiste en una disminución del Nivel Máximo Normal (NMN) en la presa según las recomendaciones de la Primera Revisión de Seguridad de la presa Q para tener un resguardo suficiente en el embalse que permita la laminación de las avenidas. En este documento se propuso como NMN para la explotación el máximo nivel que satisface las condiciones marcadas por el Reglamento de 1996 y la Guía Técnica nº4:

- Partiendo del Nivel Máximo Normal, la presa es capaz de evacuar una Avenida de Proyecto de periodo de retorno 1.000 años funcionando correctamente los órganos de desagüe.
- Partiendo del Nivel Máximo Normal, la presa es capaz de evacuar una Avenida Extrema de periodo de retorno 5.000 años sin provocar un vertido por coronación.
- El Resguardo Normal, relativo al (NMN), además de ser suficiente para el desagüe de avenidas, es igual o superior a las sobre elevaciones producidas por los oleajes máximos.

La disminución del NMN produce en primer lugar, una modificación en las curvas de probabilidad de excedencia de niveles previos. Estas curvas se han truncado en el nuevo NMN, ya que si la presa se opera según este resguardo, no debe haber un nivel previo superior a él.

Además, como en la alternativa anterior, esta modificación también afecta a la laminación de la presa, ya que se los niveles máximos alcanzados en el embalse sean inferiores.

Para estimar las consecuencias económicas por disminución de las garantías de las demandas de agua satisfechas por el embalse que puede tener esta alternativa se ha utilizado, un modelo de simulación del sistema de recursos hídricos, mediante el software AQUATOOL [28]. El resultado de este análisis es que estos resguardos no afectan a las demandas y por lo tanto, no tienen un coste económico.

En la Figura 2.59 se muestra el efecto de esta medida sobre el riesgo de la presa.

A2.18.4 Alternativa 4: Refuerzo del pretil de coronación de la presa

Esta alternativa consiste en reforzar y realizar un mantenimiento del pretil situado en la coronación de la Presa Q con el fin de que tenga suficiente fuerza para resistir el empuje del agua y por lo tanto, no permita que se produzca sobrevertido hasta que el agua pase por encima de él.

Esta alternativa modifica el modelo de riesgo al cambiar el nivel de coronación, ya que el pretil tiene 1.2 metros de altura. Por lo tanto, al aplicar esta alternativa se considera que se produce sobrevertido únicamente cuando el agua sobrepasa el nivel del pretil, calculando la probabilidad de rotura por sobrevertido a partir de este nivel.

Además, se ha comprobado que la carga que introduce el incremento en el nivel de agua por el refuerzo del pretil no produce una probabilidad de deslizamiento significativa en la presa.

El coste de reparación del pretil se ha estimado realizando un presupuesto estimativo con las diferentes unidades de obra. En este presupuesto se estima el coste de construcción de un muro de hormigón armado de las dimensiones de este pretil. En total se ha obtenido un coste de implantación de 162,350 €.

En la Figura 2.59 se muestra el efecto de esta medida sobre el riesgo de la presa.

A2.18.5 Alternativa 5: Rehabilitación del desagüe de fondo

En esta alternativa se estudia el efecto de realizar una mejora del desagüe de fondo sobre el riesgo de la presa, ya que es una de las medidas previstas para mejorar la presa Q. De esta forma, se puede estudiar si la fiabilidad de este órgano de desagüe tiene un papel importante en la seguridad de la presa.

Para modelar esta rehabilitación se ha mejorado la fiabilidad del desagüe de fondo introducida en el modelo, pasando del 75% en el caso base al 95%, que entra dentro del rango de valores habituales para este tipo de desagües cuando se encuentran en buenas condiciones y con un alto mantenimiento.

El coste de la mejora del desagüe de fondo se ha estimado en 116,807 € con un IVA del 18%, según lo estimado en el Presupuesto de Ejecución Material del desmontaje y acondicionamiento de los desagües de fondo de la presa Q.

En la Figura 2.59 se muestra el efecto de esta medida sobre el riesgo de la presa.

Recomendaciones de tolerabilidad del riesgo - U.S.B.R.

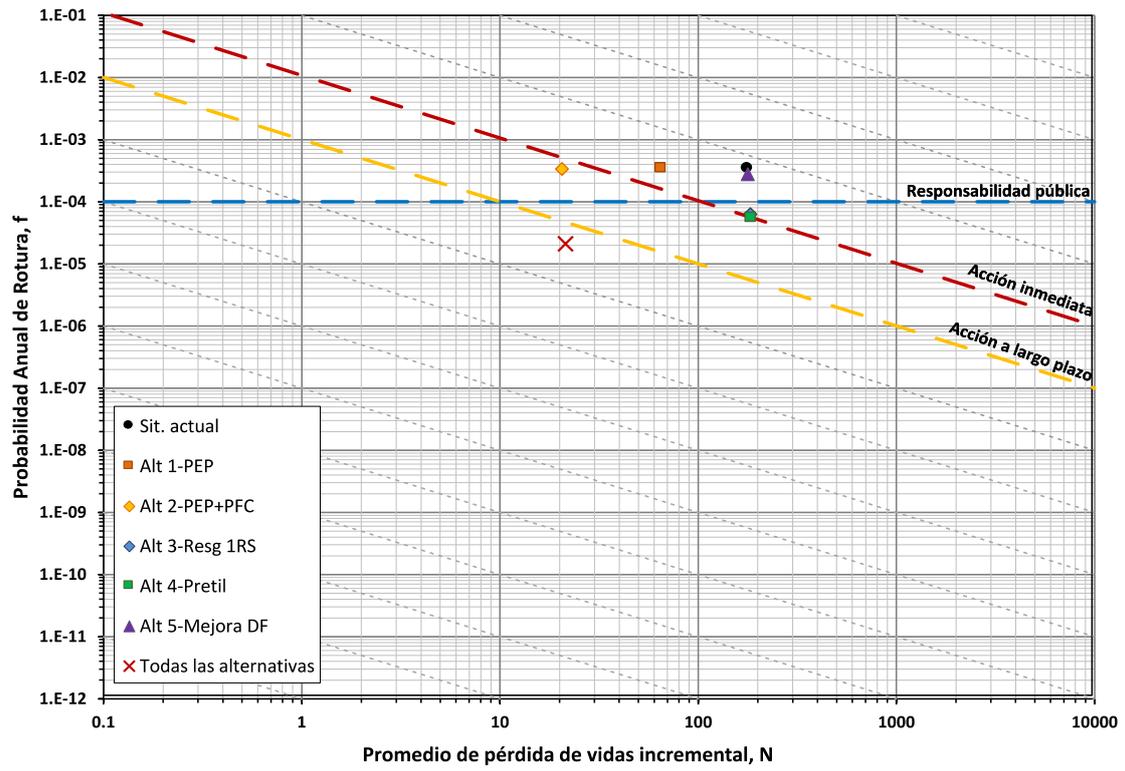


Figura 2.59: Efecto de las medidas en la presa Q sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

A2.18.6 Resumen

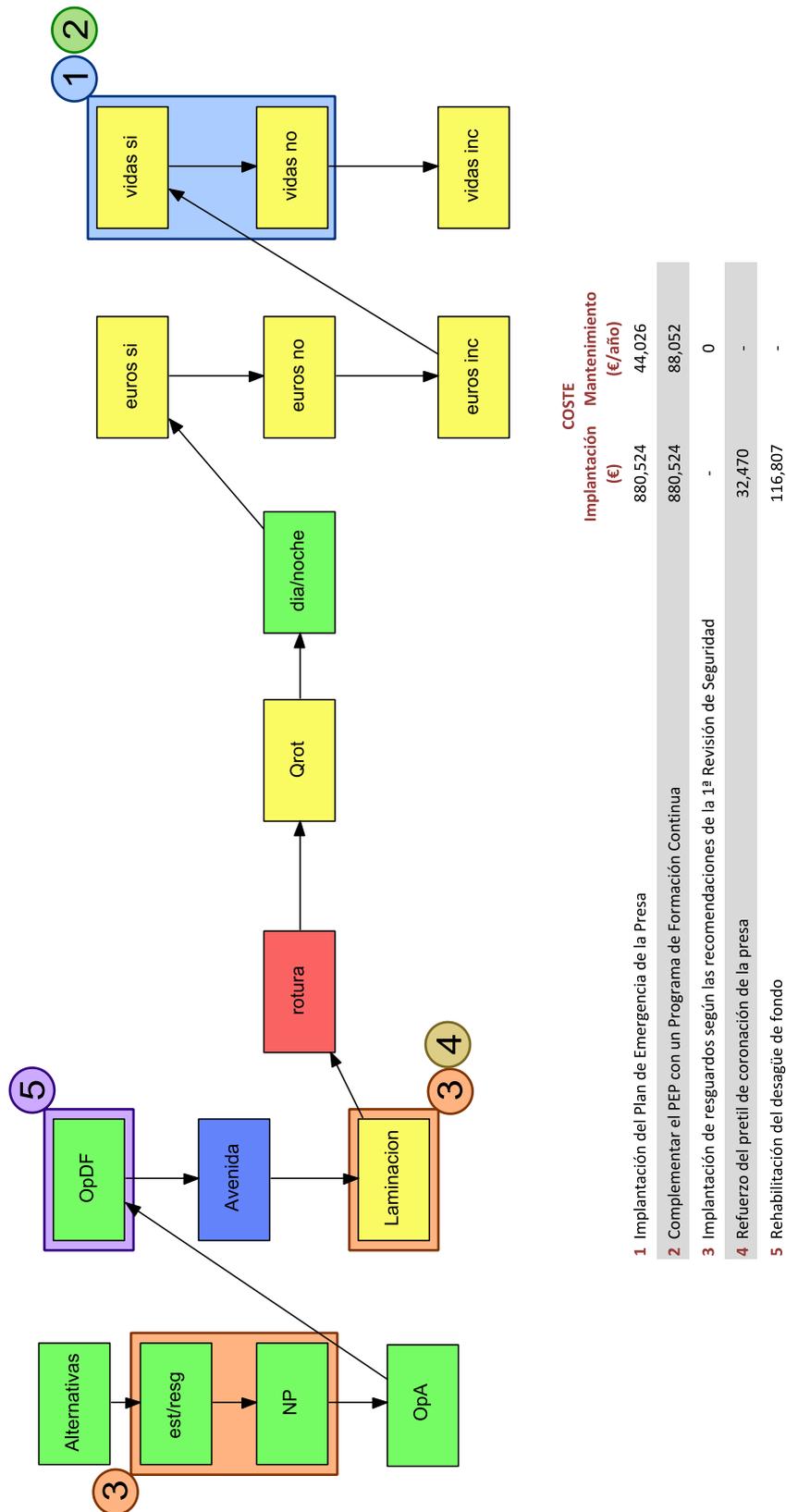


Figura 2.60: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medidas de reducción de riesgo planteadas en la presa Q.

A2.19 Medidas en la presa R

A2.19.1 Alternativa 1: Implantación del Plan de Emergencia

Esta mejora consiste en la implantación del Plan de Emergencia de la presa R, que conlleva la mejora de los procedimientos de actuación ante emergencias y una mejor comunicación del peligro a la población a través de sistemas de aviso.

En este caso, esta medida afecta a la pérdida de vidas en los casos de rotura y de no rotura de la presa.

Para incluir el efecto de esta medida dentro del modelo de riesgo, se ha calculado de nuevo la pérdida de vidas utilizando el método de Graham. Dentro del proyecto europeo SUFRI [10], las tasas de este método se han adaptado para poder estudiar diferentes grados de entendimiento de la severidad de la inundación en función de los sistemas de aviso, la existencia o no de un Plan de Emergencia y la coordinación entre los servicios de emergencia y la formación de la población.

El coste de implantación de esta medida es de 807,361 €, según el Proyecto de Implantación del Plan de Emergencia. Además, el coste anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en un 5% del valor de implantación, resultando en 40,381 €.

En la Figura 2.61 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

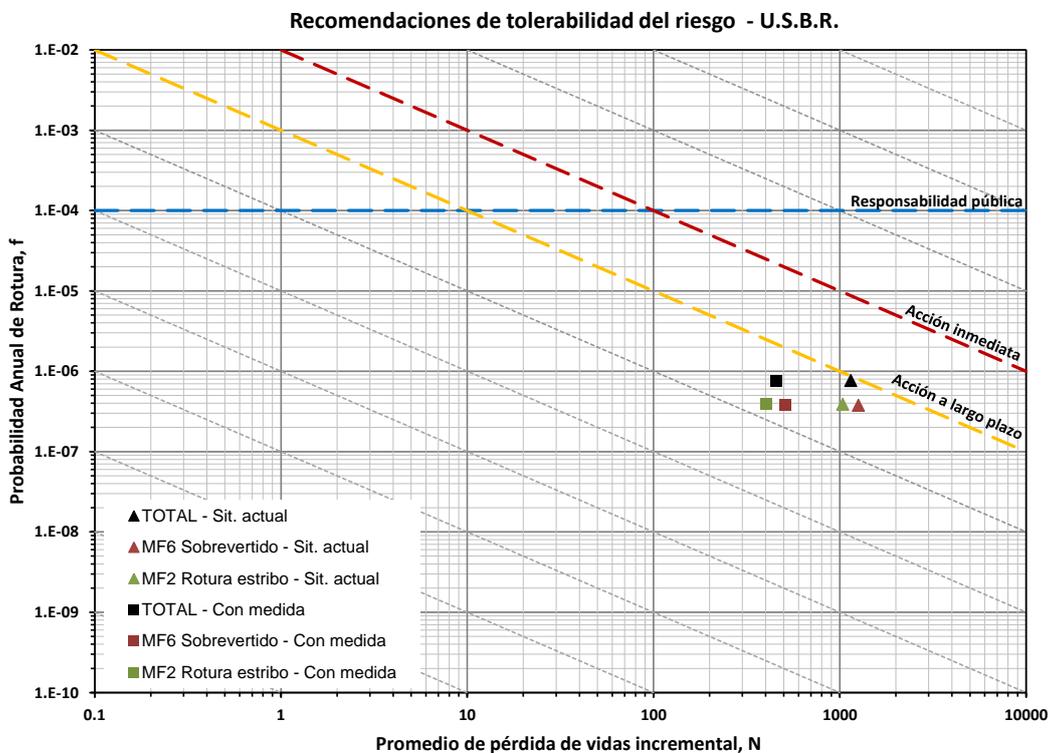


Figura 2.61: Efecto de la implementación del Plan de Emergencia sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, el Plan de Emergencia no modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia reduce el riesgo en vidas al 40% del riesgo original.

A2.19.2 Alternativa 2: Complementar el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua a la población

Esta alternativa consiste en complementar la implantación del Plan de Emergencia de la Presa R con un Programa de Formación Continua a la población aguas abajo de la presa, con el fin de que ésta conozca perfectamente los procedimientos a seguir y los lugares de refugio a los que deben acudir en el caso de rotura de la presa. Para ello, es necesario un programa de formación continua a la población, incluyendo simulacros, y un funcionamiento eficaz de los medios de comunicación a la población en estos casos y de los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad, con el fin de reducir la pérdida de vidas lo máximo posible.

Como la alternativa anterior, esta alternativa afecta únicamente a la pérdida de vidas. Por ello, los cálculos de pérdida de vidas realizados utilizando el método de Graham se han vuelto a realizar con nuevas tasas de mortalidad que incluyen esta mayor formación de la población.

El coste de implantación de esta alternativa es el mismo que en la alternativa 1. El coste aproximado anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto como el doble del coste de mantenimiento del Plan de Emergencia de la alternativa 1, ya que es necesario un mayor número de recursos y de personal para formar correctamente a la población. Por lo tanto, el coste anual de esta medida es de 80,763 €.

En la Figura 2.62 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

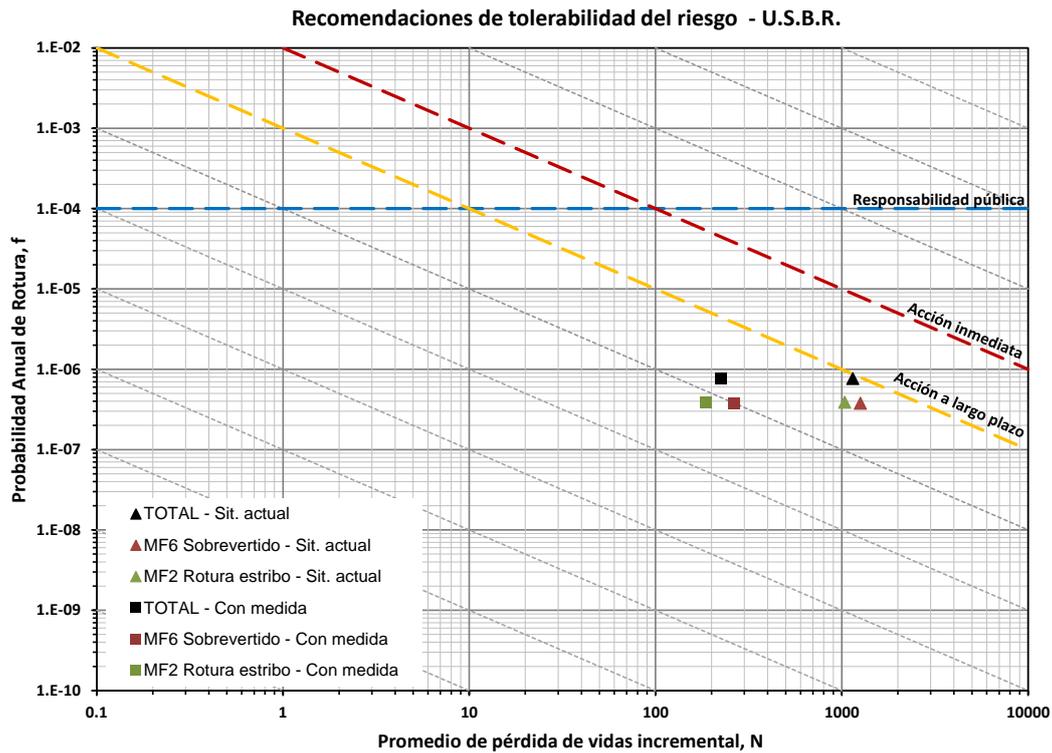


Figura 2.62: Efecto de la implementación del PEP con un Programa de Formación Continua sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, esta medida tampoco modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua reduce el riesgo en vidas al 20% del riesgo original.

A2.19.3 Alternativa 3: Mejora de la auscultación del estribo izquierdo

Esta medida surge del Informe de Identificación de Modos de Fallo. El objetivo de esta medida es mejorar la auscultación del estribo izquierdo de la presa para tener un mejor conocimiento de su comportamiento y así, poder reducir la probabilidad de fallo del modo de fallo por rotura de este estribo. Esta mejora de la auscultación consiste en la instalación en el estribo izquierdo de:

- Piezómetros de cuerda vibrante.
- Extensómetros de varilla.
- Aforador de filtraciones.

El efecto de esta medida sobre los nodos del modo de fallo de rotura por el estribo izquierdo ha sido introducido de la siguiente forma:

- Nodo de no detección o no intervención inicial: La probabilidad de este nodo se ve reducida a un tercio por la implantación de un sistema de auscultación en el estribo. Esta probabilidad pasa de 24.9% a 8.3%.
- Nodo de no detección o no intervención previa a la rotura: Nodo de no detección o no intervención inicial: La probabilidad de este nodo se ve reducida a un tercio por la implantación de un sistema de auscultación en el estribo. Esta probabilidad pasa de 22.2% a 7.4%.

El coste de implantación de esta medida ha sido estimado mediante un presupuesto estimativo de las obras a realizar y de los equipos necesarios. El coste obtenido es de 80,000 €.

En la Figura 2.64 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

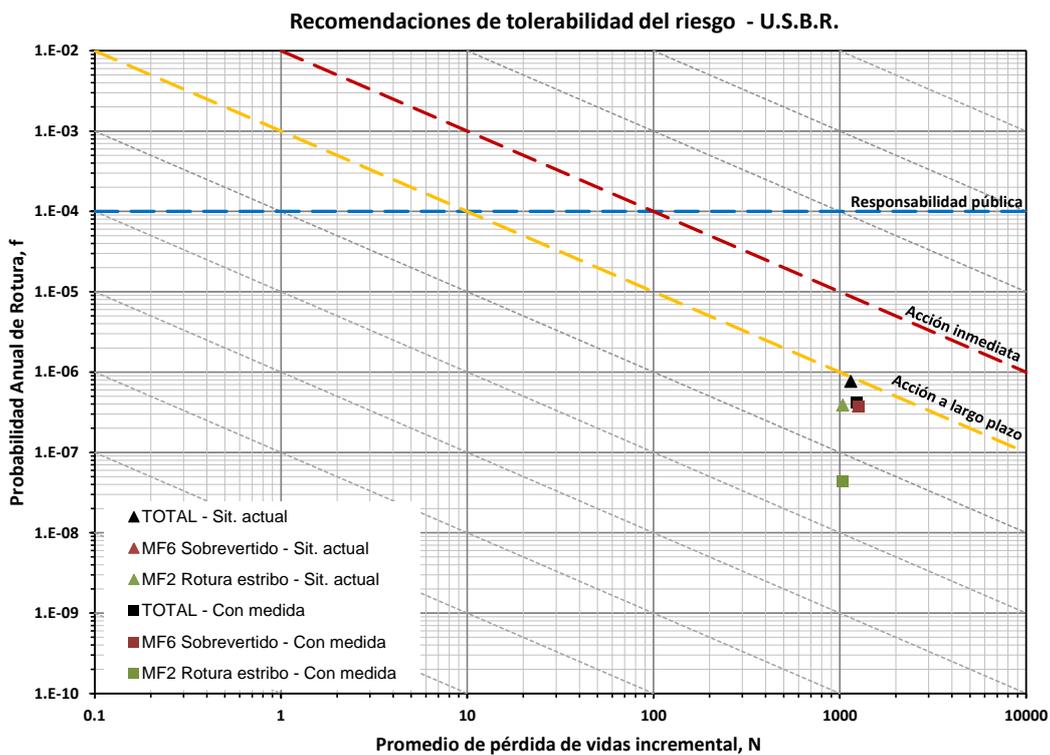


Figura 2.63: Efecto de la mejora de las compuertas sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida tiene un efecto importante sobre el modo de fallo de rotura del estribo izquierdo, ya que reduce de forma importante su probabilidad de fallo. Este hecho también reduce la probabilidad de fallo en la presa, pasando el modo de fallo por sobrevvertido a ser el dominante.

A2.19.4 Alternativa 4: Instalación de un nuevo grupo electrógeno

Esta medida ya ha sido proyectada y está prevista su implantación en un futuro próximo. El objetivo de instalar un nuevo grupo electrógeno es asegurar suministro eléctrico para la operación de las compuertas del aliviadero, ya que el actual grupo electrógeno ha fallado en algunas ocasiones.

Debido a que el suministro electrónico es el principal problema de fiabilidad de estas compuertas, una mejora en este suministro supone una importante mejora también en su fiabilidad. Por este motivo, se ha considerado que esta medida produce una mejora en la fiabilidad individual de las compuertas del 85% al 95%. El coste de esta medida según el proyecto de implantación es de 53,138 €.

En la Figura 2.64 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

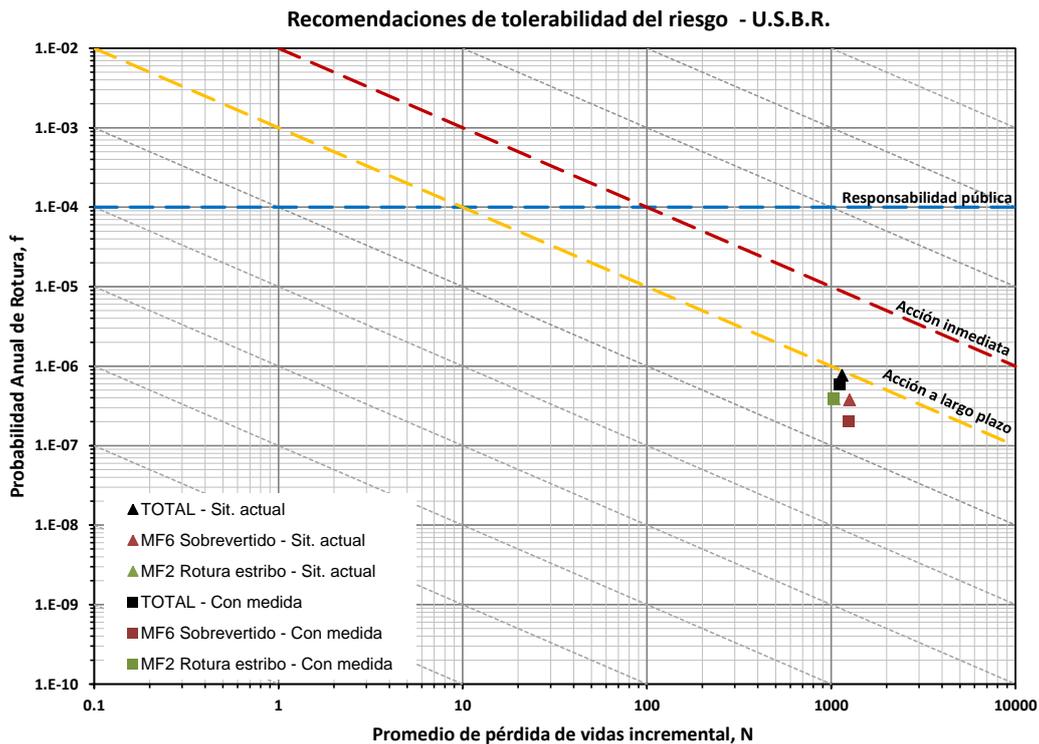


Figura 2.64: Efecto de la mejora de las compuertas sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida tiene un efecto importante sobre los dos modos de fallo, ya que una mejora de la fiabilidad del aliviadero reduce la probabilidad de alcanzar niveles muy altos en el embalse.

A2.19.5 Resumen

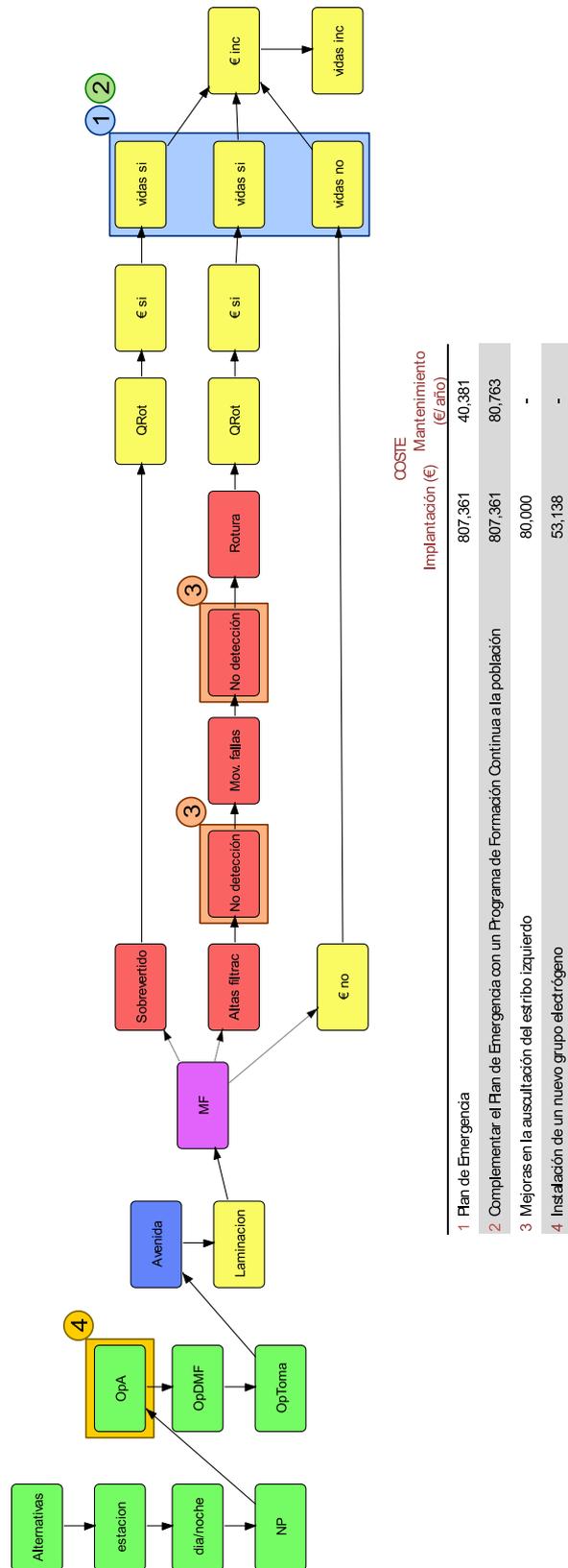


Figura 2.65: Efecto Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medidas de reducción de riesgo planteadas en la presa R.

A2.20 Medidas en la presa S

A2.20.1 Alternativa 1: Implantación del Plan de Emergencia

Esta mejora consiste en la implantación del Plan de Emergencia de la presa S, que conlleva la mejora de los procedimientos de actuación ante emergencias y una mejor comunicación del peligro a la población a través de sistemas de aviso.

En este caso, esta medida afecta a la pérdida de vidas en los casos de rotura y de no rotura de la presa.

Para incluir el efecto de esta medida dentro del modelo de riesgo, se ha calculado de nuevo la pérdida de vidas utilizando el método de Graham. Dentro del proyecto europeo SUFRI [10], las tasas de este método se han adaptado para poder estudiar diferentes grados de entendimiento de la severidad de la inundación en función de los sistemas de aviso, la existencia o no de un Plan de Emergencia y la coordinación entre los servicios de emergencia y la formación de la población.

Los cálculos de consecuencias se han repetido aplicando estas nuevas tasas de mortalidad. En esta presa no se ha obtenido una pérdida de vidas significativa, por lo que esta medida no tiene efecto sobre los datos introducidos en el modelo de riesgo.

El coste de implantación de esta medida ha sido obtenido según el coste de esta medida en presas similares, obteniendo un resultado de 350,000 €. Además, el coste anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en un 5% del valor de implantación, resultando en 17,500 €.

A2.20.2 Alternativa 2: Complementar el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua a la población

Esta alternativa consiste en complementar la implantación del Plan de Emergencia de la Presa S con un Programa de Formación Continua a la población aguas abajo de la presa, con el fin de que ésta conozca perfectamente los procedimientos a seguir y los lugares de refugio a los que deben acudir en el caso de rotura de la presa. Para ello, es necesario un programa de formación continua a la población, incluyendo simulacros, y un funcionamiento eficaz de los medios de comunicación a la población en estos casos y de los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad, con el fin de reducir la pérdida de vidas lo máximo posible.

Como la alternativa anterior, esta alternativa afecta únicamente a la pérdida de vidas. Por ello, los cálculos realizados de pérdida de vidas utilizando el método de Graham se han vuelto a realizar con nuevas tasas de mortalidad que incluyen esta mayor formación de la población.

Los cálculos de consecuencias se han repetido aplicando estas nuevas tasas de mortalidad. En esta presa no se ha obtenido una pérdida de vidas significativa, por lo que esta medida no tiene efecto sobre los datos introducidos en el modelo de riesgo.

El coste de implantación de esta alternativa es el mismo que en la alternativa 1. El coste aproximado anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto como el doble del coste de mantenimiento del Plan de Emergencia de la alternativa 1, ya que es necesario un mayor número de recursos y de personal para formar correctamente a la población. Por lo tanto, el coste anual de esta medida es de 35,000 €.

A2.20.3 Alternativa 3: Mejora del accionamiento del desagüe de fondo

Esa medida surge del Proyecto de Adecuación al Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses. El objetivo de estas inyecciones es disminuir las filtraciones por estas juntas y evitar el agrietamiento térmico en la zona de los estribos. De esta forma se consigue disminuir la probabilidad de que se desarrolle el modo de fallo por agrietamiento térmico. La medida propuesta consiste en:

- Sustitución de la central oleohidráulica existente.
- Renovación del armario eléctrico de control.

Esta alternativa se introduce en el modelo de riesgo considerando una mejora de la fiabilidad individual hasta el 95%.

El coste de implantación de esta medida se encuentra en el Proyecto Adecuación al Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses. Este coste es de 78,410 €.

A2.21 Medidas en la presa T

A2.21.1 Alternativa 1: Implantación del Plan de Emergencia

Esta mejora consiste en la implantación del Plan de Emergencia de la presa T, que conlleva la mejora de los procedimientos de actuación ante emergencias y una mejor comunicación del peligro a la población a través de sistemas de aviso.

En este caso, esta medida afecta a la pérdida de vidas en los casos de rotura y de no rotura de la presa.

Para incluir el efecto de esta medida dentro del modelo de riesgo, se ha calculado de nuevo la pérdida de vidas utilizando el método de Graham. Dentro del proyecto europeo SUFRI [10], las tasas de este método se han adaptado para poder estudiar diferentes grados de entendimiento de la severidad de la inundación en función de los sistemas de aviso, la existencia o no de un Plan de Emergencia y la coordinación entre los servicios de emergencia y la formación de la población.

El coste de implantación de esta medida es de 405,439 €, según el Proyecto de Implantación del Plan de Emergencia. Además, el coste anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en un 5% del valor de implantación, resultando en 20,272 €.

En la Figura 2.66 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

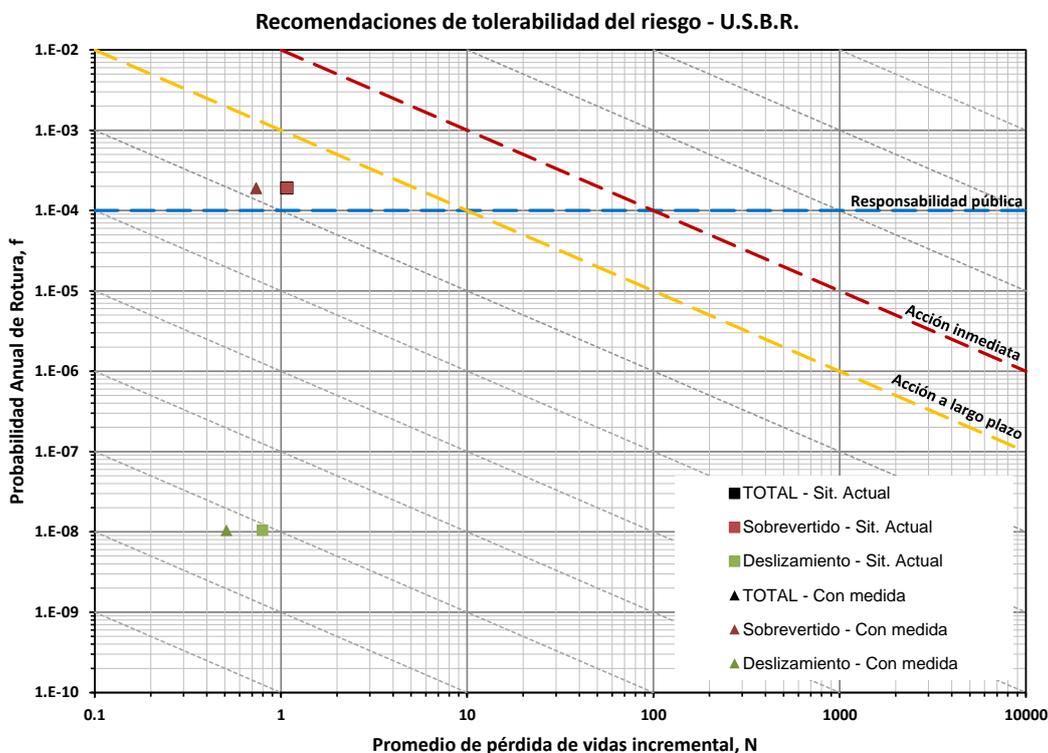


Figura 2.66: Efecto de la implementación del Plan de Emergencia sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, el Plan de Emergencia no modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia reduce el riesgo en vidas al 68% del riesgo original.

A2.21.2 Alternativa 2: Complementar el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua a la población

Esta alternativa consiste en complementar la implantación del Plan de Emergencia de la Presa T con un Programa de Formación Continua a la población aguas abajo de la presa, con el fin de que ésta conozca perfectamente los procedimientos a seguir y los lugares de refugio a los que deben acudir en el caso de rotura de la presa. Para ello, es necesario un programa de formación continua a la población, incluyendo simulacros, y un funcionamiento eficaz de los medios de comunicación a la población en estos casos y de los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad, con el fin de reducir la pérdida de vidas lo máximo posible.

El coste de implantación de esta alternativa es el mismo que en la alternativa 1. El coste aproximado anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto como el doble del coste de mantenimiento del Plan de Emergencia de la alternativa 1, ya que es necesario un mayor número de recursos y de personal para formar correctamente a la población. Por lo tanto, el coste anual de esta medida es de 40,544 €.

En la Figura 2.67 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

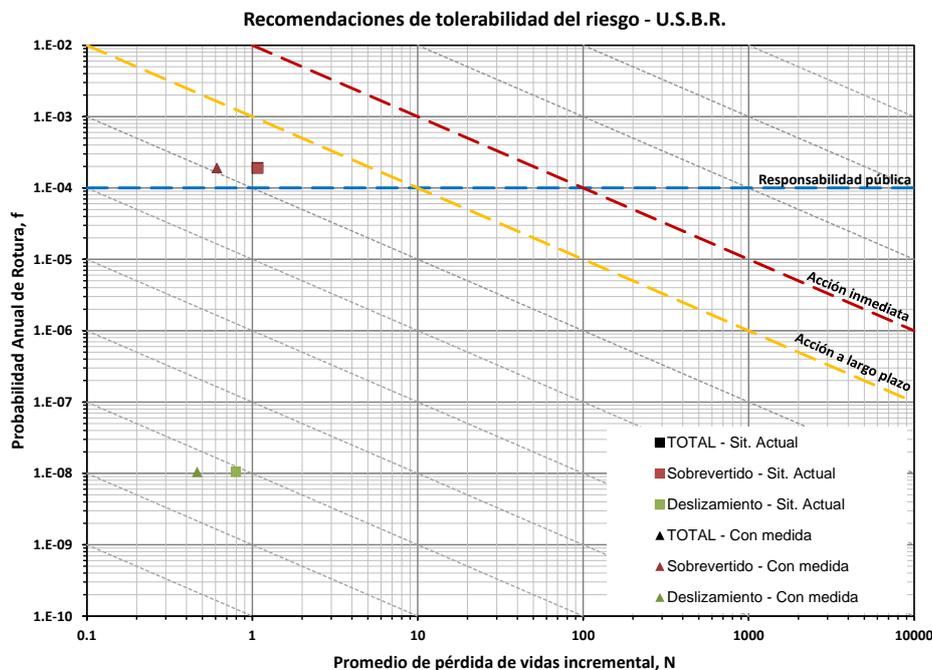


Figura 2.67: Efecto de la implementación del PEP con un Programa de Formación Continua sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, esta medida tampoco modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua reduce el riesgo en vidas al 57% del riesgo original.

A2.21.3 Alternativa 3: Instalación de un sistema de auscultación

Esta medida se encuentra prevista en el Proyecto de Adecuación al Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses. El objetivo de esta medida es mejorar la auscultación de la presa para tener un mejor conocimiento de su comportamiento y así, poder reducir su probabilidad de fallo. Esta mejora de la auscultación consiste en la instalación de:

- 9 Extensómetros de varillas.
- 6 piezómetros (2 piezómetros en 3 secciones de control).
- Sistema automático de adquisición de datos.

Esta mejora de auscultación permite un mayor conocimiento de la subpresiones bajo la presa, por lo que afecta al nodo de no detección y/o no intervención de altas subpresiones del modo de fallo por deslizamiento. Para considerar este efecto, se ha modificado la probabilidad de este nodo del 90% (ya que actualmente no hay ningún tipo de auscultación) al 20%.

El coste de implantación de esta medida según el citado proyecto es de 113,266 €.

En la Figura 2.68 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

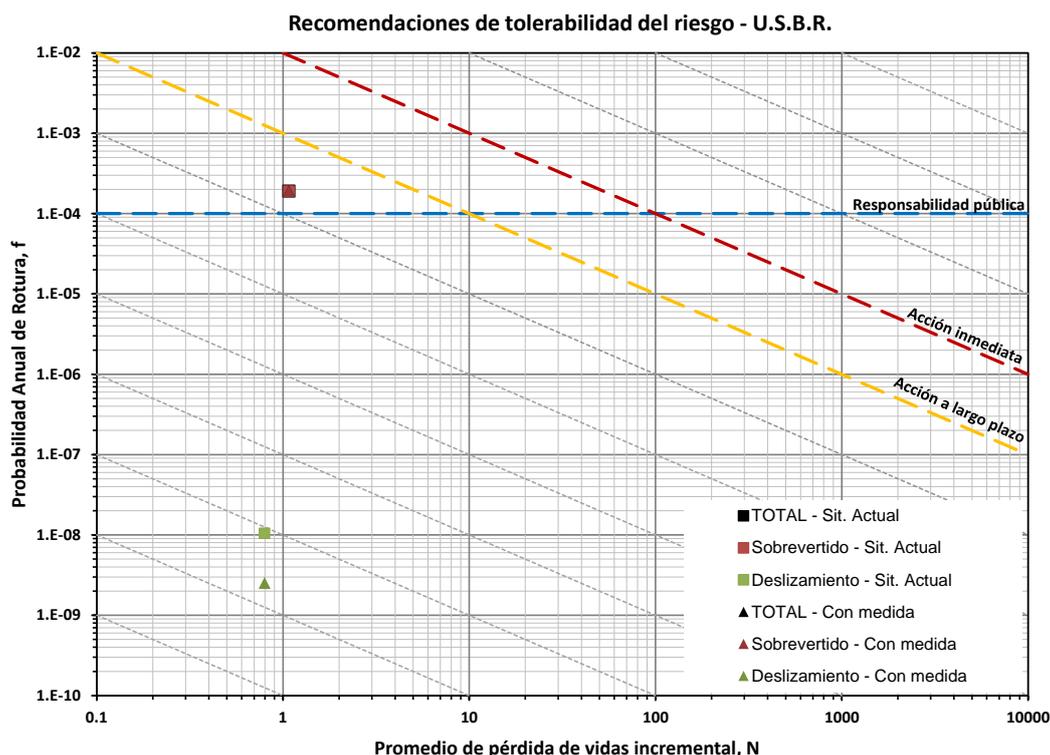


Figura 2.68: Efecto de la instalación de un sistema de auscultación sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida tiene un efecto importante sobre el modo de fallo por deslizamiento, ya que reduce de forma importante su probabilidad de fallo. Aunque la probabilidad de fallo total no varía significativamente al ser el sobrevvertido el modo de fallo predominante en la presa.

A2.21.4 Alternativa 4: Aumento de la capacidad de desagüe

Tras analizar los resultados obtenidos en la laminación, se ha observado que una forma adecuada de reducir el riesgo en esta presa puede ser aumentar la capacidad de alivio, de forma que se reduzcan los niveles alcanzados en el embalse.

Como ejemplo de una de las posibles maneras en que se podía lograr este objetivo y sin que ello implique que se hayan descartado otras opciones, se ha propuesto un rebaje de la cota del aliviadero. No se ha hecho ningún estudio hidráulico que confirme la viabilidad de esta forma de obtener un aumento de capacidad de alivio, por lo tanto en caso de optarse por esta medida, debería estudiarse en detalle y realizar una comparación con otras opciones de aumento de capacidad de desagüe.

El aliviadero de la presa T dispone de ocho vanos, pero esta medida ha sido planteada tan solo en siete vanos, ya que uno de ellos está actualmente previsto que sea sustituido por un desagüe de fondo. Además, también se incluye la sustitución de las compuertas en estos vanos, ya que deben reajustarse al nuevo perfil del aliviadero.

Esta medida afecta principalmente al nodo de laminación de las avenidas, ya que se modifican las curvas de gasto del aliviadero, ya que empiezan a verte para un nivel

más bajo. Además, también se ha incluido un nuevo nodo en el modelo (OpA rebaj), para incluir los nuevos valores de operatividad con siete vanos rebajados. El valor de la fiabilidad individual es 95%, ya que se instalarían nuevas compuertas.

El coste de implantación de esta medida ha sido estimado mediante un presupuesto estimativo de las obras a realizar y de los equipos necesarios. El coste obtenido es de 3,573,379 €.

En la Figura 2.69 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

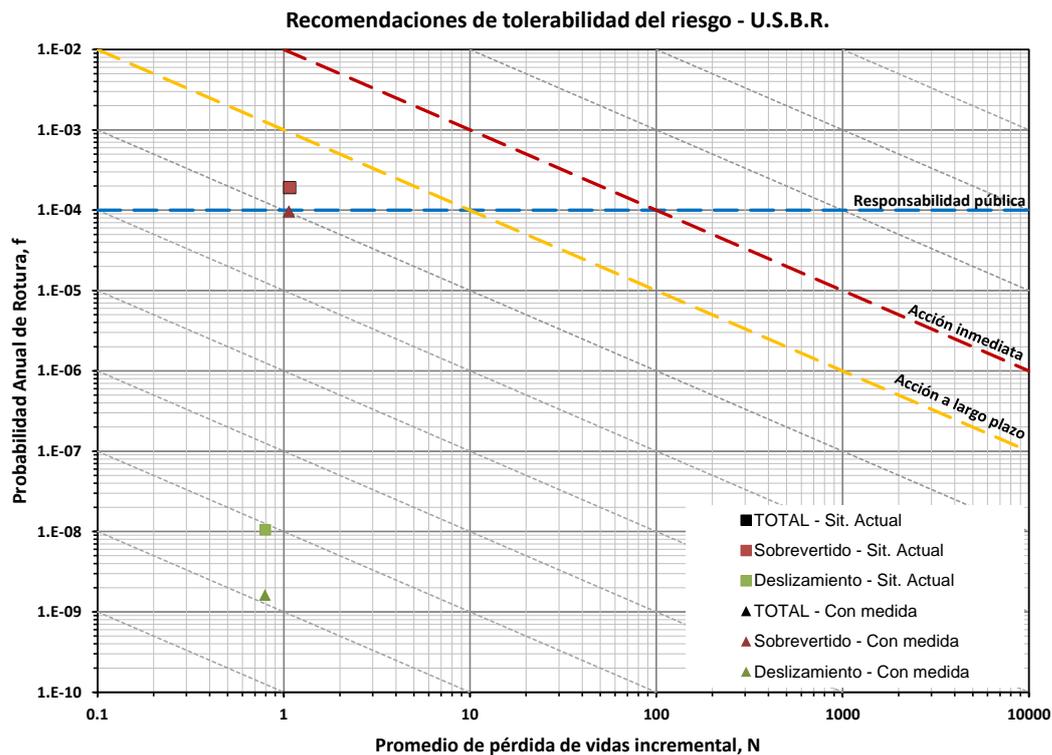


Figura 2.69: Efecto del aumento de la capacidad del aliviadero en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida tiene un efecto sobre los dos modos de fallo, ya que el aumento de la capacidad del aliviadero reduce la probabilidad de alcanzar niveles muy altos en el embalse, por lo que se reduce de forma significativa la probabilidad de sobrevertido y deslizamiento.

A2.21.5 Resumen

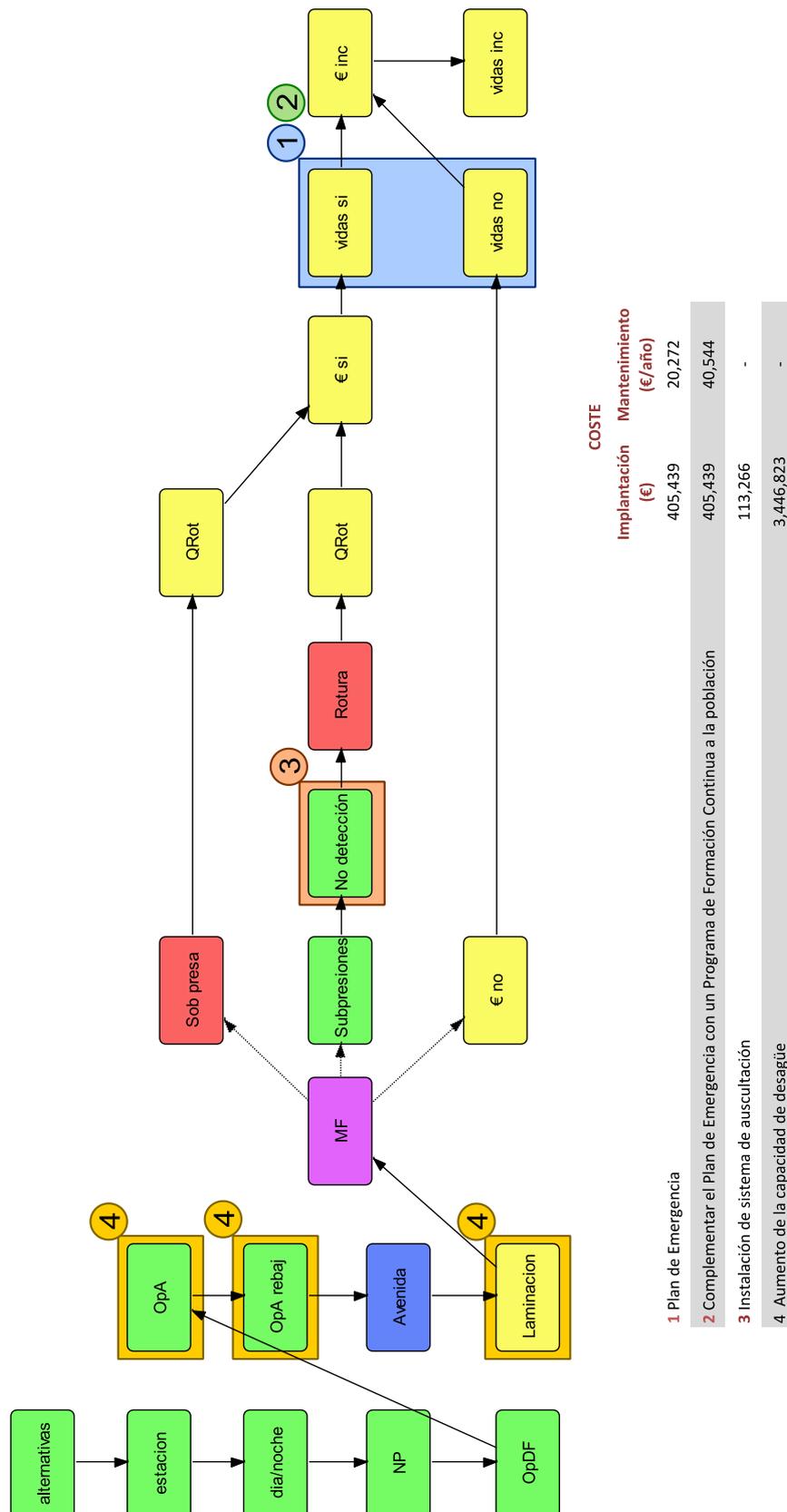


Figura 2.70: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medidas de reducción de riesgo planteadas en la presa T.

A2.22 Medidas en la presa U

A2.22.1 Alternativa 1: Implantación del Plan de Emergencia

Esta mejora consiste en la implantación del Plan de Emergencia de la presa U, que conlleva la mejora de los procedimientos de actuación ante emergencias y una mejor comunicación del peligro a la población a través de sistemas de aviso.

En este caso, esta medida afecta a la pérdida de vidas en los casos de rotura y de no rotura de la presa.

Para incluir el efecto de esta medida dentro del modelo de riesgo, se ha calculado de nuevo la pérdida de vidas utilizando el método de Graham. Dentro del proyecto europeo SUFRI [10], las tasas de este método se han adaptado para poder estudiar diferentes grados de entendimiento de la severidad de la inundación en función de los sistemas de aviso, la existencia o no de un Plan de Emergencia y la coordinación entre los servicios de emergencia y la formación de la población.

El coste de implantación de esta medida es de 601,528 €, según el Proyecto de Implantación del Plan de Emergencia. Además, el coste anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en un 5% del valor de implantación, resultando en 30,076 €.

En la Figura 2.71 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

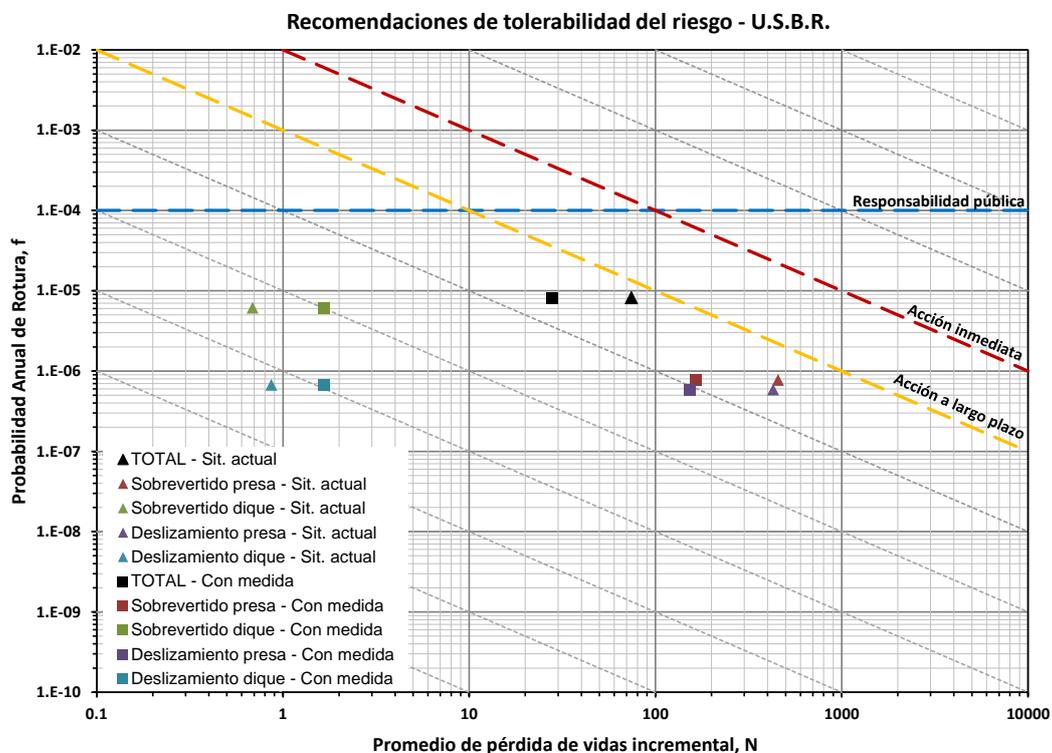


Figura 2.71: Efecto de la implementación del Plan de Emergencia sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, el Plan de Emergencia no modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia reduce el riesgo en vidas al 38% del riesgo original.

A2.22.2 Alternativa 2: Complementar el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua a la población

Esta alternativa consiste en complementar la implantación del Plan de Emergencia de la Presa U con un Programa de Formación Continua a la población aguas abajo de la presa, con el fin de que ésta conozca perfectamente los procedimientos a seguir y los lugares de refugio a los que deben acudir en el caso de rotura de la presa. Para ello, es necesario un programa de formación continua a la población, incluyendo simulacros, y un funcionamiento eficaz de los medios de comunicación a la población en estos casos y de los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad, con el fin de reducir la pérdida de vidas lo máximo posible.

Como la alternativa anterior, esta alternativa afecta únicamente a la pérdida de vidas. Por ello, los cálculos realizados de pérdida de vidas utilizando el método de Graham se han vuelto a realizar con nuevas tasas de mortalidad que incluyen esta mayor formación de la población.

El coste de implantación de esta alternativa es el mismo que en la alternativa 1. El coste aproximado anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto como el doble del coste de mantenimiento del Plan de Emergencia de la alternativa 1, ya que es necesario un mayor número de recursos y de personal para formar correctamente a la población. Por lo tanto, el coste anual de esta medida es de 60,153 €.

En la Figura 2.72 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

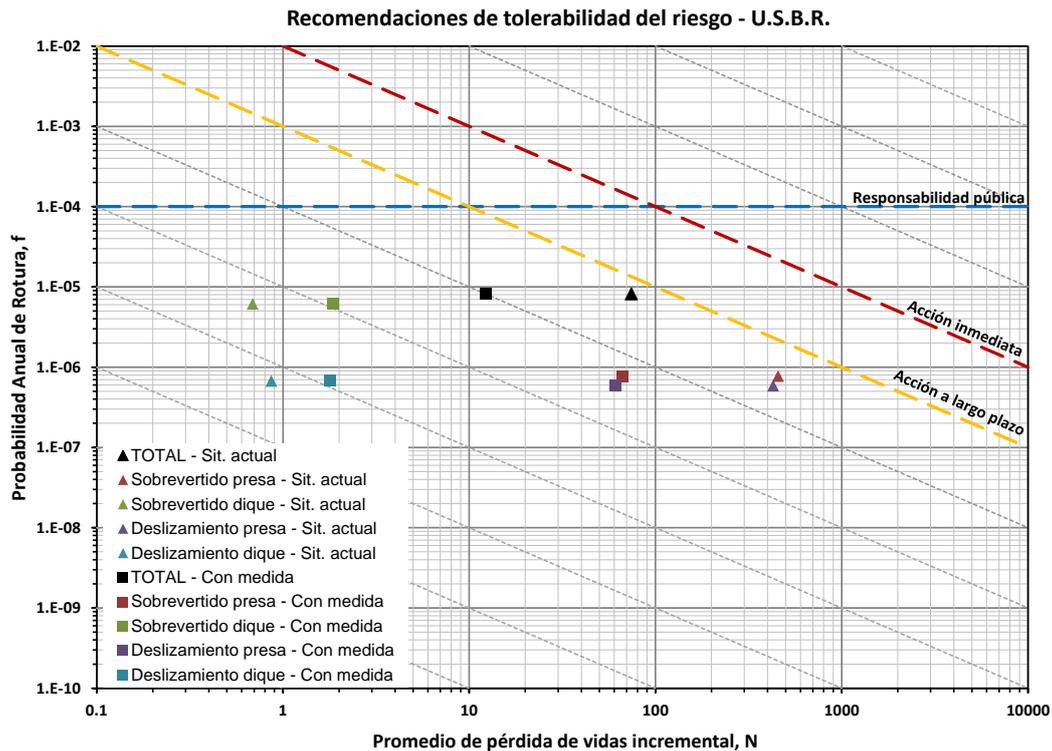


Figura 2.72: Efecto de la implementación del PEP con un Programa de Formación Continua sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, esta medida tampoco modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua reduce el riesgo en vidas al 16% del riesgo original.

A2.22.3 Alternativa 3: Mejora de la cimentación del dique de collado

Esta medida surge de las recomendaciones del Informe de Identificación de Modos de Fallo, debido a que el dique de collado presenta a una cimentación de menor calidad que la presa principal y que podría producir el fallo por deslizamiento. Por lo tanto, el objetivo de esta medida es mejorar las características de la cimentación del dique de collado, mejorando su impermeabilidad y aumentando su capacidad resistente. La propuesta de actuación consiste en:

- Mejora de la cimentación del dique, con tratamientos de consolidación.
- Realización de nuevas campañas de inyección en la cimentación, que conformen una pantalla impermeable.
- Instalación de un sistema de auscultación en la cimentación compuesto por piezómetros de cuerda vibrante, con el fin de conocer con más fiabilidad el estado de las subpresiones en el dique.

Esta actuación disminuye la probabilidad de ocurrencia del modo de fallo por deslizamiento en el dique de collado. Para incluir el efecto de esta medida sobre el modelo de riesgo se han modificado los siguientes nodos:

- **Nodo de altas subpresiones:** La realización de las inyecciones reduce la probabilidad de tener altas subpresiones bajo la presa al mejorar la impermeabilización de la cimentación. Esta probabilidad cambia del 70% al 40%.
- **Nodo no detección y/o no intervención:** Esta mejora de auscultación mediante piezómetros permite un mayor conocimiento de la subpresiones bajo la presa. Para considerar este efecto, se ha modificado la probabilidad de este nodo del 40% al 30%.
- **Nodo rotura por deslizamiento:** Los tratamientos de consolidación aumentan la resistencia en el contacto presa- cimentación. Por eso se han modificado los parámetros resistentes para tener en cuenta el aumento de resistencia. El ángulo de rozamiento ha pasado de una distribución con media 42° entre 30° y 54° a una distribución con media de 45° entre 30° y 60°. La cohesión se ha cambiado de una distribución de media 0.3 MPa a una distribución de una media de 0.4 MPa. De esta forma, se ha obtenido una nueva curva que relaciona la probabilidad de fallo con el nivel de agua para los dos casos de subpresiones analizados.

El coste de implantación de esta medida ha sido estimado mediante un presupuesto estimativo de las obras a realizar y de los equipos necesarios. El coste obtenido es de 935,000 €.

En la Figura 2.73 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

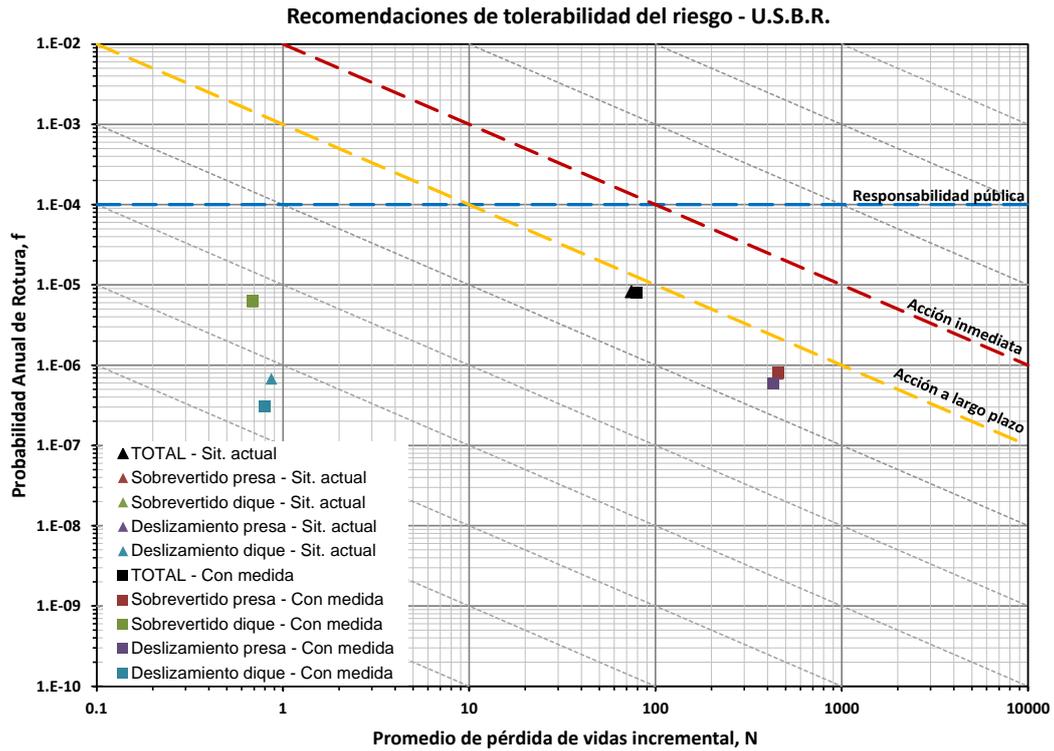


Figura 2.73: Efecto de la mejora de la cimentación del dique de collado en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida afecta principalmente al modo de fallo por deslizamiento, reduciendo de forma apreciable su probabilidad de fallo. Aunque cómo la probabilidad de este modo de fallo respecto al resto es baja, el efecto de esta medida sobre el riesgo total de la presa es bajo también.

A2.22.4 Resumen

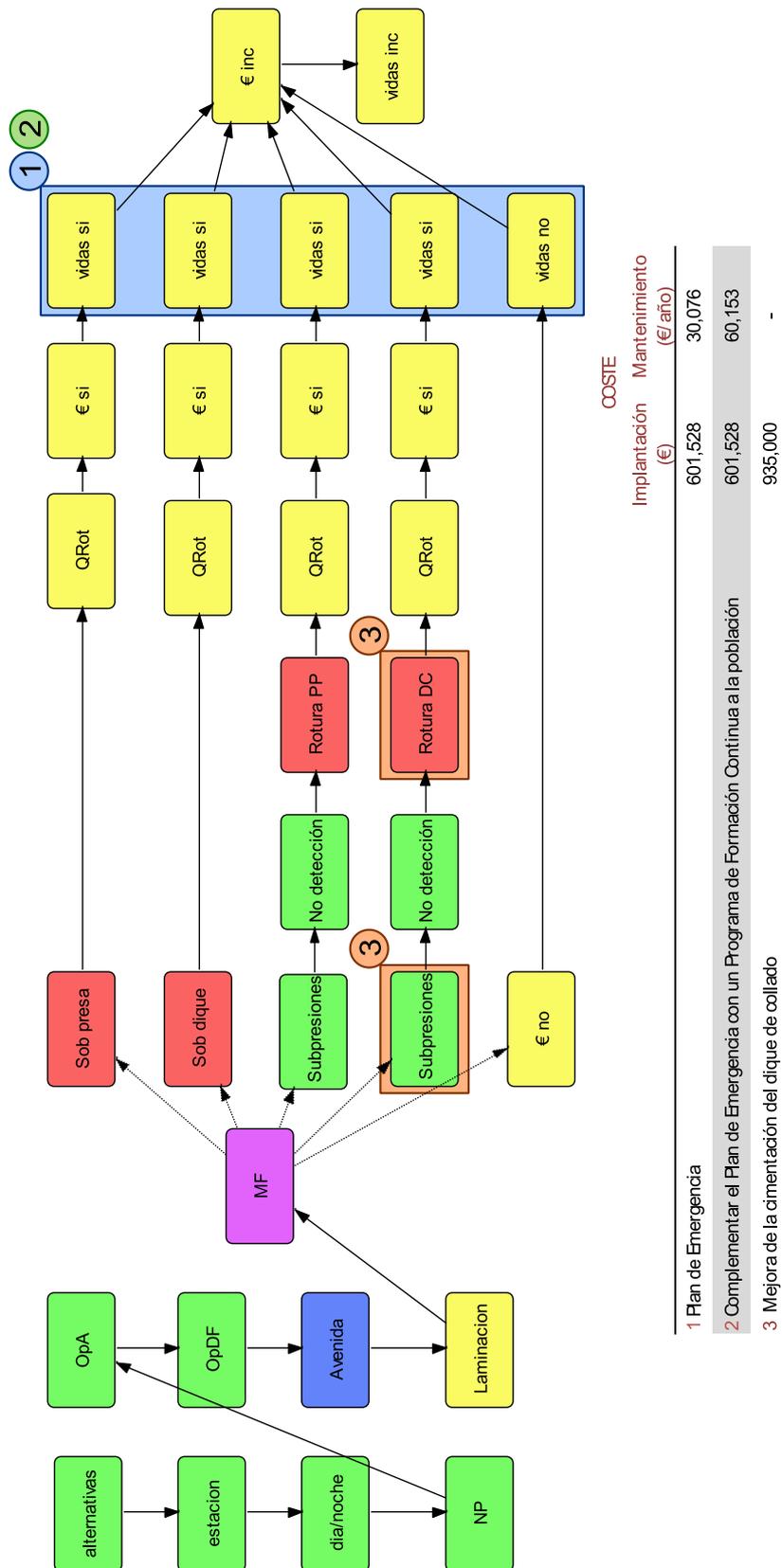


Figura 2.74: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medidas de reducción de riesgo planteadas en la presa U.

A2.23 Medidas en la presa V

A2.23.1 Alternativa 1: Implantación del Plan de Emergencia

Esta mejora consiste en la implantación del Plan de Emergencia de la presa V, que conlleva la mejora de los procedimientos de actuación ante emergencias y una mejor comunicación del peligro a la población a través de sistemas de aviso.

En este caso, esta medida afecta a la pérdida de vidas en los casos de rotura y de no rotura de la presa.

Para incluir el efecto de esta medida dentro del modelo de riesgo, se ha calculado de nuevo la pérdida de vidas utilizando el método de Graham. Dentro del proyecto europeo SUFRI [10], las tasas de este método se han adaptado para poder estudiar diferentes grados de entendimiento de la severidad de la inundación en función de los sistemas de aviso, la existencia o no de un Plan de Emergencia y la coordinación entre los servicios de emergencia y la formación de la población.

El coste de implantación de esta medida es de 657,194 €, según el Proyecto de Implantación del Plan de Emergencia. Además, el coste anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en un 5% del valor de implantación, resultando en 23,860 €.

En la Figura 2.75 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

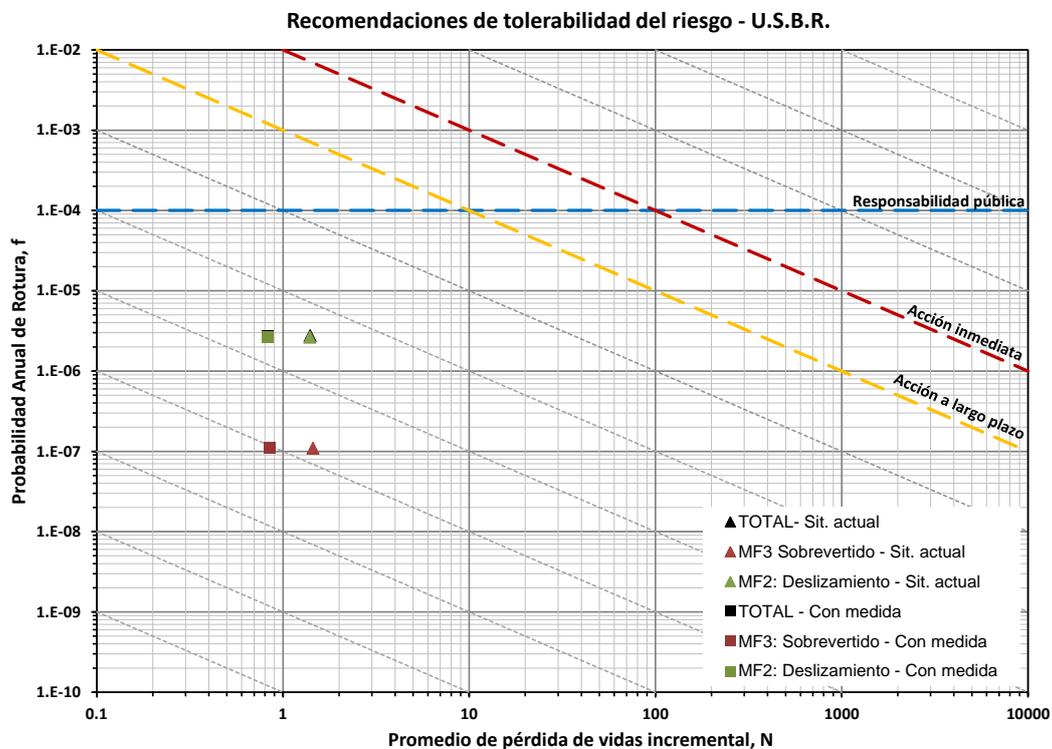


Figura 2.75: Efecto de la implementación del Plan de Emergencia sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, el Plan de Emergencia no modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia reduce el riesgo en vidas al 59% del riesgo original.

A2.23.2 Alternativa 2: Complementar el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua a la población

Esta alternativa consiste en complementar la implantación del Plan de Emergencia de la Presa V con un Programa de Formación Continua a la población aguas abajo de la presa, con el fin de que ésta conozca perfectamente los procedimientos a seguir y los lugares de refugio a los que deben acudir en el caso de rotura de la presa. Para ello, es necesario un programa de formación continua a la población, incluyendo simulacros, y un funcionamiento eficaz de los medios de comunicación a la población en estos casos y de los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad, con el fin de reducir la pérdida de vidas lo máximo posible.

Como la alternativa anterior, esta alternativa afecta únicamente a la pérdida de vidas. Por ello, los cálculos realizados de pérdida de vidas utilizando el método de Graham se han vuelto a realizar con nuevas tasas de mortalidad que incluyen esta mayor formación de la población.

El coste de implantación de esta alternativa es el mismo que en la alternativa 1. El coste aproximado anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto como el doble del coste de mantenimiento del Plan de Emergencia de la alternativa 1, ya que es necesario un mayor número de recursos y de personal para formar correctamente a la población. Por lo tanto, el coste anual de esta medida es de 82,300 €.

En la Figura 2.76 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

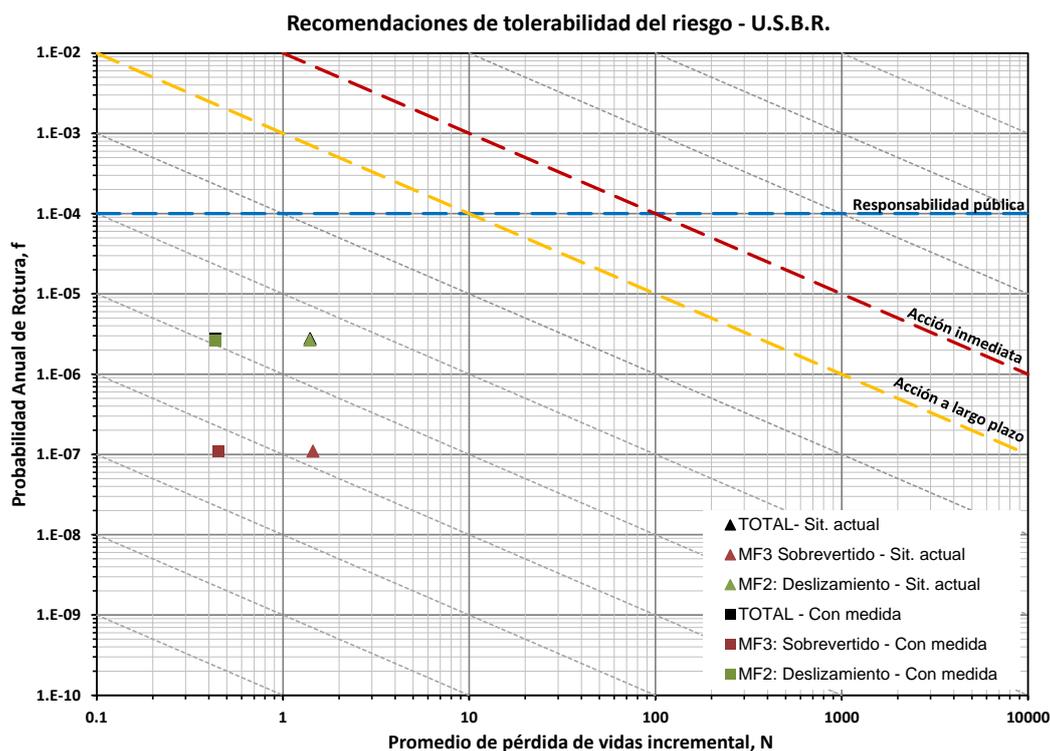


Figura 2.76: Efecto de la implementación del PEP con un Programa de Formación Continua sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, esta medida tampoco modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua reduce el riesgo en vidas al 46% del riesgo original.

A2.23.3 Alternativa 3: Inyecciones en la cimentación y sistema de auscultación

Esta medida se encuentra prevista en el Proyecto de Adecuación al Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses. El objetivo de esta medida es mejorar la impermeabilización del cimiento para tener menores subpresiones en la base de la presa. De esta forma, se reduce la probabilidad de ocurrencia del modo de fallo por deslizamiento.

En concreto, la medida consiste en una campaña de inyecciones de diámetro 75 mm, ejecutadas a media altura desde el paramento aguas abajo de la presa con una inclinación hacia aguas arriba de unos 40° y una longitud media de 25.0 m.

Esta alternativa afecta al nodo de altas subpresiones, ya que la realización de estas inyecciones reduce la probabilidad de tener altas subpresiones bajo la presa. Por lo tanto, esta medida únicamente reduce la probabilidad del modo de fallo por

deslizamiento. Esta medida ha sido introducida en el modelo de riesgo modificando el nodo de altas subpresiones del 70% al 2%.

Además, se propone incluir en la media prevista en el mencionado proyecto, la instalación de un sistema de auscultación que permita conocer el estado de las subpresiones, según las recomendaciones del Informe de Identificación de Modos de Fallo. La mejora propuesta de la auscultación consiste en la instalación de 4 piezómetros de cuerda vibrante.

Esta mejora de auscultación permite un mayor conocimiento de la subpresiones bajo la presa, por lo que afecta al nodo de no detección y/o no intervención de altas subpresiones del modo de fallo por deslizamiento. Para considerar este efecto, se ha modificado la probabilidad de este nodo del 90% (ya que actualmente no hay ningún tipo de auscultación) al 40%.

El coste de implantación de esta medida según el Proyecto de Adecuación y estimando el coste de instalación del sistema de auscultación es de 1,028,861 €.

En la Figura 2.24 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

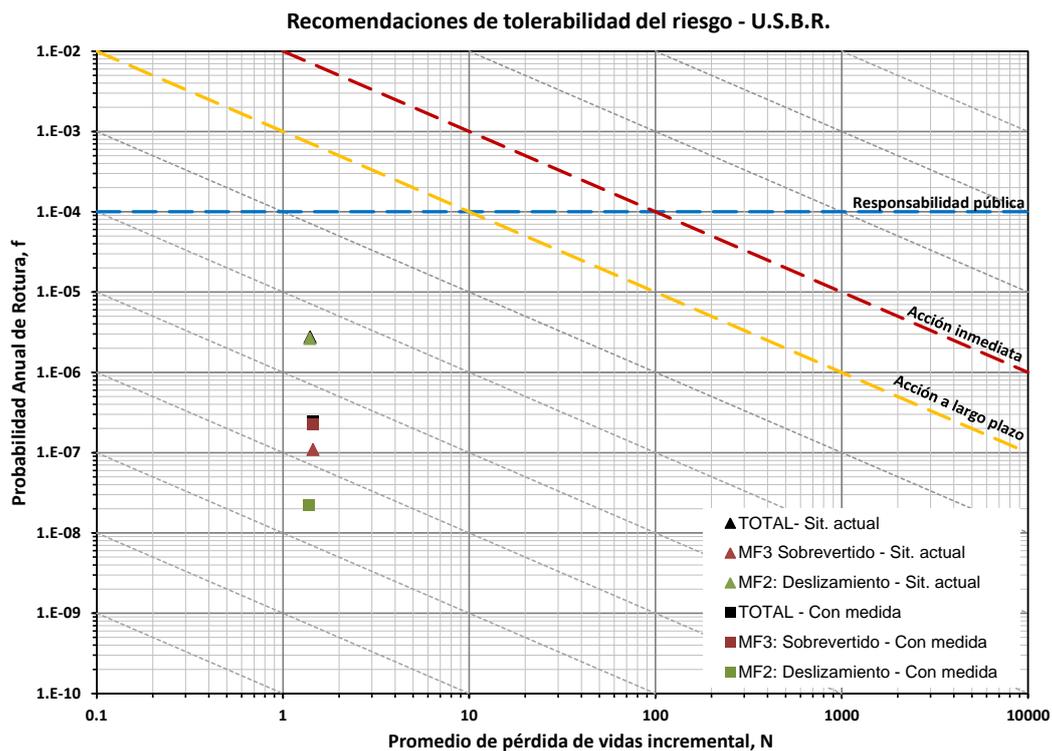


Figura 2.77: Efecto de la instalación de un sistema de auscultación sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida tiene un efecto importante sobre el modo de fallo por deslizamiento, ya que reduce de forma importante su probabilidad de fallo. Este hecho produce que el riesgo en la presa disminuya también significativamente, pasando a ser el sobrevertido el modo de fallo dominante.

A2.23.4 Resumen

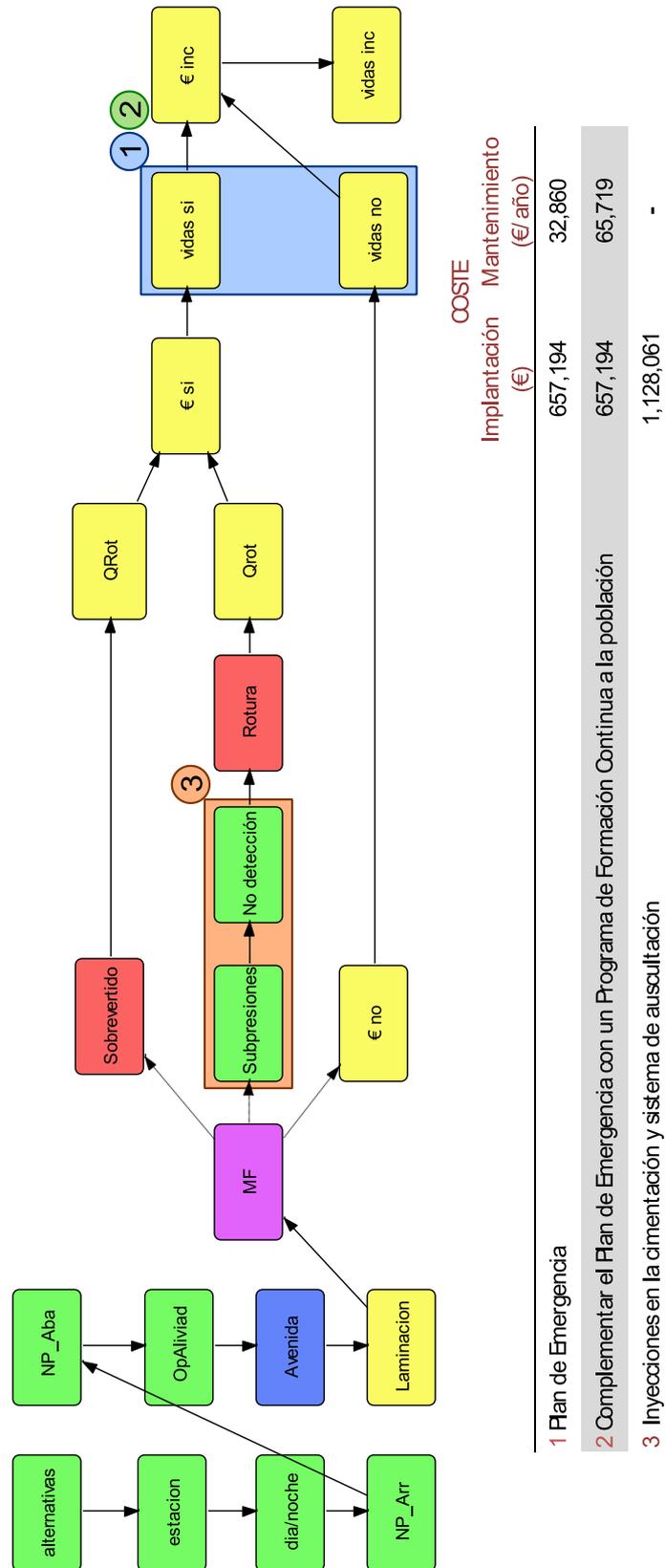


Figura 2.78: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medidas de reducción de riesgo planteadas en la presa V.

A2.24 Medidas en la presa W

A2.24.1 Alternativa 1: Implantación del Plan de Emergencia

Esta mejora consiste en la implantación del Plan de Emergencia de la presa W, que conlleva la mejora de los procedimientos de actuación ante emergencias y una mejor comunicación del peligro a la población a través de sistemas de aviso.

En este caso, esta medida afecta a la pérdida de vidas en los casos de rotura y de no rotura de la presa.

Para incluir el efecto de esta medida dentro del modelo de riesgo, se ha calculado de nuevo la pérdida de vidas utilizando el método de Graham. Dentro del proyecto europeo SUFRI [10], las tasas de este método se han adaptado para poder estudiar diferentes grados de entendimiento de la severidad de la inundación en función de los sistemas de aviso, la existencia o no de un Plan de Emergencia y la coordinación entre los servicios de emergencia y la formación de la población.

El coste de implantación de esta medida es de 529,814 €, según el Proyecto de Implantación del Plan de Emergencia. Además, el coste anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en un 5% del valor de implantación, resultando en 26,490 €.

En la Figura 2.79 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

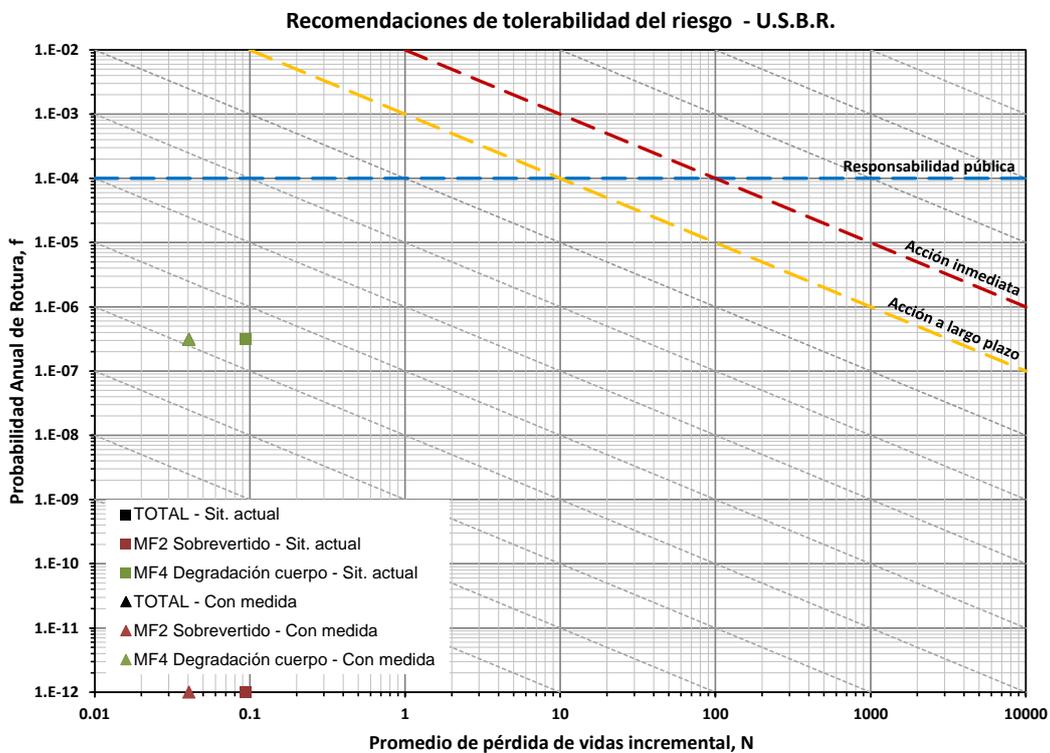


Figura 2.79: Efecto de la implementación del Plan de Emergencia sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, el Plan de Emergencia no modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia reduce el riesgo en vidas al 43% del riesgo original.

A2.24.2 Alternativa 2: Complementar el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua a la población

Esta alternativa consiste en complementar la implantación del Plan de Emergencia de la Presa W con un Programa de Formación Continua a la población aguas abajo de la presa, con el fin de que ésta conozca perfectamente los procedimientos a seguir y los lugares de refugio a los que deben acudir en el caso de rotura de la presa. Para ello, es necesario un programa de formación continua a la población, incluyendo simulacros, y un funcionamiento eficaz de los medios de comunicación a la población en estos casos y de los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad, con el fin de reducir la pérdida de vidas lo máximo posible.

Como la alternativa anterior, esta alternativa afecta únicamente a la pérdida de vidas. Por ello, los cálculos realizados de pérdida de vidas utilizando el método de Graham se han vuelto a realizar con nuevas tasas de mortalidad que incluyen esta mayor formación de la población.

El coste de implantación de esta alternativa es el mismo que en la alternativa 1. El coste aproximado anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto como el doble del coste de mantenimiento del Plan de Emergencia de la alternativa 1, ya que es necesario un mayor número de recursos y de personal para formar correctamente a la población. Por lo tanto, el coste anual de esta medida es de 52,891 €.

En la Figura 2.80 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

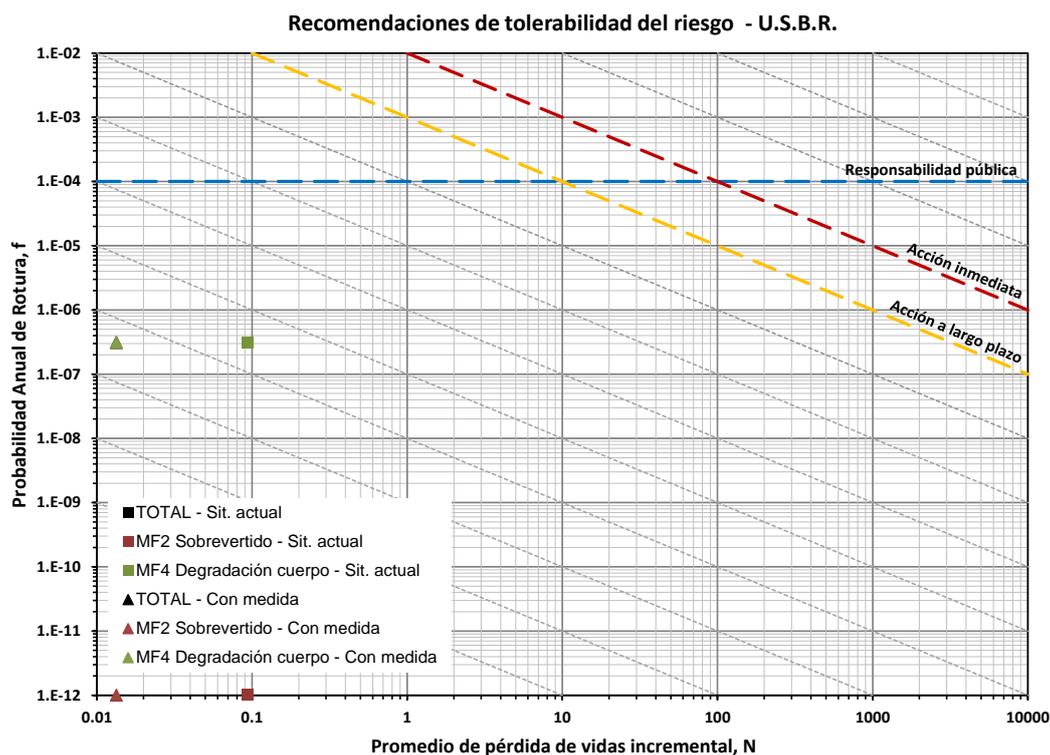


Figura 2.80: Efecto de la implementación del PEP con un Programa de Formación Continua sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, esta medida tampoco modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua reduce el riesgo en vidas al 14% del riesgo original.

A2.24.3 Alternativa 3: Inyección en las juntas horizontales

Esa medida se ha definido a partir de las recomendaciones del Informe de Identificación de Modos de Fallo. El objetivo de esta medida es evitar la degradación del cuerpo de presa mediante la inyección de sus grietas y la instalación de un sistema de control. En concreto, esta medida consiste en:

- Inyección en las fisuras del estribo izquierdo mediante resina epoxi.
- Instalación de extensómetros de varillas en el estribo izquierdo.
- Instalación de medidores de apertura-cierre en las fisuras de la presa.

Esta alternativa afecta al modo de fallo por degradación del cuerpo de presa. El efecto estimado sobre los nodos que componen el modo de fallo es:

- Nodo de degradación del hormigón: La realización de inyecciones disminuye considerablemente la probabilidad de que se produzcan y aumenten las fisuras

del cuerpo de presa. Cómo esta medida afecta directamente al proceso principal de este nodo, la probabilidad se ha disminuido un orden de magnitud, pasando de 2.35% a 0.23%.

- **Nodo no detección y/o no intervención:** La implantación de un sistema de control de las grietas aumenta la probabilidad de que este proceso de degradación pueda ser detectado y evitado. Cómo esta medida afecta directamente al proceso principal de este nodo, la probabilidad se ha disminuido un orden de magnitud, pasando de 33% a 3.3%.

El coste de implantación de esta medida ha sido estimado mediante un presupuesto estimativo de las obras a realizar y de los equipos necesarios. El coste obtenido es de 116,000 €.

En la Figura 2.81 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

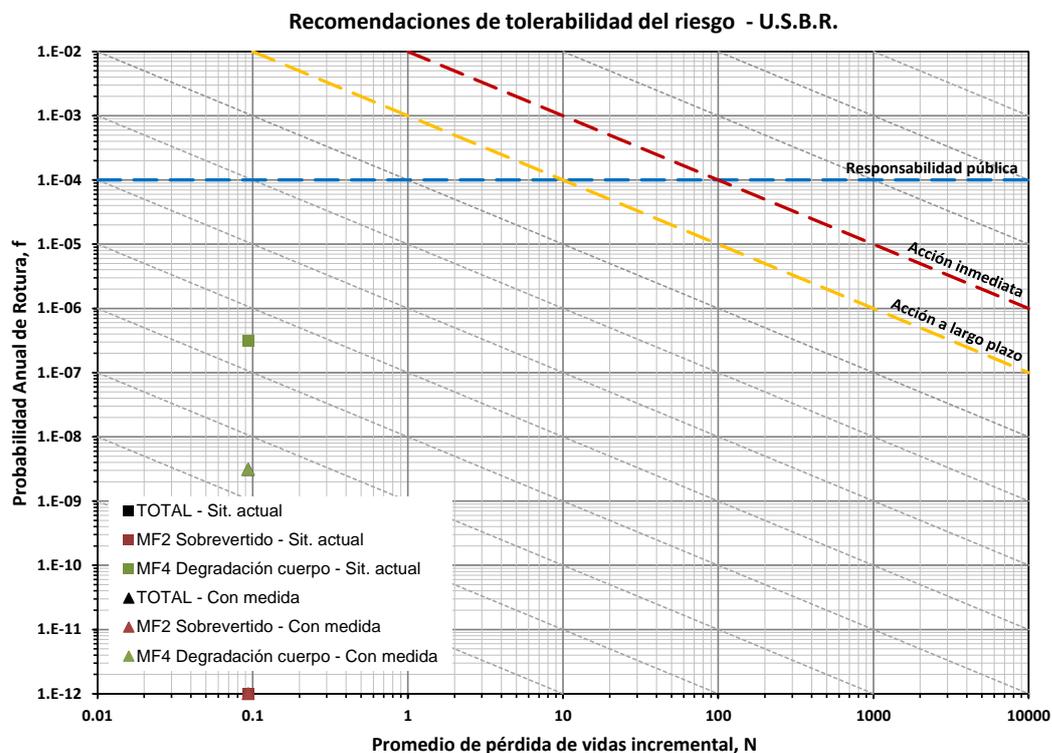


Figura 2.81: Efecto de las inyecciones en las juntas horizontales sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida tiene un efecto importante sobre el modo de fallo al que afecta, fallo por degradación del hormigón, disminuyendo su probabilidad de fallo en dos órdenes de magnitud. Como este es el único modo de fallo que produce riesgo en la presa, también disminuye en dos órdenes de magnitud el riesgo total de la presa

A2.24.4 Resumen

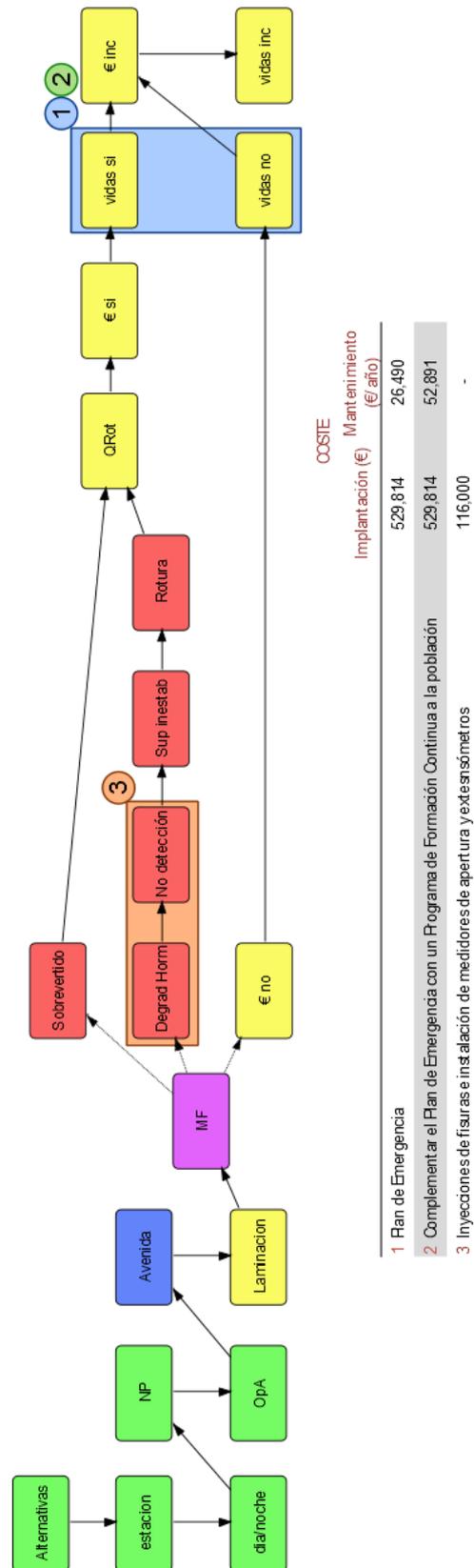


Figura 2.82: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medidas de reducción de riesgo planteadas en la presa W.

A2.25 Medidas en la presa X

A2.25.1 Alternativa 1: Implantación del Plan de Emergencia

Esta mejora consiste en la implantación del Plan de Emergencia de la presa X, que conlleva la mejora de los procedimientos de actuación ante emergencias y una mejor comunicación del peligro a la población a través de sistemas de aviso.

En este caso, esta medida afecta a la pérdida de vidas en los casos de rotura y de no rotura de la presa.

Para incluir el efecto de esta medida dentro del modelo de riesgo, se ha calculado de nuevo la pérdida de vidas utilizando el método de Graham. Dentro del proyecto europeo SUFRI [10], las tasas de este método se han adaptado para poder estudiar diferentes grados de entendimiento de la severidad de la inundación en función de los sistemas de aviso, la existencia o no de un Plan de Emergencia y la coordinación entre los servicios de emergencia y la formación de la población.

El coste de implantación de esta medida es de 366,963 €, según el Proyecto de Implantación del Plan de Emergencia. Además, el coste anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en un 5% del valor de implantación, resultando en 18,348 €.

En la Figura 2.83 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

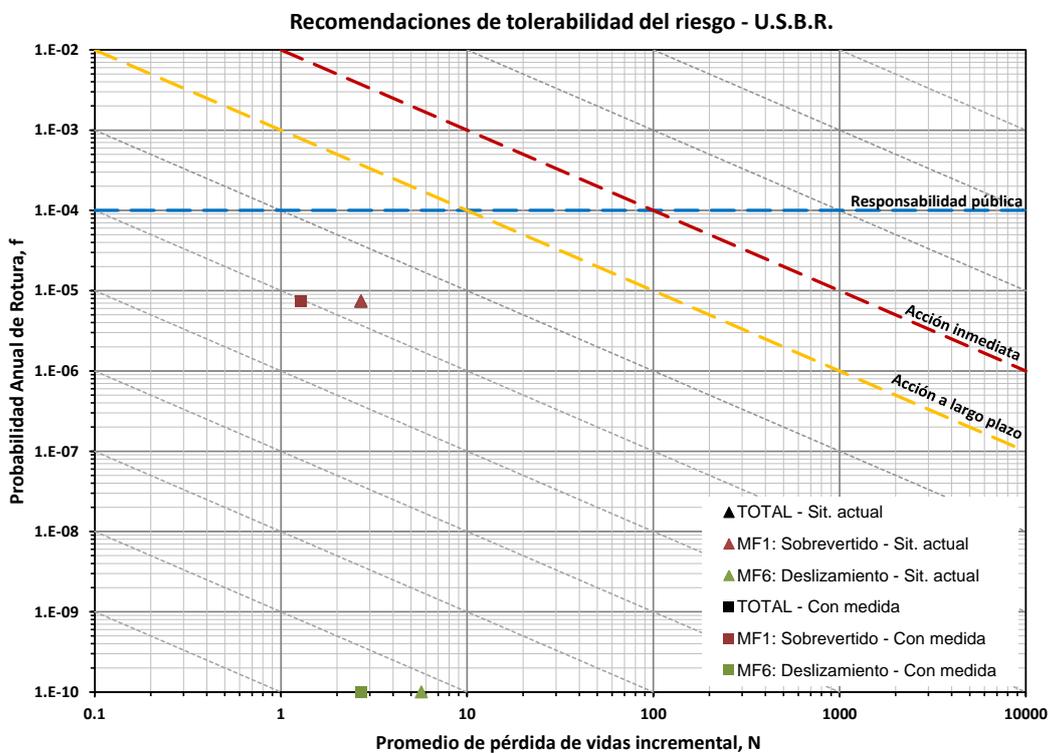


Figura 2.83: Efecto de la implementación del Plan de Emergencia sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, el Plan de Emergencia no modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia reduce el riesgo en vidas al 48% del riesgo original.

A2.25.2 Alternativa 2: Complementar el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua a la población

Esta alternativa consiste en complementar la implantación del Plan de Emergencia de la Presa X con un Programa de Formación Continua a la población aguas abajo de la presa, con el fin de que ésta conozca perfectamente los procedimientos a seguir y los lugares de refugio a los que deben acudir en el caso de rotura de la presa. Para ello, es necesario un programa de formación continua a la población, incluyendo simulacros, y un funcionamiento eficaz de los medios de comunicación a la población en estos casos y de los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad, con el fin de reducir la pérdida de vidas lo máximo posible.

Como la alternativa anterior, esta alternativa afecta únicamente a la pérdida de vidas. Por ello, los cálculos realizados de pérdida de vidas utilizando el método de Graham se han vuelto a realizar con nuevas tasas de mortalidad que incluyen esta mayor formación de la población.

El coste de implantación de esta alternativa es el mismo que en la alternativa 1. El coste aproximado anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto como el doble del coste de mantenimiento del Plan de Emergencia de la alternativa 1, ya que es necesario un mayor número de recursos y de personal para formar correctamente a la población. Por lo tanto, el coste anual de esta medida es de 36,696 €.

En la Figura 2.84 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

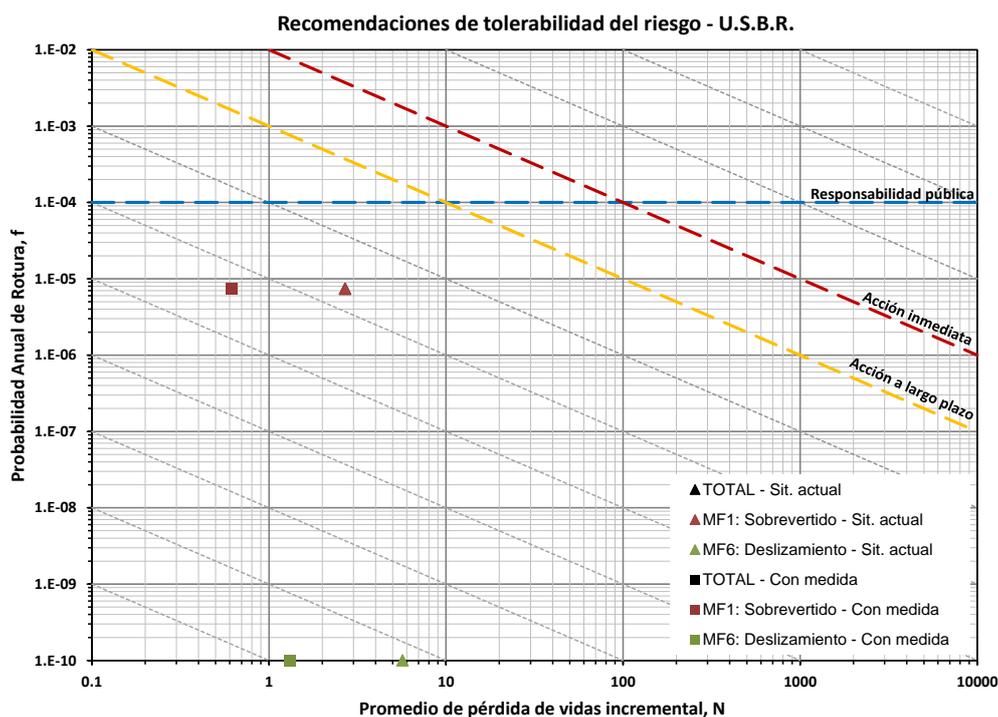


Figura 2.84: Efecto de la implementación del PEP con un Programa de Formación Continua sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, esta medida tampoco modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua reduce el riesgo en vidas al 23% del riesgo original.

A2.25.3 Alternativa 3: Construcción de un nuevo desagüe de fondo

Esta medida se encuentra prevista en el Proyecto de Adecuación al Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses. Este nuevo órgano de desagüe tiene como objetivo cumplir el citado reglamento para este tipo de presas. Este nuevo órgano de desagüe aumenta la capacidad para evacuar caudales de la presa, por lo que se reducen los niveles de agua alcanzados en el embalse, disminuyendo la probabilidad de sobrevvertido y deslizamiento.

El desagüe de fondo previsto consta de dos conductos. Este órgano de desagüe se incluye en el modelo de riesgo con un nuevo nodo de operatividad. Se introduce con sus dos conductos y se ha considerado una fiabilidad individual de cada uno de ellos del 95%.

Además, esta alternativa también modifica las reglas de operación al incluir un nuevo órgano de desagüe, por lo que cambia el nodo de laminación.

El coste de implantación de esta medida según el Proyecto de Adecuación es de 1,756,079 €.

En la Figura 2.85 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

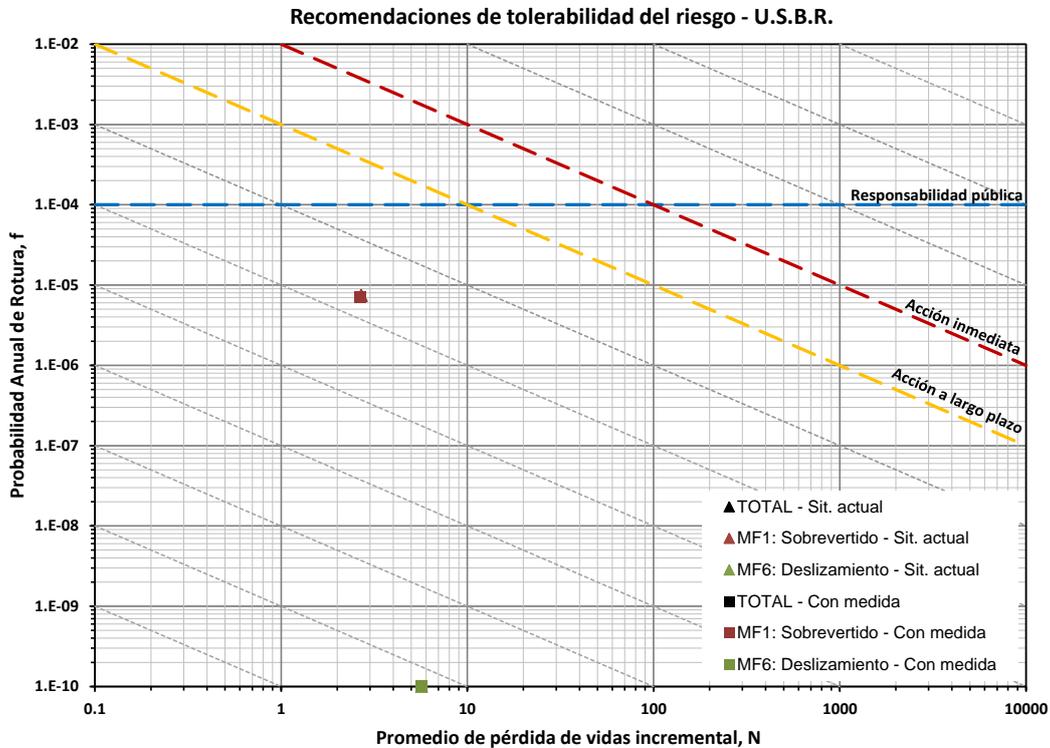


Figura 2.85: Efecto de la instalación de un sistema de auscultación sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida disminuye ligeramente el riesgo en todos los modos de fallo, al disminuir los niveles alcanzados en el embalse. Aunque este cambio es bajo porque la capacidad adicional de este órgano de desagüe es baja en comparación con la del aliviadero.

A2.25.4 Resumen

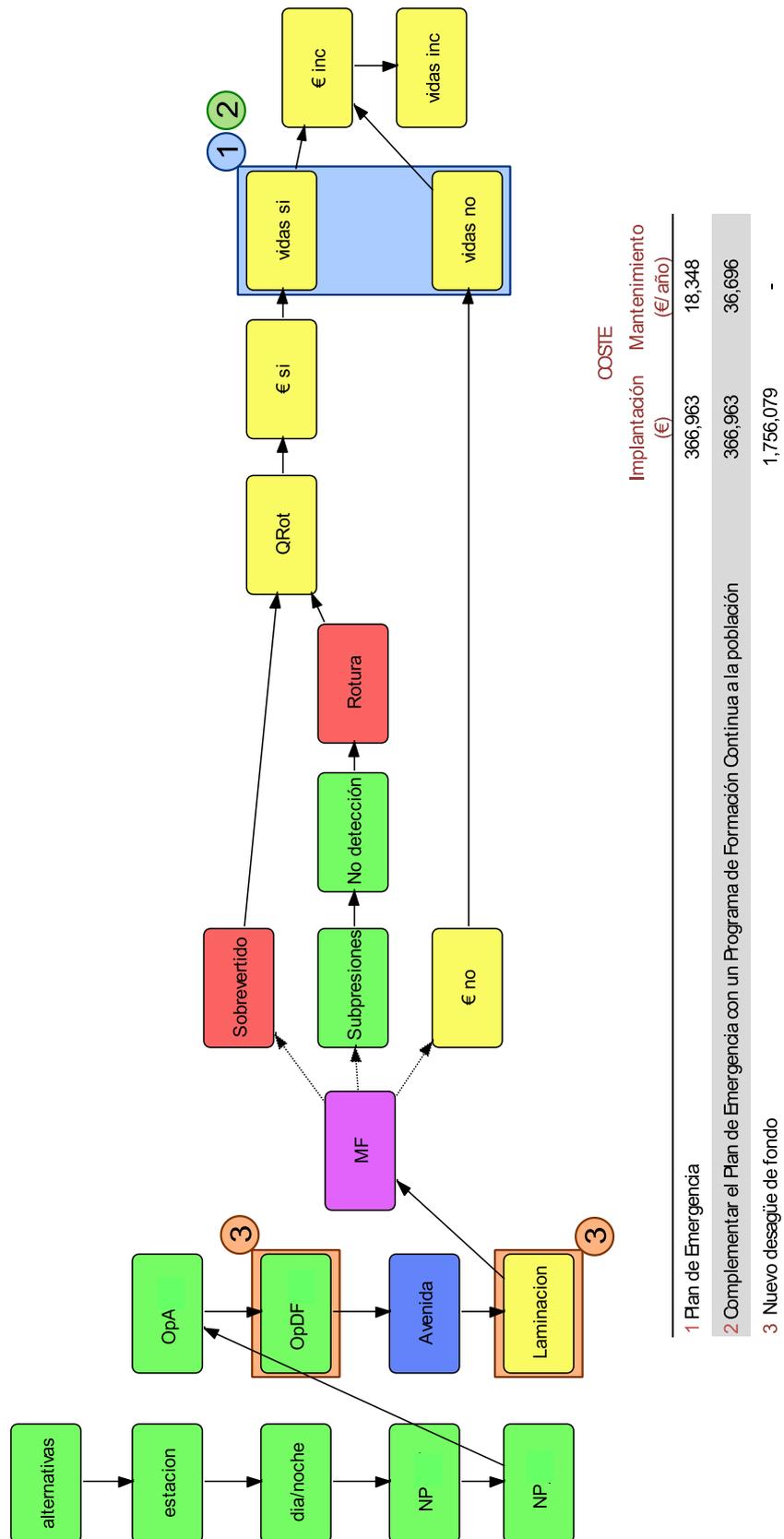


Figura 2.86: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medidas de reducción de riesgo planteadas en la presa X.

A2.26 Medidas en la presa Y

A2.26.1 Alternativa 1: Implantación del Plan de Emergencia

Esta mejora consiste en la implantación del Plan de Emergencia de la presa Y, que conlleva la mejora de los procedimientos de actuación ante emergencias y una mejor comunicación del peligro a la población a través de sistemas de aviso.

En este caso, esta medida afecta tanto a la pérdida de vidas de la presa principal como a la producida por los dique de collado. Esta medida permite la reducción de la pérdida de vidas humanas provocada por la rotura de la presa, por lo que afecta a los nodos de pérdida de vidas del modelo.

Para incluir el efecto de esta medida dentro del modelo de riesgo, se ha calculado de nuevo la pérdida de vidas utilizando el método de Graham. Dentro del proyecto europeo SUFRI [10], las tasas de este método se han adaptado para poder estudiar diferentes grados de entendimiento de la severidad de la inundación en función de los sistemas de aviso, la existencia o no de un Plan de Emergencia y la coordinación entre los servicios de emergencia y la formación de la población.

El coste de implantación de esta medida es de 512,269 €, según el Proyecto de Implantación del Plan de Emergencia. Además, el coste anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en un 5% del valor de implantación, resultando en 25,613 €.

En la Figura 2.87 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

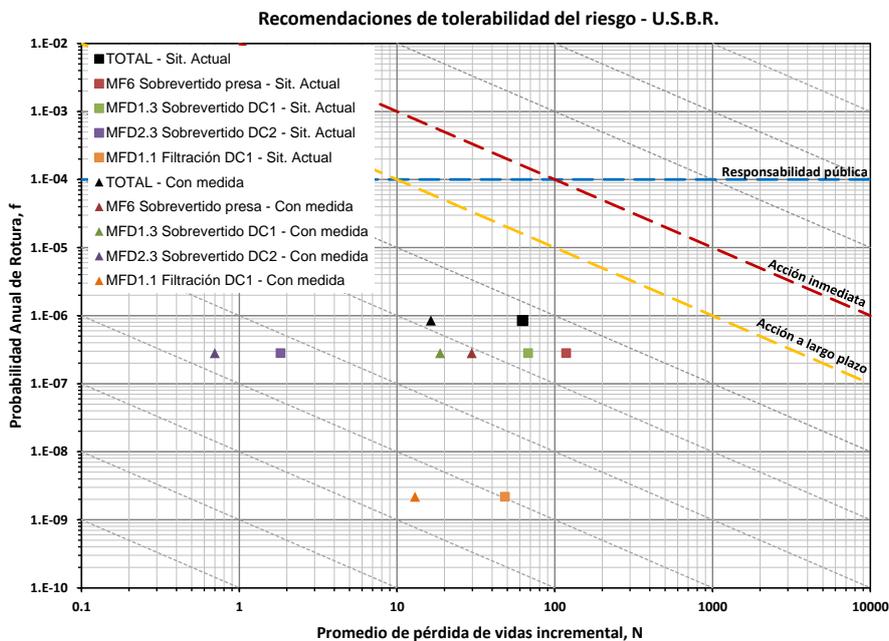


Figura 2.87: Efecto de la implementación del Plan de Emergencia sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, el Plan de Emergencia no modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia reduce el riesgo en vidas al 26% del riesgo original.

A2.26.2 Alternativa 2: Complementar el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua a la población

Esta alternativa consiste en complementar la implantación del Plan de Emergencia de la Presa Y con un Programa de Formación Continua a la población aguas abajo de la presa, con el fin de que ésta conozca perfectamente los procedimientos a seguir y los lugares de refugio a los que deben acudir en el caso de rotura de la presa. Para ello, es necesario un programa de formación continua a la población, incluyendo simulacros, y un funcionamiento eficaz de los medios de comunicación a la población en estos casos y de los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad, con el fin de reducir la pérdida de vidas lo máximo posible.

Como la alternativa anterior, esta alternativa afecta únicamente a la pérdida de vidas. Por ello, los cálculos realizados de pérdida de vidas utilizando el método de Graham se han vuelto a realizar con nuevas tasas de mortalidad que incluyen esta mayor formación de la población.

El coste de implantación de esta alternativa es el mismo que en la alternativa 1. El coste aproximado anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto como el doble del coste de mantenimiento del Plan de Emergencia de la alternativa 1, ya que es necesario un mayor número de recursos y de personal para formar correctamente a la población. Por lo tanto, el coste anual de esta medida es de 51,226 €.

En la Figura 2.88 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

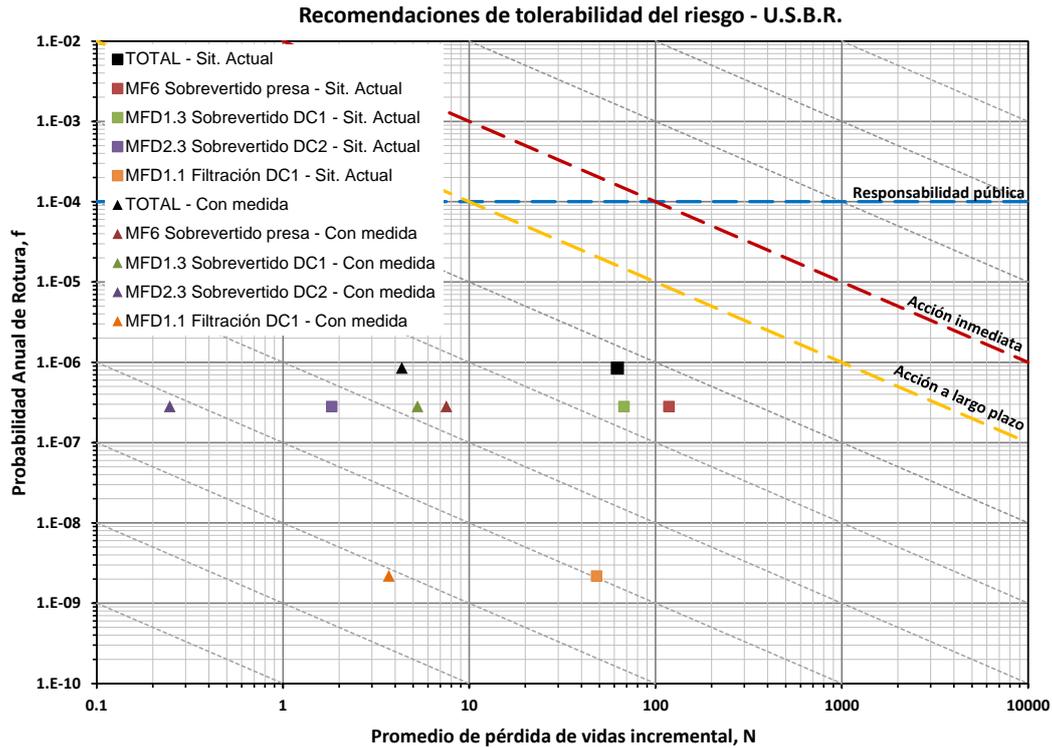


Figura 2.88: Efecto de la implementación del PEP con un Programa de Formación Continua sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, esta medida tampoco modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua reduce el riesgo en vidas al 7% del riesgo original.

A2.26.3 Alternativa 3: Inyección de fisuras e instalación de medidores de apertura-cierre en el dique de collado 1

Esa medida se ha planteado a partir de las recomendaciones del Informe de Identificación de Modos de Fallo para evitar el modo de fallo en el dique de collado 1 por filtraciones en el cuerpo de presa y formación de una inestabilidad. La actuación propuesta consiste en:

- Inyección de las juntas y fisuras del dique 1 para asegurar su impermeabilidad, debido al deterioro de la fábrica de hormigón y de las filtraciones continuas. De esta forma, se evita el desarrollo de estas fisuras y la formación de una inestabilidad en el cuerpo de presa.
- Instalación de un sistema de medidores de apertura y cierre en las fisuras detectadas en el dique 1, para tener un seguimiento de los movimientos

relativos en las juntas y fisuras. Así se detecta mejor la posible aparición de este modo de fallo.

Esta alternativa afecta principalmente al modo de fallo D1.1, fallo por filtraciones en el cuerpo de presa y formación de inestabilidad. El efecto estimado sobre los nodos que componen el modo de fallo es:

- **Nodo altas filtraciones.** La realización de inyecciones disminuye considerablemente la probabilidad de que se produzcan filtraciones en el cuerpo de presa que aumenten las fisuras. Cómo esta medida afecta directamente al proceso principal de este nodo, la probabilidad se ha disminuido un orden de magnitud, pasando de 12.1% a 1.21%.
- **Nodo no detección:** La instalación de medidores de apertura-cierre disminuye la probabilidad de no detección o no intervención de este modo de fallo, ya que permiten un mayor seguimiento del desarrollo de las fisuras. Se ha estimado que esta medida divide la probabilidad de este nodo se reduce a la mitad, pasando de 9.2% a 4.6%.

El coste de implantación de esta medida ha sido estimado mediante un presupuesto estimativo de las obras a realizar y de los equipos necesarios. El coste obtenido es de 88,000 €.

En la Figura 2.89 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

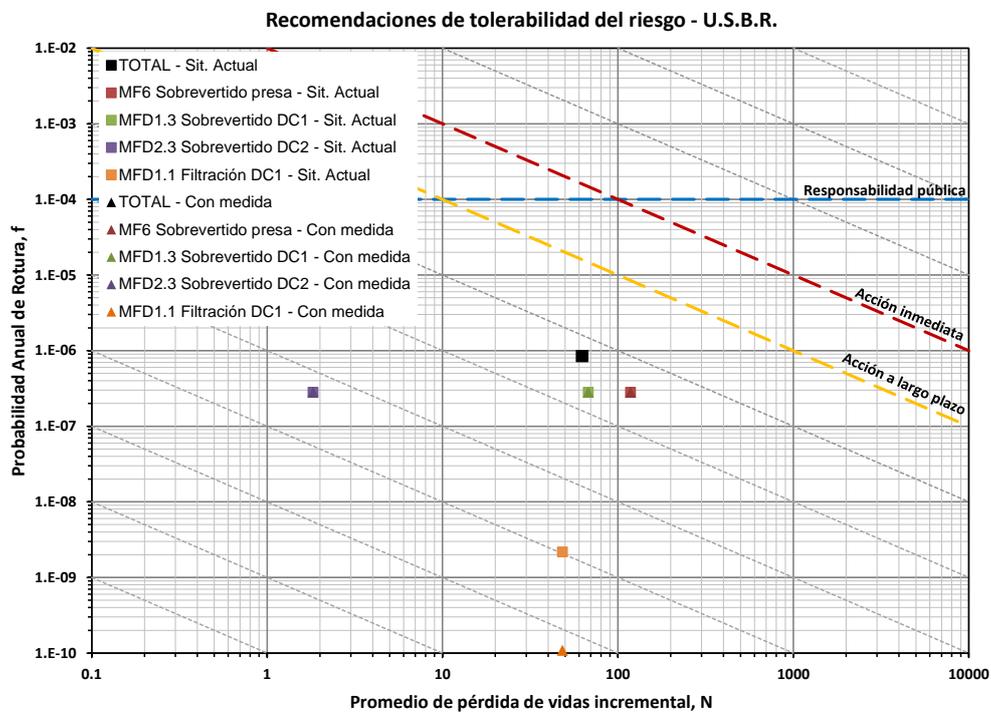


Figura 2.89: Efecto de la inyección de fisuras en el dique de collado 1 y su auscultación sobre el riesgo en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida tiene un efecto importante sobre el modo de fallo al que afecta, fallo por filtraciones en el dique de collado 1, disminuyendo su probabilidad de fallo en más de un orden de magnitud. Aunque cómo la probabilidad de este modo de fallo respecto al sobvertido es muy baja, el efecto de esta medida sobre el riesgo total de la presa es muy bajo también.

A2.26.4 Resumen

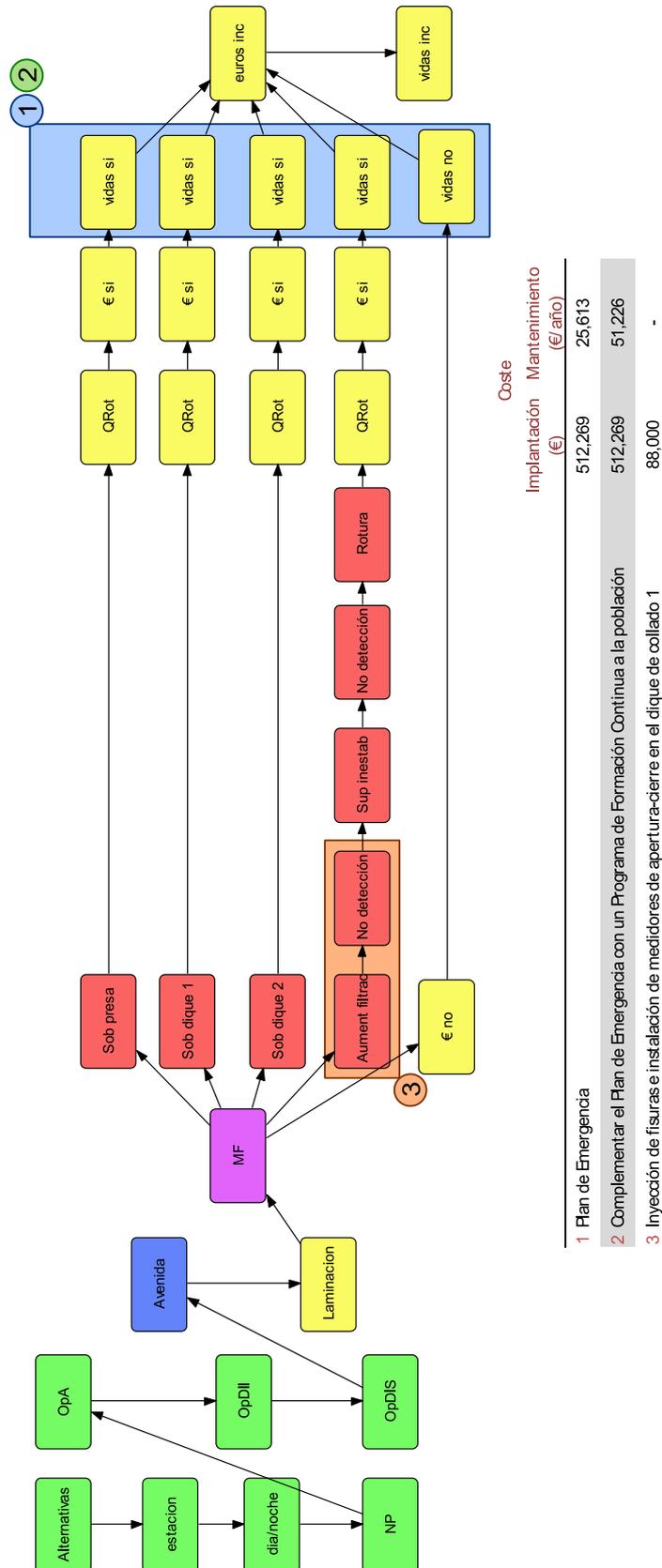


Figura 2.90: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medidas de reducción de riesgo planteadas en la presa Y.

A2.27 Medidas en el sistema Z

A2.27.1 Alternativa 1: Implantación del Plan de Emergencia

Esta mejora consiste en la implantación de forma conjunta de los Planes de Emergencia de las presas Z1 y Z2, que conllevan la mejora de los procedimientos de actuación ante emergencias y una mejor comunicación del peligro a la población a través de sistemas de aviso.

En este caso, esta medida afecta a la pérdida de vidas en los casos de rotura y de no rotura de las presas.

Para incluir el efecto de esta medida dentro del modelo de riesgo, se ha calculado de nuevo la pérdida de vidas utilizando el método de Graham. Dentro del proyecto europeo SUFRI [10], las tasas de este método se han adaptado para poder estudiar diferentes grados de entendimiento de la severidad de la inundación en función de los sistemas de aviso, la existencia o no de un Plan de Emergencia y la coordinación entre los servicios de emergencia y la formación de la población.

El coste de implantación de esta medida es de 661,210 €, según el Proyecto de Implantación del Plan de Emergencia de las dos presas. Además, el coste anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en un 5% del valor de implantación, resultando en 33,060 €.

En la Figura 2.91 y la Figura 2.92 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de las dos presas cuando se vuelve a calcular el riesgo en el sistema con las modificaciones descritas.

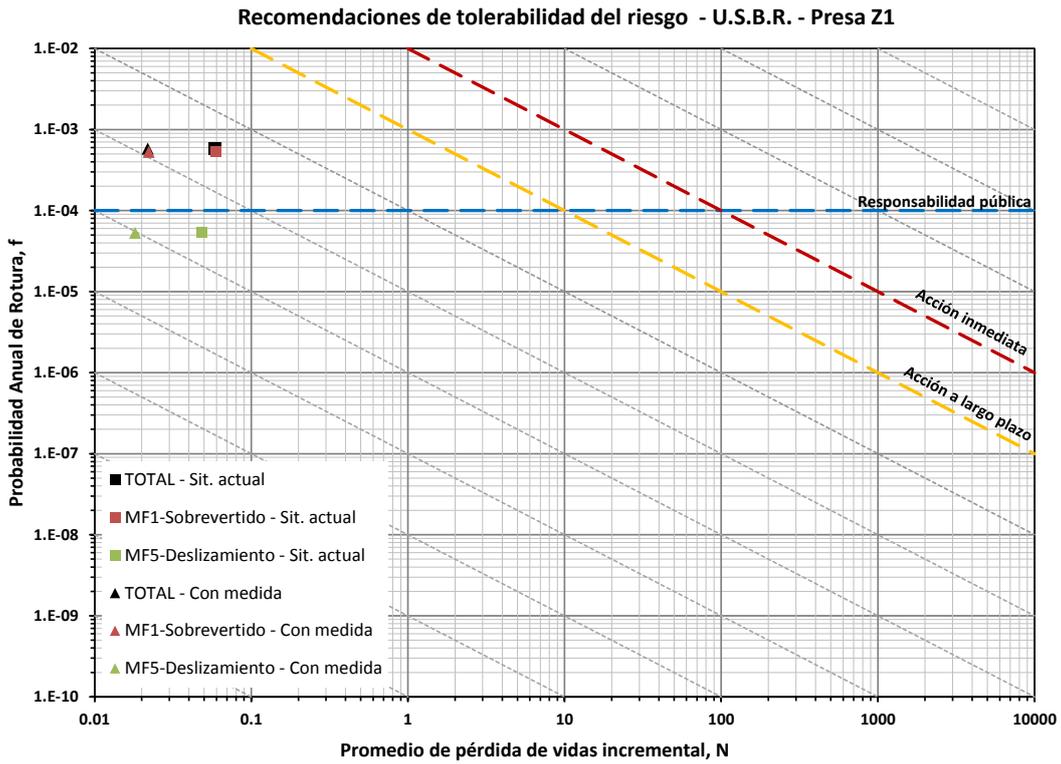


Figura 2.91: Efecto de la implementación del Plan de Emergencia sobre el riesgo de la presa Z1 en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

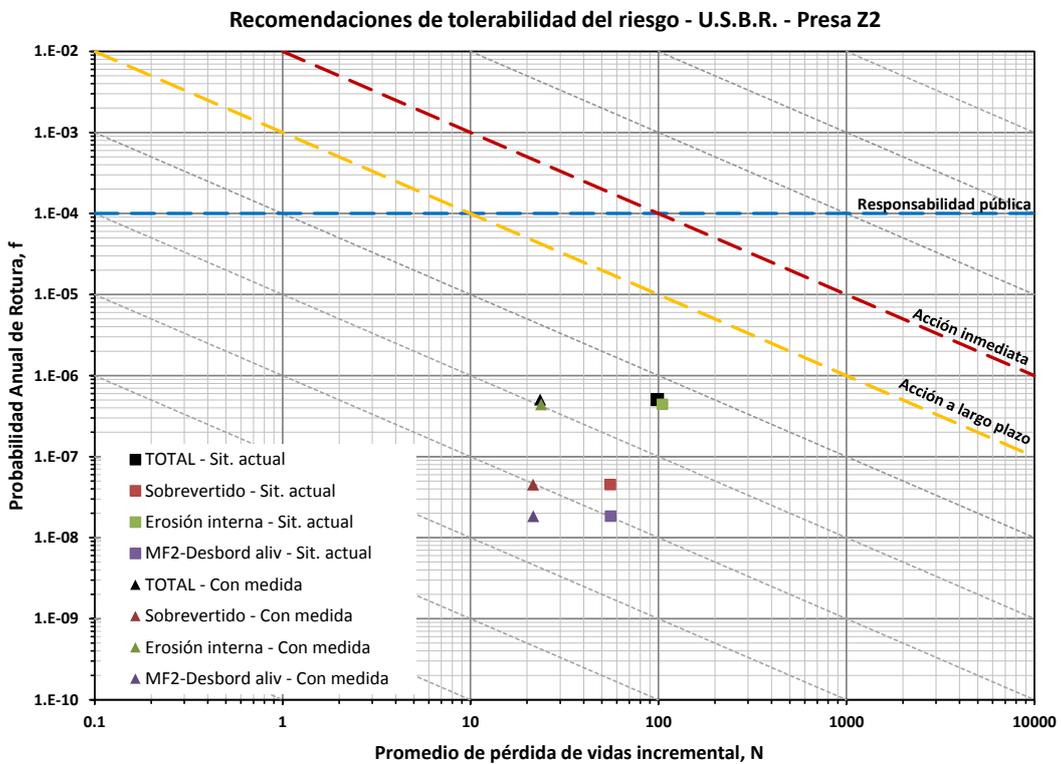


Figura 2.92: Efecto de la implementación del Plan de Emergencia sobre el riesgo de la presa Z2 en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, el Plan de Emergencia no modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas en Z2. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia reduce el riesgo en vidas al 24% del riesgo original en Z2. En Z1 el efecto de este plan es mucho menor debido a que su pérdida de vidas es muy baja.

A2.27.2 Alternativa 2: Complementar el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua a la población

Esta alternativa consiste en complementar la implantación del Plan de Emergencia de la dos presas con un Programa de Formación Continua a la población aguas abajo de la presa Z2, con el fin de que ésta conozca perfectamente los procedimientos a seguir y los lugares de refugio a los que deben acudir en el caso de rotura de la presa. Para ello, es necesario un programa de formación continua a la población, incluyendo simulacros, y un funcionamiento eficaz de los medios de comunicación a la población en estos casos y de los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad, con el fin de reducir la pérdida de vidas lo máximo posible.

Como la alternativa anterior, esta alternativa afecta únicamente a la pérdida de vidas. Por ello, los cálculos realizados de pérdida de vidas utilizando el método de Graham se han vuelto a realizar con nuevas tasas de mortalidad que incluyen esta mayor formación de la población.

El coste de implantación de esta alternativa es el mismo que en la alternativa 1. El coste aproximado anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto como el doble del coste de mantenimiento del Plan de Emergencia de la alternativa 1, ya que es necesario un mayor número de recursos y de personal para formar correctamente a la población. Por lo tanto, el coste anual de esta medida es de 66,122 €.

En la Figura 2.93 y la Figura 2.94 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de las dos presas cuando se vuelve a calcular el riesgo en el sistema con las modificaciones descritas.

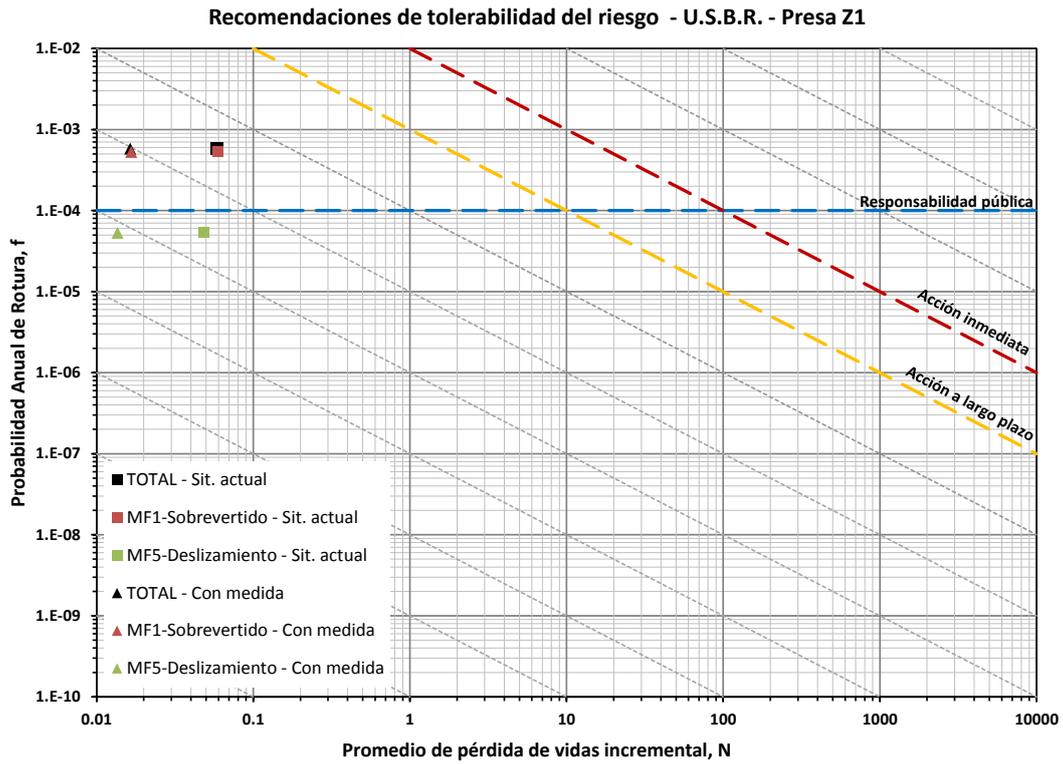


Figura 2.93: Efecto de la implementación del PEP con un Programa de Formación Continua sobre el riesgo de la presa Z1 en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

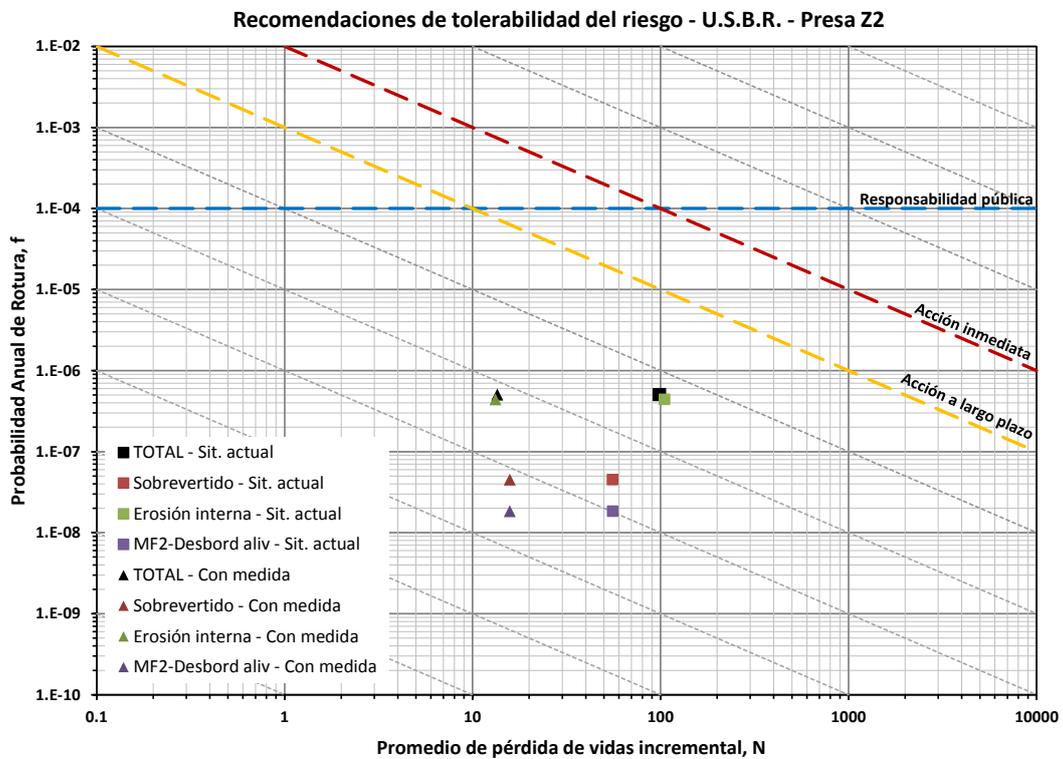


Figura 2.94: Efecto de la implementación del PEP con un Programa de Formación Continua sobre el riesgo de la presa Z2 en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar el gráfico anterior, esta medida tampoco modifica las probabilidades de rotura ni el riesgo económico pero sí que disminuye de forma importante la pérdida de vidas en Z2. Esta reducción se muestra de forma clara en el gráfico anterior, ya que esta alternativa desplaza la situación actual hacia la izquierda. En total, el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua reduce el riesgo en vidas en Z2 al 14% del riesgo original. En Z1 el efecto de este programa es mucho menor debido a que su pérdida de vidas es muy baja.

A2.27.3 Alternativa 3: Reperforación de drenes en Z1

Es una medida prevista en el Proyecto de Adecuación al Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses de la presa Z1. Esta medida permite un mejor drenaje del agua en el cimientado y por lo tanto, una disminución de las subpresiones.

Según este proyecto, esta medida se realiza porque aunque las filtraciones por debajo del pie de aguas arriba son mínimas, éstas no se concentran en los drenes, sino parece que empapan toda la parte inferior del cuerpo de la presa. Por este motivo, los drenes podrían estar obturados, por lo que se justifica su reperforación. Esta medida consiste en una reperforación de drenes, sin nuevas inyecciones en el cimientado.

Esta medida afecta principalmente al nodo de altas subpresiones del modo de fallo por deslizamiento de la presa Z1, ya que la reperforación de drenes disminuye la probabilidad de que haya altas subpresiones en la base de la presa. Esta probabilidad se ha disminuido del 5% al 2%.

El coste de implantación de esta medida aparece en el citado proyecto y es de 112,333 €.

En la Figura 2.4 y la Figura 2.96 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de las dos presas cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

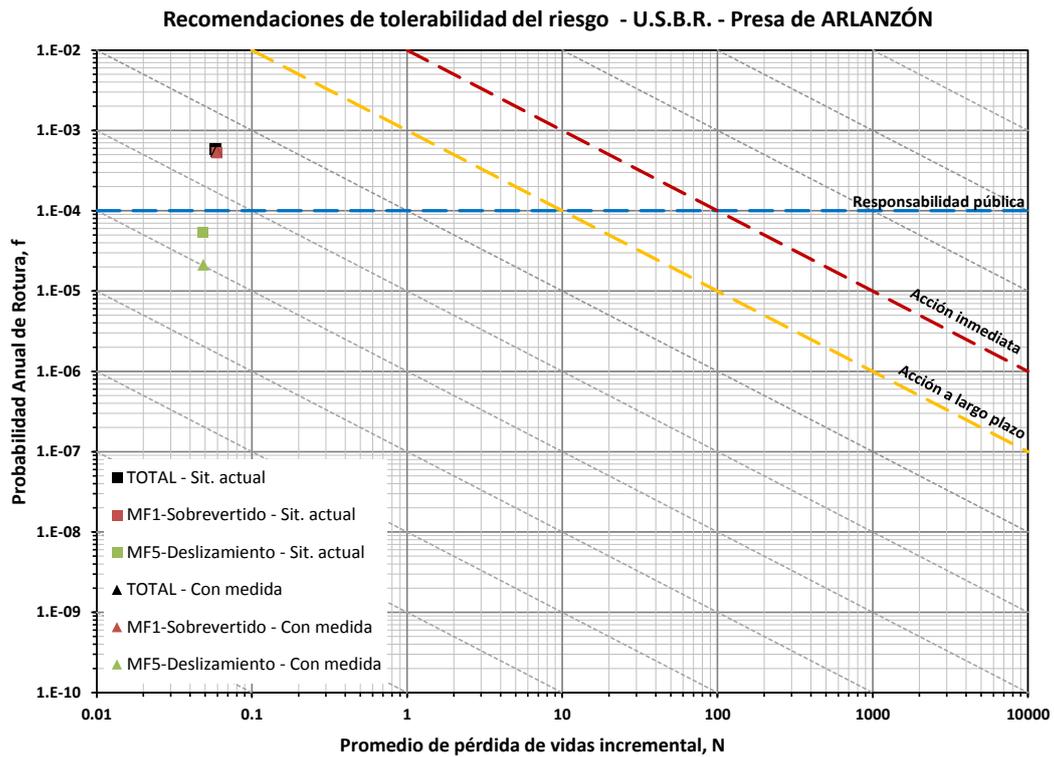


Figura 2.95: Efecto de la reperforación de drenes sobre el riesgo de la presa Z1 en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

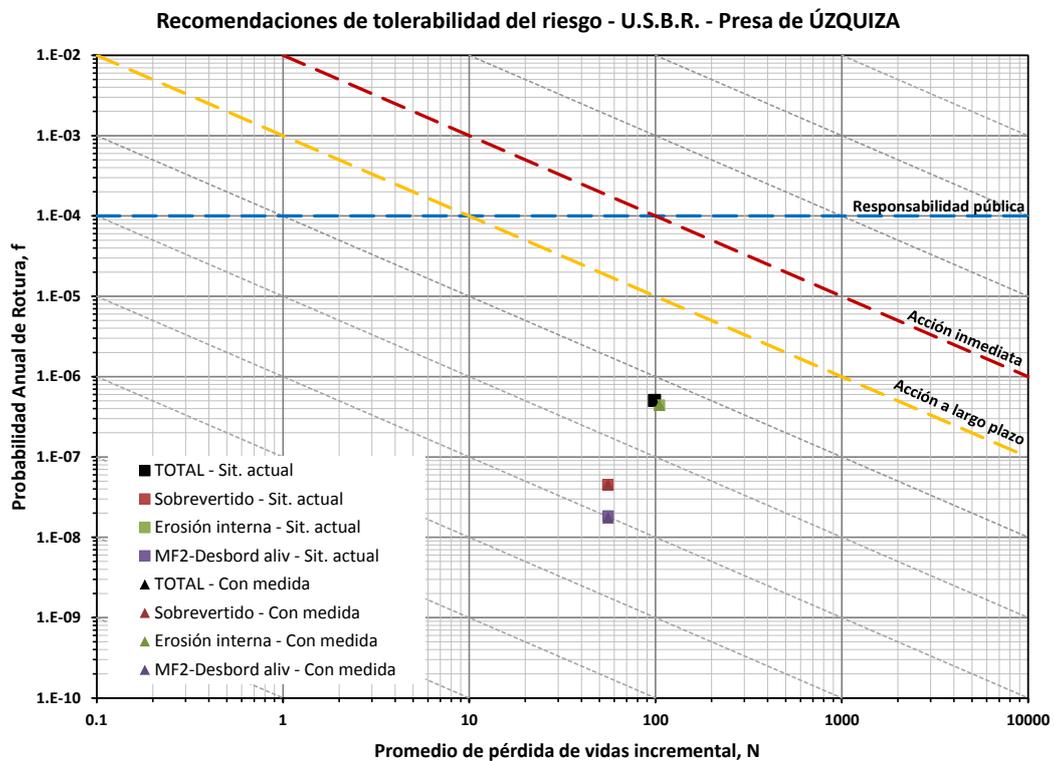


Figura 2.96: Efecto de la reperforación de drenes sobre el riesgo de la presa Z2 en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida disminuye ligeramente la probabilidad de fallo Z1, aunque como el modo de fallo por sobrevertido es el dominante, este efecto es bastante limitado. Por este motivo, la reducción de riesgo en la presa Z2 por esta medida también es bastante limitada.

A2.27.4 Alternativa 4: Refuerzo del pretil de coronación Z1

Esta alternativa consiste en reforzar y realizar un mantenimiento del pretil situado en la coronación de la Presa Z1 con el fin de que tenga suficiente fuerza para resistir el empuje del agua y por lo tanto, no permita que se produzca sobrevertido hasta que el agua pase por encima de él. Según el Informe de Identificación de Modos de Fallo, el pretil continuo de coronación se prolongó deliberadamente en el estribo derecho hasta entrar en contacto con la roca. Además, existe conexión estructural entre el pretil y el cuerpo de presa.

Esta alternativa modifica el modelo de riesgo al cambiar el nivel de coronación, ya que el pretil tiene 1.2 metros de altura. Por lo tanto, al aplicar esta alternativa se considera que se produce sobrevertido únicamente cuando el agua sobrepasa el nivel del pretil, calculando la probabilidad de rotura por sobrevertido a partir de este nivel.

Además, esta alternativa también modifica la laminación, ya que no se producen caudales pro sobrevertido hasta que el nivel de agua supera el pretil.

El coste de reparación del pretil se ha estimado realizando un presupuesto estimativo con las diferentes unidades de obra y equipos necesarios. En total se ha obtenido un coste de implantación de 235,000 €.

En la Figura 2.97 y la Figura 2.98 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de las dos presas cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas.

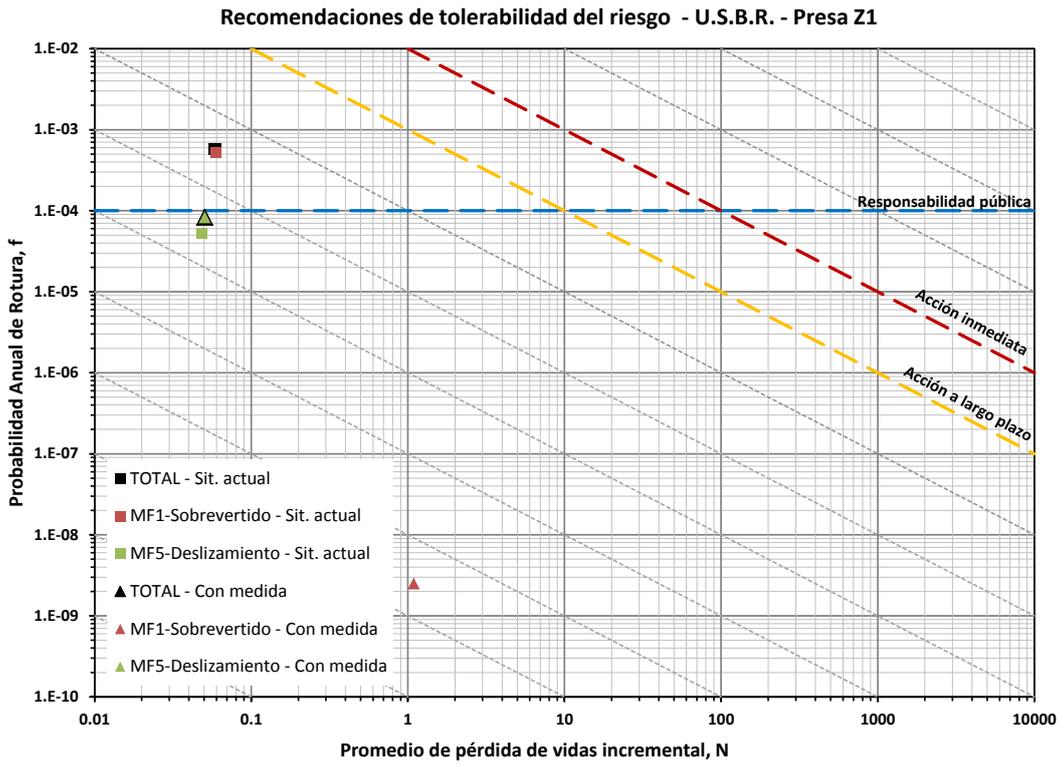


Figura 2.97: Efecto del refuerzo del pretil sobre el riesgo de la presa Z1 en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

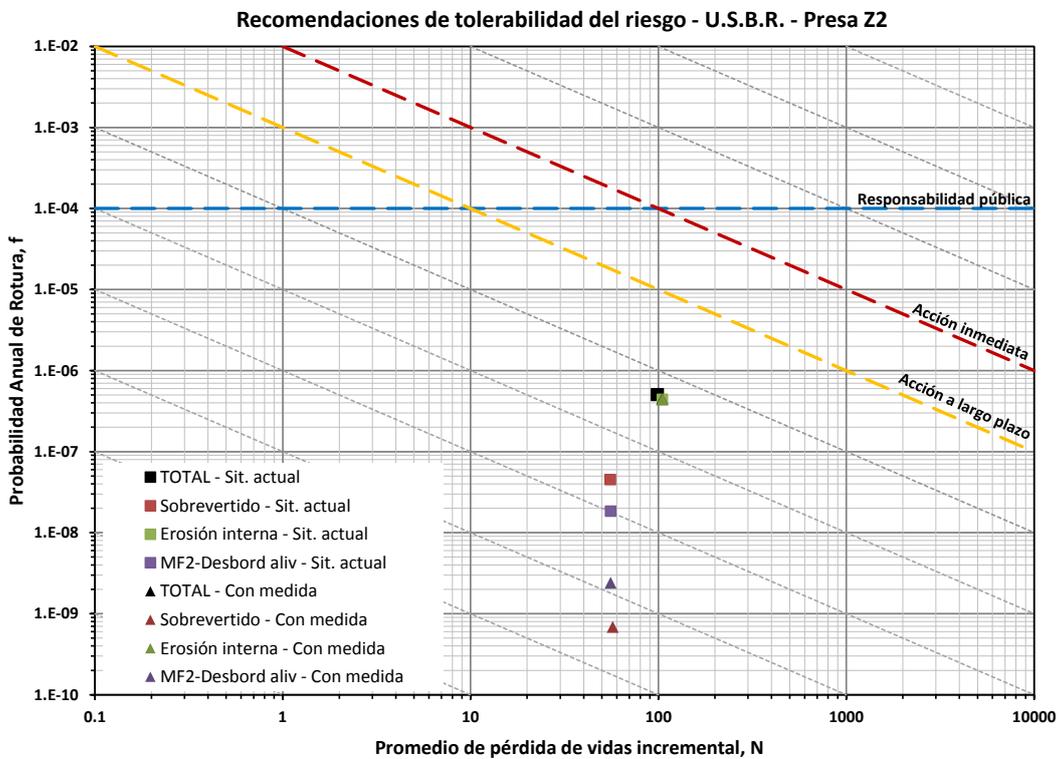


Figura 2.98: Efecto del refuerzo del pretil sobre el riesgo de la presa Z2 en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Como se puede observar en los gráficos anteriores, el refuerzo del pretil disminuye considerablemente el riesgo por sobrevertido en Z1, con lo que el modo de fallo por deslizamiento pasa a ser el dominante y la presa se sitúa por debajo de las recomendaciones de tolerabilidad internacionales. Esta reducción de la probabilidad de fallo Z1 también produce una disminución del riesgo en Z2, especialmente de los modos de fallo por sobrevertido y desbordamiento del aliviadero.

A2.27.5 Alternativa 5: Mejora del aliviadero de Z2 para evitar desbordes

Esta medida surge de las recomendaciones del Informe de Identificación de Modos de Fallo con el fin de reducir la probabilidad del modo de fallo por desbordamiento del aliviadero. Las mejoras que se proponen en el aliviadero para evitar el fallo de la presa por desbordes son:

- Aumento de los cajeros del aliviadero.
- Reparación del hormigón de la solera de aliviadero y renovación en las partes más deterioradas.

Para introducir esta medida en el modelo de riesgo, se ha considerado que si estas mejoras son ejecutadas el modo de fallo por desbordamiento del aliviadero desaparece del modelo de riesgo.

El coste de mejora del aliviadero se ha estimado realizando un presupuesto estimativo con las diferentes unidades de obra y equipos necesarios. En total se ha obtenido un coste de implantación de 865,000 €.

En la Figura 2.99 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa Z2 cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas. Esta medida no afecta de forma importante a la presa Z1, ya que su probabilidad de fallo no cambia al encontrarse aguas arriba y el efecto sobre las consecuencias es muy bajo.

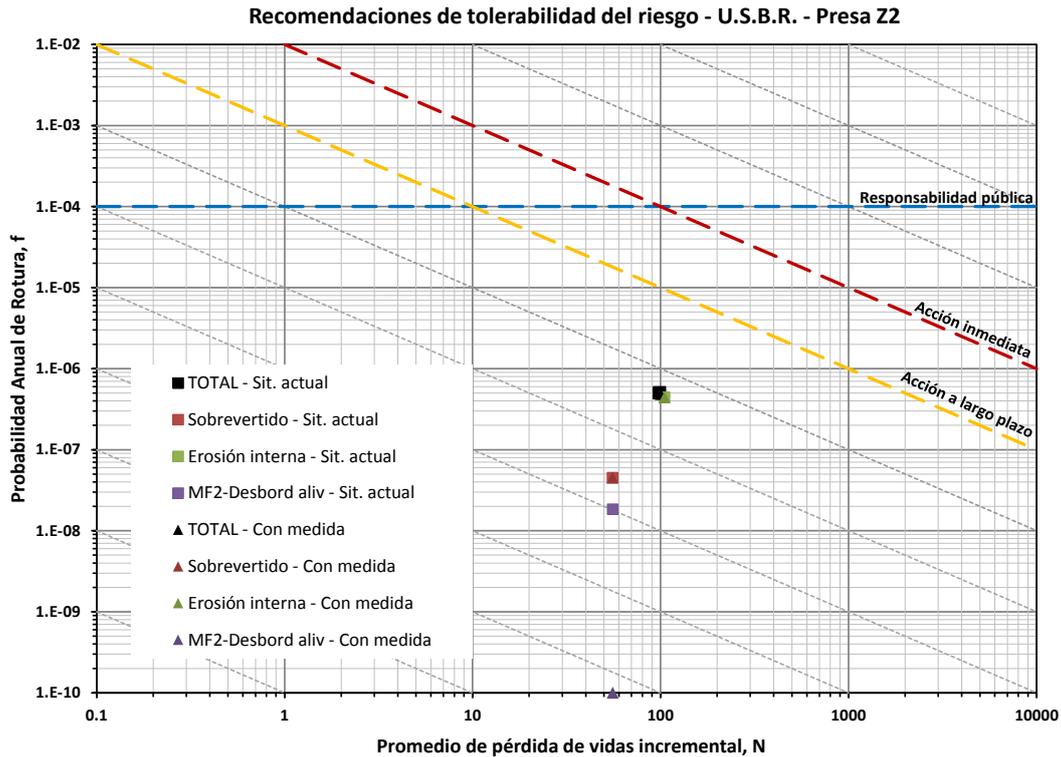


Figura 2.99: Efecto de mejorar el aliviadero sobre el riesgo de la presa Z2 en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida elimina el modo de fallo por desbordamiento del aliviadero, pero no modifica el riesgo en la presa de forma considerable ya que el modo de fallo predominante es la erosión interna.

A2.27.6 Alternativa 6: Mejora de la auscultación hidráulica de Z2

Esta medida surge de las recomendaciones del Informe de Identificación de Modos de Fallo con el fin de mejorar el conocimiento sobre las supresiones en el interior del cuerpo de presa. De esta forma, pueden conocerse las características del flujo y detectar y evitar un posible proceso de erosión interna.

La principal mejora que se propone en la auscultación hidráulica de la presa es recuperar o reemplazar los equipos de auscultación hidráulica y de movimientos que están inoperativos en la actualidad. Especialmente es necesaria la instalación o recuperación de piezómetros en el espaldón de aguas abajo de la presa, de forma que pueda conocerse mejor las características del flujo en esta zona.

Esta medida afecta al nodo de no detección y/o no actuación del modo de fallo por erosión interna, ya que la mejora de la auscultación ayuda a detectar y evitar un proceso de estas características. La probabilidad de este nodo se ha modificado de 17% al 5%.

El coste de mejora del aliviadero se ha estimado realizando un presupuesto estimativo con las diferentes unidades de obra y equipos necesarios. En total se ha obtenido un

coste de implantación de 130,000 €. Además, se ha supuesto que esta mejora de la auscultación y revisión en la presa supone un incremento en el coste de mantenimiento de 6,500 €.

En la Figura 2.100 se muestra el efecto de esta medida sobre cada uno de los modos de fallo de la presa Z2 cuando se vuelve a calcular el riesgo con las modificaciones descritas. Esta medida no afecta de forma importante a la presa Z1, ya que su probabilidad de fallo no cambia al encontrarse aguas arriba y el efecto sobre las consecuencias es muy bajo.

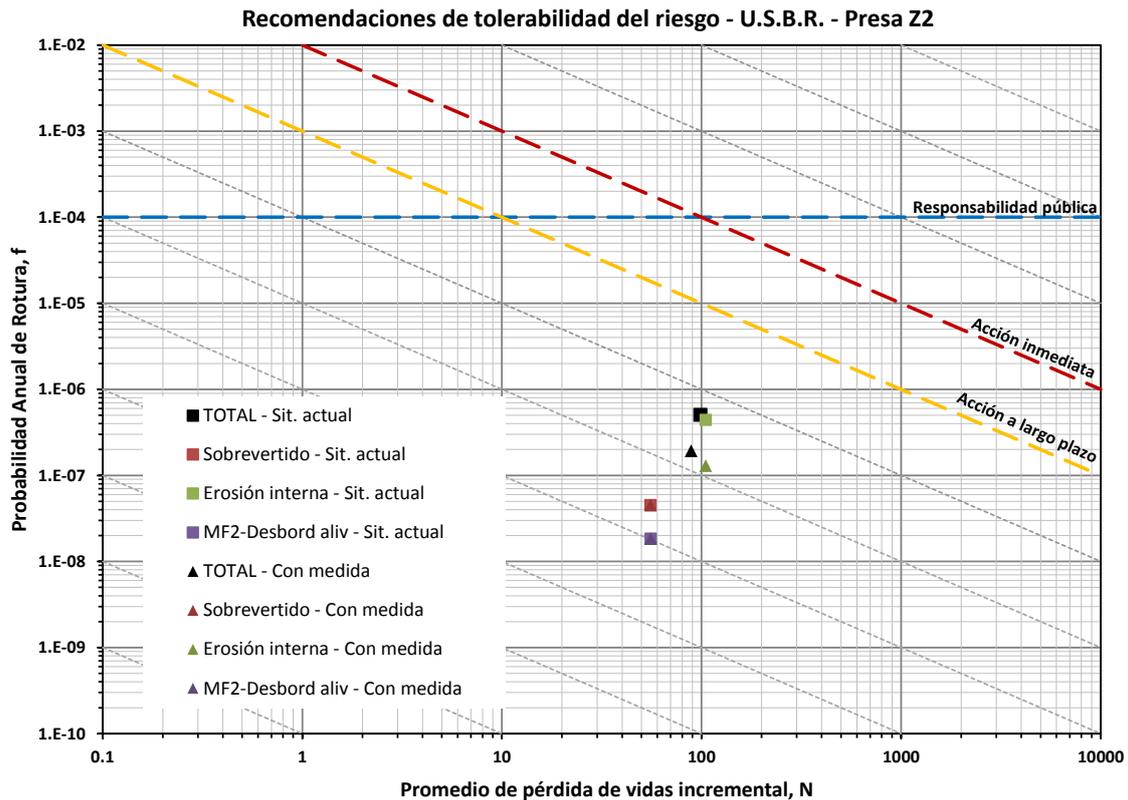
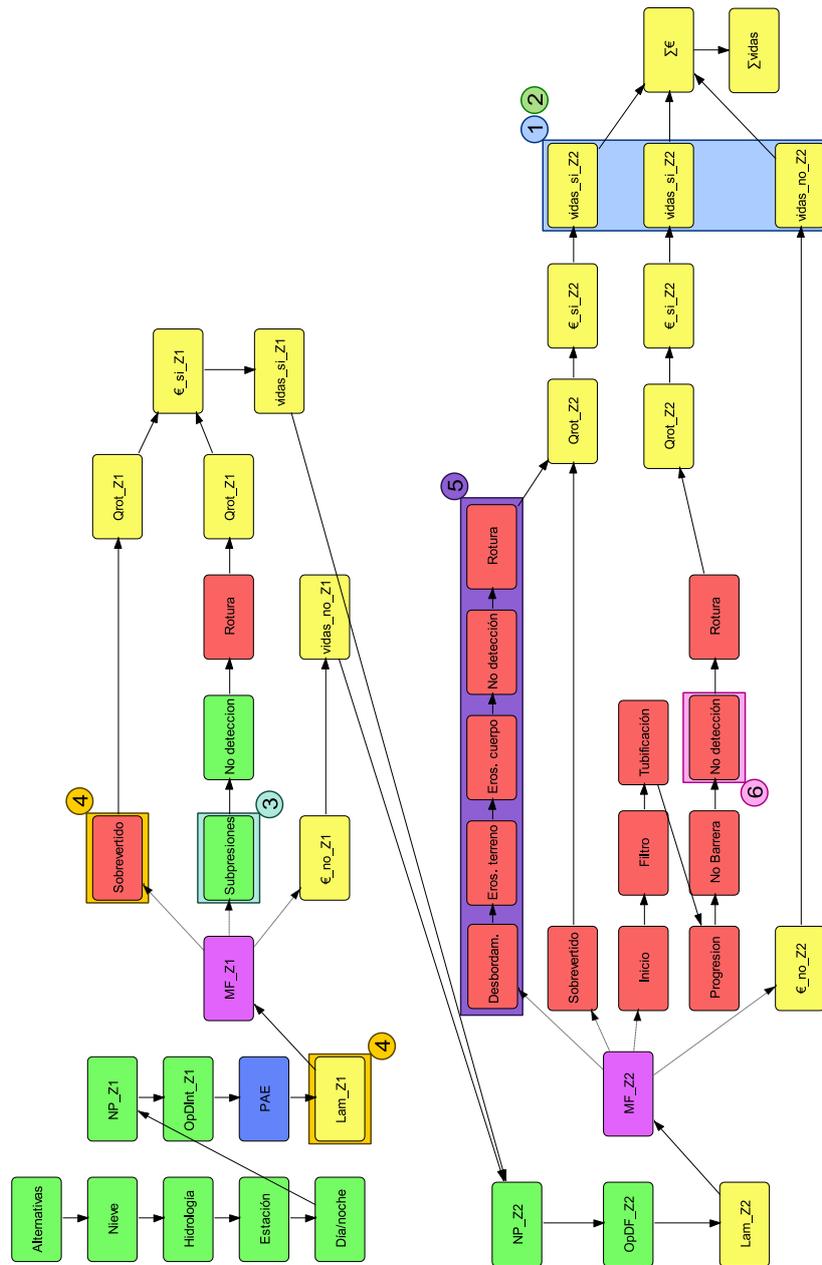


Figura 2.100: Efecto mejorar la auscultación hidráulica sobre el riesgo de la presa Z2 en el gráfico de tolerabilidad propuesto por el USBR (2003).

Esta medida disminuye significativamente el riesgo del modo de fallo de erosión interna, que como es el dominante en la presa Z2, la disminución de su riesgo también produce una disminución del riesgo de la presa.

A2.27.7 Resumen



| | COSTE | |
|---|------------------|-----------------------|
| | Implantación (€) | Mantenimiento (€/año) |
| 1 Plan de Emergencia | 661,210 | 33,060 |
| 2 Complementar el Plan de Emergencia con un Programa de Formación Continua a la población | 661,210 | 66,122 |
| 3 Reperforación de drenes en Z1 | 112,333 | - |
| 4 Refuerzo del pretil de coronación de Z1 | 235,000 | - |
| 5 Mejora del aliviadero de Z2 para evitar desbordes | 865,000 | - |
| 6 Mejora de la auscultación hidráulica en Z2 | 130,000 | 6,500 |

Figura 2.101: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medidas de reducción de riesgo planteadas en el sistema Z.

ANEJO 3 SECUENCIAS DE IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS PARA DIFERENTES INDICADORES DE RIESGO

A3.1 Secuencia obtenida con el indicador CSLS

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | - | - | 0.000 | 2.55E-02 | 1.76E+00 | 2.85E-01 |
| 1 | A | VACIO | 0.000 | 2.50E-02 | 1.75E+00 | 2.27E-01 |
| 2 | I | RESG | 0.000 | 2.49E-02 | 1.75E+00 | 2.26E-01 |
| 3 | Q | RESG | 0.000 | 2.47E-02 | 1.73E+00 | 1.78E-01 |
| 4 | O | RESG | 0.001 | 2.37E-02 | 1.21E+00 | 1.04E-01 |
| 5 | D | DET | 0.008 | 1.06E-02 | 6.57E-01 | 9.17E-02 |
| 6 | Q | PRE | 0.016 | 1.05E-02 | 6.54E-01 | 8.43E-02 |
| 7 | J | EH | 0.038 | 1.05E-02 | 6.53E-01 | 6.99E-02 |
| 8 | O | PEP | 0.097 | 1.05E-02 | 6.53E-01 | 3.52E-02 |
| 9 | D | FUSERV | 0.113 | 4.54E-03 | 4.02E-01 | 2.94E-02 |
| 10 | I | PRE | 0.117 | 4.53E-03 | 4.02E-01 | 2.78E-02 |
| 11 | O | PFC | 0.148 | 4.53E-03 | 4.02E-01 | 1.81E-02 |
| 12 | R | AUS | 0.151 | 4.53E-03 | 4.01E-01 | 1.78E-02 |
| 13 | R | GRU | 0.154 | 4.53E-03 | 4.01E-01 | 1.75E-02 |
| 14 | J | DREN | 0.194 | 4.53E-03 | 4.01E-01 | 1.50E-02 |
| 15 | Q | DF | 0.200 | 4.53E-03 | 4.01E-01 | 1.47E-02 |
| 16 | A | PEP | 0.279 | 4.53E-03 | 4.01E-01 | 1.13E-02 |
| 17 | C | INYCIM | 0.284 | 4.53E-03 | 4.00E-01 | 1.12E-02 |
| 18 | C | INYCU | 0.284 | 4.53E-03 | 4.00E-01 | 1.12E-02 |
| 19 | Q | PEP | 0.372 | 4.53E-03 | 4.00E-01 | 8.64E-03 |
| 20 | Q | PFC | 0.416 | 4.53E-03 | 4.00E-01 | 7.65E-03 |
| 21 | A | PFC | 0.456 | 4.53E-03 | 4.00E-01 | 6.86E-03 |
| 22 | G | PEP | 0.508 | 4.53E-03 | 4.00E-01 | 5.99E-03 |
| 23 | C | COMP | 0.538 | 4.53E-03 | 3.98E-01 | 5.59E-03 |
| 24 | O | COMP | 0.667 | 4.18E-03 | 2.11E-01 | 3.91E-03 |
| 25 | U | PEP | 0.726 | 4.18E-03 | 2.11E-01 | 3.53E-03 |
| 26 | O | ALIV | 0.827 | 4.06E-03 | 1.45E-01 | 2.94E-03 |
| 27 | U | PFC | 0.857 | 4.06E-03 | 1.45E-01 | 2.81E-03 |
| 28 | G | PFC | 0.883 | 4.06E-03 | 1.45E-01 | 2.71E-03 |
| 29 | Z | PRET | 0.895 | 3.56E-03 | 1.24E-01 | 2.67E-03 |
| 30 | Z | AUS | 0.908 | 3.56E-03 | 1.24E-01 | 2.64E-03 |
| 31 | B | PEP | 1.006 | 3.56E-03 | 1.24E-01 | 2.40E-03 |
| 32 | B | PFC | 1.056 | 3.56E-03 | 1.24E-01 | 2.23E-03 |
| 33 | R | PEP | 1.136 | 3.56E-03 | 1.24E-01 | 2.05E-03 |
| 34 | T | PEP | 1.176 | 3.56E-03 | 1.24E-01 | 1.98E-03 |
| 35 | R | PFC | 1.216 | 3.56E-03 | 1.24E-01 | 1.93E-03 |
| 36 | P | PEP | 1.264 | 3.56E-03 | 1.24E-01 | 1.86E-03 |
| 37 | H | PFC | 1.294 | 3.56E-03 | 1.24E-01 | 1.82E-03 |
| 38 | J | PEP | 1.343 | 3.56E-03 | 1.24E-01 | 1.76E-03 |
| 39 | T | PFC | 1.363 | 3.56E-03 | 1.24E-01 | 1.73E-03 |
| 40 | P | PFC | 1.388 | 3.56E-03 | 1.24E-01 | 1.71E-03 |
| 41 | Y | PEP | 1.438 | 3.56E-03 | 1.24E-01 | 1.67E-03 |
| 42 | E | COMP | 1.476 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.64E-03 |
| 43 | A | AUS | 1.480 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.64E-03 |
| 44 | A | LALIV | 1.622 | 1.50E-03 | 7.04E-02 | 1.57E-03 |

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 45 | C | PEP | 1.703 | 1.50E-03 | 7.04E-02 | 1.52E-03 |
| 46 | C | PFC | 1.744 | 1.50E-03 | 7.04E-02 | 1.50E-03 |
| 47 | B | EIDC | 1.895 | 9.42E-04 | 6.73E-02 | 1.42E-03 |
| 48 | Z | DREN | 1.900 | 8.92E-04 | 6.53E-02 | 1.42E-03 |
| 49 | Y | PFC | 1.926 | 8.92E-04 | 6.53E-02 | 1.41E-03 |
| 50 | T | ALIV | 2.094 | 7.98E-04 | 5.80E-02 | 1.35E-03 |
| 51 | X | PEP | 2.131 | 7.98E-04 | 5.80E-02 | 1.34E-03 |
| 52 | X | PFC | 2.149 | 7.98E-04 | 5.80E-02 | 1.34E-03 |
| 53 | E | CUEN | 2.180 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.33E-03 |
| 54 | Z | PEP | 2.246 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.32E-03 |
| 55 | V | AUS | 2.301 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 56 | Z | PFC | 2.334 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 57 | I | DFI | 2.345 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 58 | K | COMP | 2.374 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.31E-03 |
| 59 | H | PIL | 3.400 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 60 | F | PEP | 3.418 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 61 | W | AUS | 3.424 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 62 | P | INY | 3.436 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 63 | X | DF | 3.522 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 64 | V | PEP | 3.587 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 65 | V | PFC | 3.620 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 66 | I | ALIV | 3.647 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 67 | Y | DC1 | 3.651 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 68 | K | PEP | 3.684 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 69 | N | PEP | 3.719 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 70 | N | PFC | 3.736 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 71 | K | PFC | 3.753 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 72 | F | DREN | 3.793 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 73 | Z | ALIV | 3.835 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 74 | G | INY | 3.841 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 75 | M | COMP | 3.862 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 76 | T | AUS | 3.867 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 77 | I | PEP | 3.915 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 78 | I | PFC | 3.939 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 79 | W | PEP | 3.991 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 80 | W | PFC | 4.018 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 81 | F | EH | 4.194 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 82 | M | PEP | 4.263 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 83 | M | PFC | 4.298 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 84 | M | INY | 4.304 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 85 | S | DF | 4.308 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 86 | S | PEP | 4.343 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 87 | S | PFC | 4.360 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 88 | L | PFC | 4.400 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 89 | U | DC | 4.446 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |

A3.2 Secuencia obtenida con el indicador ACSLS

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | - | - | 0.000 | 2.55E-02 | 1.76E+00 | 2.85E-01 |
| 1 | O | COMP | 0.129 | 2.43E-02 | 1.13E+00 | 1.91E-01 |
| 2 | D | FUSERV | 0.144 | 5.22E-03 | 3.32E-01 | 1.72E-01 |
| 3 | Q | RESG | 0.144 | 4.95E-03 | 3.11E-01 | 1.24E-01 |
| 4 | O | RESG | 0.145 | 4.79E-03 | 2.29E-01 | 1.13E-01 |
| 5 | A | VACIO | 0.145 | 4.26E-03 | 2.20E-01 | 5.54E-02 |
| 6 | I | RESG | 0.145 | 4.25E-03 | 2.20E-01 | 5.40E-02 |
| 7 | E | COMP | 0.183 | 2.21E-03 | 1.67E-01 | 5.40E-02 |
| 8 | Z | PRET | 0.194 | 1.72E-03 | 1.46E-01 | 5.39E-02 |
| 9 | Q | PRE | 0.202 | 1.68E-03 | 1.43E-01 | 4.66E-02 |
| 10 | J | EH | 0.224 | 1.67E-03 | 1.42E-01 | 3.22E-02 |
| 11 | I | PRE | 0.229 | 1.66E-03 | 1.41E-01 | 3.06E-02 |
| 12 | O | ALIV | 0.329 | 1.53E-03 | 7.50E-02 | 1.96E-02 |
| 13 | R | AUS | 0.333 | 1.53E-03 | 7.47E-02 | 1.92E-02 |
| 14 | R | GRU | 0.335 | 1.53E-03 | 7.45E-02 | 1.90E-02 |
| 15 | J | DREN | 0.376 | 1.53E-03 | 7.44E-02 | 1.64E-02 |
| 16 | O | PEP | 0.435 | 1.53E-03 | 7.44E-02 | 1.35E-02 |
| 17 | Q | DF | 0.441 | 1.53E-03 | 7.43E-02 | 1.32E-02 |
| 18 | A | PEP | 0.520 | 1.53E-03 | 7.43E-02 | 9.81E-03 |
| 19 | C | INYCIM | 0.525 | 1.53E-03 | 7.34E-02 | 9.68E-03 |
| 20 | C | INYCU | 0.525 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 9.65E-03 |
| 21 | Q | PEP | 0.612 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 7.13E-03 |
| 22 | O | PFC | 0.643 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 6.31E-03 |
| 23 | Q | PFC | 0.687 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 5.32E-03 |
| 24 | A | PFC | 0.727 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 4.53E-03 |
| 25 | G | PEP | 0.779 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 3.66E-03 |
| 26 | C | COMP | 0.809 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 3.26E-03 |
| 27 | U | PEP | 0.869 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 2.88E-03 |
| 28 | U | PFC | 0.899 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 2.75E-03 |
| 29 | G | PFC | 0.926 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 2.65E-03 |
| 30 | Z | AUS | 0.938 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 2.62E-03 |
| 31 | B | PEP | 1.037 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 2.37E-03 |
| 32 | B | PFC | 1.087 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 2.20E-03 |
| 33 | R | PEP | 1.167 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 2.02E-03 |
| 34 | T | PEP | 1.207 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.96E-03 |
| 35 | R | PFC | 1.247 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.90E-03 |
| 36 | P | PEP | 1.295 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.83E-03 |
| 37 | H | PFC | 1.325 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.80E-03 |
| 38 | J | PEP | 1.374 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.73E-03 |
| 39 | T | PFC | 1.394 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.71E-03 |
| 40 | P | PFC | 1.418 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.68E-03 |
| 41 | Y | PEP | 1.469 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.64E-03 |
| 42 | Z | DREN | 1.475 | 1.47E-03 | 6.88E-02 | 1.64E-03 |
| 43 | A | AUS | 1.479 | 1.47E-03 | 6.88E-02 | 1.64E-03 |
| 44 | A | LALIV | 1.620 | 1.45E-03 | 6.84E-02 | 1.56E-03 |

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 45 | C | PEP | 1.702 | 1.45E-03 | 6.84E-02 | 1.52E-03 |
| 46 | C | PFC | 1.743 | 1.45E-03 | 6.84E-02 | 1.50E-03 |
| 47 | B | EIDC | 1.894 | 8.92E-04 | 6.53E-02 | 1.42E-03 |
| 48 | Y | PFC | 1.919 | 8.92E-04 | 6.53E-02 | 1.41E-03 |
| 49 | T | ALIV | 2.088 | 7.98E-04 | 5.80E-02 | 1.35E-03 |
| 50 | X | PEP | 2.124 | 7.98E-04 | 5.80E-02 | 1.34E-03 |
| 51 | E | CUEN | 2.155 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.34E-03 |
| 52 | X | PFC | 2.174 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.33E-03 |
| 53 | Z | PEP | 2.239 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.32E-03 |
| 54 | V | AUS | 2.294 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 55 | Z | PFC | 2.327 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 56 | I | DFI | 2.338 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 57 | K | COMP | 2.367 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.31E-03 |
| 58 | H | PIL | 3.394 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 59 | F | PEP | 3.411 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 60 | W | AUS | 3.417 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 61 | P | INY | 3.429 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 62 | X | DF | 3.515 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 63 | V | PEP | 3.580 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 64 | V | PFC | 3.613 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 65 | I | ALIV | 3.640 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 66 | Y | DC1 | 3.644 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 67 | K | PEP | 3.677 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 68 | N | PEP | 3.712 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 69 | N | PFC | 3.729 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 70 | K | PFC | 3.746 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 71 | F | DREN | 3.786 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 72 | Z | ALIV | 3.828 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 73 | G | INY | 3.834 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 74 | M | COMP | 3.855 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 75 | T | AUS | 3.860 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 76 | I | PEP | 3.908 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 77 | I | PFC | 3.932 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 78 | W | PEP | 3.985 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 79 | W | PFC | 4.011 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 80 | F | EH | 4.187 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 81 | M | PEP | 4.256 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 82 | M | PFC | 4.291 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 83 | M | INY | 4.297 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 84 | S | DF | 4.301 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 85 | S | PEP | 4.336 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 86 | S | PFC | 4.353 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 87 | L | PFC | 4.393 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 88 | U | DC | 4.439 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 89 | S | DF | 4.446 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |

A3.3 Secuencia obtenida con el indicador SRDI

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | - | - | 0.000 | 2.55E-02 | 1.76E+00 | 2.85E-01 |
| 1 | O | COMP | 0.129 | 2.43E-02 | 1.13E+00 | 1.91E-01 |
| 2 | A | VACIO | 0.129 | 2.38E-02 | 1.13E+00 | 1.33E-01 |
| 3 | Q | PRE | 0.137 | 2.35E-02 | 1.10E+00 | 8.36E-02 |
| 4 | O | PEP | 0.196 | 2.35E-02 | 1.10E+00 | 6.41E-02 |
| 5 | D | FUSERV | 0.212 | 4.41E-03 | 3.02E-01 | 4.56E-02 |
| 6 | J | DREN | 0.252 | 4.40E-03 | 3.01E-01 | 3.06E-02 |
| 7 | Q | PEP | 0.339 | 4.40E-03 | 3.01E-01 | 2.42E-02 |
| 8 | O | PFC | 0.369 | 4.40E-03 | 3.01E-01 | 1.88E-02 |
| 9 | A | PEP | 0.448 | 4.40E-03 | 3.01E-01 | 1.53E-02 |
| 10 | I | PRE | 0.453 | 4.38E-03 | 3.00E-01 | 1.24E-02 |
| 11 | Q | PFC | 0.497 | 4.38E-03 | 3.00E-01 | 9.88E-03 |
| 12 | J | EH | 0.519 | 4.38E-03 | 3.00E-01 | 8.02E-03 |
| 13 | O | ALIV | 0.619 | 4.16E-03 | 1.83E-01 | 7.06E-03 |
| 14 | G | PEP | 0.671 | 4.16E-03 | 1.83E-01 | 6.20E-03 |
| 15 | A | PFC | 0.711 | 4.16E-03 | 1.83E-01 | 5.40E-03 |
| 16 | Q | RESG | 0.711 | 4.12E-03 | 1.81E-01 | 4.74E-03 |
| 17 | R | PEP | 0.791 | 4.12E-03 | 1.81E-01 | 4.21E-03 |
| 18 | C | COMP | 0.821 | 4.12E-03 | 1.79E-01 | 3.81E-03 |
| 19 | U | PEP | 0.881 | 4.12E-03 | 1.79E-01 | 3.44E-03 |
| 20 | O | RESG | 0.882 | 4.06E-03 | 1.46E-01 | 3.19E-03 |
| 21 | B | PEP | 0.981 | 4.06E-03 | 1.46E-01 | 2.95E-03 |
| 22 | R | PFC | 1.021 | 4.06E-03 | 1.46E-01 | 2.78E-03 |
| 23 | B | PFC | 1.071 | 4.06E-03 | 1.46E-01 | 2.60E-03 |
| 24 | C | INYCIM | 1.075 | 4.06E-03 | 1.45E-01 | 2.47E-03 |
| 25 | U | PFC | 1.105 | 4.06E-03 | 1.45E-01 | 2.34E-03 |
| 26 | G | PFC | 1.132 | 4.06E-03 | 1.45E-01 | 2.24E-03 |
| 27 | T | ALIV | 1.300 | 3.97E-03 | 1.38E-01 | 2.13E-03 |
| 28 | A | LALIV | 1.442 | 3.94E-03 | 1.38E-01 | 2.06E-03 |
| 29 | B | EIDC | 1.593 | 3.38E-03 | 1.35E-01 | 1.98E-03 |
| 30 | P | PEP | 1.640 | 3.38E-03 | 1.35E-01 | 1.91E-03 |
| 31 | R | AUS | 1.644 | 3.38E-03 | 1.34E-01 | 1.85E-03 |
| 32 | J | PEP | 1.694 | 3.38E-03 | 1.34E-01 | 1.79E-03 |
| 33 | Z | PEP | 1.759 | 3.38E-03 | 1.34E-01 | 1.73E-03 |
| 34 | C | PEP | 1.840 | 3.38E-03 | 1.34E-01 | 1.68E-03 |
| 35 | H | PIL | 2.867 | 3.38E-03 | 1.34E-01 | 1.63E-03 |
| 36 | R | GRU | 2.869 | 3.38E-03 | 1.34E-01 | 1.58E-03 |
| 37 | Y | PEP | 2.920 | 3.38E-03 | 1.34E-01 | 1.54E-03 |
| 38 | Q | DF | 2.926 | 3.38E-03 | 1.34E-01 | 1.51E-03 |
| 39 | C | PFC | 2.967 | 3.38E-03 | 1.34E-01 | 1.48E-03 |
| 40 | T | PEP | 3.007 | 3.38E-03 | 1.34E-01 | 1.45E-03 |
| 41 | E | COMP | 3.044 | 1.35E-03 | 8.09E-02 | 1.42E-03 |
| 42 | P | PFC | 3.069 | 1.35E-03 | 8.09E-02 | 1.40E-03 |
| 43 | C | INYCU | 3.069 | 1.35E-03 | 8.08E-02 | 1.38E-03 |
| 44 | Z | PRET | 3.081 | 8.48E-04 | 6.03E-02 | 1.37E-03 |

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 45 | X | PEP | 3.117 | 8.48E-04 | 6.03E-02 | 1.36E-03 |
| 46 | Y | PFC | 3.143 | 8.48E-04 | 6.03E-02 | 1.35E-03 |
| 47 | I | RESG | 3.143 | 8.48E-04 | 6.03E-02 | 1.34E-03 |
| 48 | T | PFC | 3.163 | 8.48E-04 | 6.03E-02 | 1.33E-03 |
| 49 | Z | AUS | 3.176 | 8.48E-04 | 6.00E-02 | 1.32E-03 |
| 50 | E | CUEN | 3.207 | 5.12E-04 | 5.14E-02 | 1.32E-03 |
| 51 | X | PFC | 3.226 | 5.12E-04 | 5.14E-02 | 1.31E-03 |
| 52 | V | AUS | 3.281 | 5.10E-04 | 5.11E-02 | 1.31E-03 |
| 53 | H | PFC | 3.311 | 5.10E-04 | 5.11E-02 | 1.31E-03 |
| 54 | Z | PFC | 3.344 | 5.10E-04 | 5.11E-02 | 1.30E-03 |
| 55 | K | COMP | 3.373 | 5.09E-04 | 5.11E-02 | 1.30E-03 |
| 56 | A | AUS | 3.377 | 5.09E-04 | 5.11E-02 | 1.30E-03 |
| 57 | Z | DREN | 3.382 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 58 | I | ALIV | 3.410 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 59 | X | DF | 3.496 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 60 | F | DREN | 3.536 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 61 | V | PEP | 3.601 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 62 | V | PFC | 3.634 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 63 | P | INY | 3.646 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 64 | K | PEP | 3.678 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 65 | N | PEP | 3.713 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 66 | N | PFC | 3.731 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 67 | Z | ALIV | 3.773 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 68 | W | AUS | 3.779 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 69 | K | PFC | 3.795 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 70 | I | DFI | 3.806 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 71 | Y | DC1 | 3.811 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 72 | M | COMP | 3.832 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 73 | F | EH | 4.008 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 74 | G | INY | 4.014 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 75 | I | PEP | 4.061 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 76 | T | AUS | 4.067 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 77 | I | PFC | 4.091 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 78 | W | PEP | 4.143 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 79 | W | PFC | 4.170 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 80 | M | PEP | 4.238 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 81 | F | PEP | 4.256 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 82 | M | PFC | 4.291 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 83 | M | INY | 4.297 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 84 | U | DC | 4.343 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 85 | L | PFC | 4.383 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 86 | S | PEP | 4.418 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 87 | S | PFC | 4.435 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 88 | S | DF | 4.439 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |

A3.4 Secuencia obtenida con el indicador FPD1

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | - | - | 0.000 | 2.55E-02 | 1.76E+00 | 2.85E-01 |
| 1 | D | FUSERV | 0.015 | 6.40E-03 | 9.61E-01 | 2.66E-01 |
| 2 | E | COMP | 0.053 | 4.37E-03 | 9.08E-01 | 2.66E-01 |
| 3 | O | COMP | 0.182 | 3.18E-03 | 2.79E-01 | 1.72E-01 |
| 4 | B | EIDC | 0.332 | 2.63E-03 | 2.76E-01 | 1.72E-01 |
| 5 | A | VACIO | 0.332 | 2.10E-03 | 2.68E-01 | 1.15E-01 |
| 6 | Z | PRET | 0.344 | 1.60E-03 | 2.47E-01 | 1.15E-01 |
| 7 | E | CUEN | 0.375 | 1.26E-03 | 2.39E-01 | 1.15E-01 |
| 8 | Q | PRE | 0.383 | 9.81E-04 | 2.17E-01 | 6.49E-02 |
| 9 | O | ALIV | 0.483 | 7.59E-04 | 1.01E-01 | 4.70E-02 |
| 10 | T | ALIV | 0.652 | 6.65E-04 | 9.34E-02 | 4.69E-02 |
| 11 | O | RESG | 0.653 | 6.02E-04 | 6.08E-02 | 4.24E-02 |
| 12 | Z | DREN | 0.658 | 5.52E-04 | 5.88E-02 | 4.24E-02 |
| 13 | Q | RESG | 0.658 | 5.21E-04 | 5.64E-02 | 3.67E-02 |
| 14 | A | LALIV | 0.800 | 4.96E-04 | 5.60E-02 | 3.40E-02 |
| 15 | I | PRE | 0.805 | 4.77E-04 | 5.45E-02 | 3.10E-02 |
| 16 | J | DREN | 0.845 | 4.68E-04 | 5.35E-02 | 1.59E-02 |
| 17 | V | AUS | 0.900 | 4.66E-04 | 5.32E-02 | 1.59E-02 |
| 18 | Q | DF | 0.906 | 4.64E-04 | 5.31E-02 | 1.56E-02 |
| 19 | C | COMP | 0.936 | 4.63E-04 | 5.09E-02 | 1.52E-02 |
| 20 | J | EH | 0.958 | 4.62E-04 | 5.08E-02 | 1.34E-02 |
| 21 | C | INYCIM | 0.962 | 4.61E-04 | 5.00E-02 | 1.32E-02 |
| 22 | X | DF | 1.048 | 4.60E-04 | 5.00E-02 | 1.32E-02 |
| 23 | R | AUS | 1.052 | 4.60E-04 | 4.97E-02 | 1.29E-02 |
| 24 | Z | AUS | 1.065 | 4.60E-04 | 4.94E-02 | 1.29E-02 |
| 25 | W | AUS | 1.071 | 4.60E-04 | 4.94E-02 | 1.29E-02 |
| 26 | R | GRU | 1.073 | 4.59E-04 | 4.92E-02 | 1.26E-02 |
| 27 | H | PIL | 2.100 | 4.59E-04 | 4.92E-02 | 1.26E-02 |
| 28 | C | INYCU | 2.101 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.26E-02 |
| 29 | I | RESG | 2.101 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 30 | K | COMP | 2.129 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 31 | A | AUS | 2.133 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 32 | F | DREN | 2.174 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 33 | P | INY | 2.186 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 34 | I | ALIV | 2.213 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 35 | Y | DC1 | 2.217 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 36 | Z | ALIV | 2.260 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 37 | T | AUS | 2.265 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 38 | G | INY | 2.271 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 39 | I | DFI | 2.282 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 40 | F | EH | 2.458 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 41 | M | COMP | 2.479 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 42 | M | INY | 2.486 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 43 | A | PEP | 2.565 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.13E-02 |
| 44 | A | PFC | 2.605 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.10E-02 |

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 45 | B | PEP | 2.703 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.07E-02 |
| 46 | B | PFC | 2.753 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.06E-02 |
| 47 | G | PEP | 2.806 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 9.76E-03 |
| 48 | G | PFC | 2.832 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 9.65E-03 |
| 49 | C | PEP | 2.914 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 9.61E-03 |
| 50 | C | PFC | 2.955 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 9.58E-03 |
| 51 | F | PEP | 2.973 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 9.58E-03 |
| 52 | H | PFC | 3.003 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 9.58E-03 |
| 53 | I | PEP | 3.050 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 9.58E-03 |
| 54 | I | PFC | 3.074 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 9.58E-03 |
| 55 | Q | PEP | 3.162 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 7.07E-03 |
| 56 | Q | PFC | 3.206 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 6.07E-03 |
| 57 | J | PEP | 3.255 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 6.01E-03 |
| 58 | K | PEP | 3.288 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 6.01E-03 |
| 59 | K | PFC | 3.304 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 6.01E-03 |
| 60 | N | PEP | 3.339 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 6.01E-03 |
| 61 | N | PFC | 3.356 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 6.01E-03 |
| 62 | M | PEP | 3.425 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 6.01E-03 |
| 63 | M | PFC | 3.460 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 6.01E-03 |
| 64 | O | PEP | 3.519 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 3.07E-03 |
| 65 | O | PFC | 3.549 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 2.25E-03 |
| 66 | P | PEP | 3.597 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 2.19E-03 |
| 67 | P | PFC | 3.621 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 2.16E-03 |
| 68 | R | PEP | 3.701 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.98E-03 |
| 69 | R | PFC | 3.741 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.92E-03 |
| 70 | T | PEP | 3.782 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.89E-03 |
| 71 | T | PFC | 3.802 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.89E-03 |
| 72 | U | PEP | 3.861 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.51E-03 |
| 73 | U | PFC | 3.891 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.38E-03 |
| 74 | U | DC | 3.937 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.38E-03 |
| 75 | V | PEP | 4.002 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.38E-03 |
| 76 | V | PFC | 4.035 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.38E-03 |
| 77 | Y | PEP | 4.086 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.34E-03 |
| 78 | Y | PFC | 4.111 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.33E-03 |
| 79 | W | PEP | 4.164 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.33E-03 |
| 80 | W | PFC | 4.190 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.33E-03 |
| 81 | X | PEP | 4.226 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.32E-03 |
| 82 | X | PFC | 4.245 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.31E-03 |
| 83 | Z | PEP | 4.310 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 84 | Z | PFC | 4.343 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 85 | L | PFC | 4.383 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 86 | S | PEP | 4.418 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 87 | S | PFC | 4.435 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 88 | S | DF | 4.439 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |

A3.5 Secuencia obtenida con el indicador CSFP

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | - | - | 0.000 | 2.55E-02 | 1.76E+00 | 2.85E-01 |
| 1 | A | VACIO | 0.000 | 2.50E-02 | 1.75E+00 | 2.27E-01 |
| 2 | I | RESG | 0.000 | 2.49E-02 | 1.75E+00 | 2.26E-01 |
| 3 | Q | RESG | 0.000 | 2.47E-02 | 1.73E+00 | 1.78E-01 |
| 4 | D | DET | 0.007 | 1.16E-02 | 1.18E+00 | 1.65E-01 |
| 5 | O | RESG | 0.008 | 1.06E-02 | 6.57E-01 | 9.17E-02 |
| 6 | D | FUSERV | 0.023 | 4.59E-03 | 4.06E-01 | 8.59E-02 |
| 7 | E | COMP | 0.061 | 2.56E-03 | 3.53E-01 | 8.59E-02 |
| 8 | Z | PRET | 0.073 | 2.06E-03 | 3.33E-01 | 8.59E-02 |
| 9 | E | CUEN | 0.104 | 1.73E-03 | 3.24E-01 | 8.58E-02 |
| 10 | Z | DREN | 0.109 | 1.68E-03 | 3.22E-01 | 8.58E-02 |
| 11 | Q | PRE | 0.117 | 1.63E-03 | 3.19E-01 | 7.85E-02 |
| 12 | B | EIDC | 0.268 | 1.08E-03 | 3.16E-01 | 7.83E-02 |
| 13 | O | COMP | 0.397 | 7.32E-04 | 1.29E-01 | 4.64E-02 |
| 14 | I | PRE | 0.401 | 7.22E-04 | 1.29E-01 | 4.48E-02 |
| 15 | O | ALIV | 0.502 | 5.95E-04 | 6.21E-02 | 3.38E-02 |
| 16 | T | ALIV | 0.670 | 5.01E-04 | 5.49E-02 | 3.37E-02 |
| 17 | J | EH | 0.692 | 4.93E-04 | 5.40E-02 | 1.93E-02 |
| 18 | Q | DF | 0.697 | 4.92E-04 | 5.38E-02 | 1.90E-02 |
| 19 | A | LALIV | 0.839 | 4.67E-04 | 5.35E-02 | 1.63E-02 |
| 20 | C | INYCIM | 0.844 | 4.66E-04 | 5.26E-02 | 1.62E-02 |
| 21 | C | INYCU | 0.844 | 4.66E-04 | 5.25E-02 | 1.62E-02 |
| 22 | R | AUS | 0.848 | 4.66E-04 | 5.22E-02 | 1.58E-02 |
| 23 | R | GRU | 0.851 | 4.66E-04 | 5.20E-02 | 1.56E-02 |
| 24 | W | AUS | 0.857 | 4.65E-04 | 5.20E-02 | 1.56E-02 |
| 25 | C | COMP | 0.887 | 4.64E-04 | 4.98E-02 | 1.52E-02 |
| 26 | V | AUS | 0.942 | 4.61E-04 | 4.95E-02 | 1.52E-02 |
| 27 | J | DREN | 0.982 | 4.60E-04 | 4.94E-02 | 1.26E-02 |
| 28 | Z | AUS | 0.995 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.26E-02 |
| 29 | X | DF | 1.081 | 4.59E-04 | 4.91E-02 | 1.26E-02 |
| 30 | A | AUS | 1.085 | 4.59E-04 | 4.91E-02 | 1.26E-02 |
| 31 | K | COMP | 1.114 | 4.59E-04 | 4.91E-02 | 1.26E-02 |
| 32 | Y | DC1 | 1.118 | 4.59E-04 | 4.91E-02 | 1.26E-02 |
| 33 | P | INY | 1.130 | 4.59E-04 | 4.91E-02 | 1.26E-02 |
| 34 | F | DREN | 1.171 | 4.59E-04 | 4.91E-02 | 1.26E-02 |
| 35 | I | DFI | 1.182 | 4.59E-04 | 4.91E-02 | 1.26E-02 |
| 36 | H | PIL | 2.208 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 37 | G | INY | 2.213 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 38 | T | AUS | 2.219 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 39 | Z | ALIV | 2.261 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 40 | I | ALIV | 2.289 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 41 | F | EH | 2.465 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 42 | M | COMP | 2.486 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 43 | M | INY | 2.493 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 44 | S | DF | 2.497 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 45 | F | PEP | 2.514 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 46 | H | PFC | 2.544 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 47 | K | PEP | 2.577 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 48 | K | PFC | 2.594 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 49 | N | PEP | 2.628 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 50 | N | PFC | 2.646 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 51 | S | PEP | 2.681 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 52 | S | PFC | 2.698 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 53 | X | PEP | 2.734 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 54 | X | PFC | 2.753 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 55 | L | PFC | 2.793 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 56 | T | PEP | 2.833 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 57 | T | PFC | 2.853 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 58 | U | DC | 2.899 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 59 | I | PEP | 2.946 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 60 | I | PFC | 2.971 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 61 | P | PEP | 3.018 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.24E-02 |
| 62 | P | PFC | 3.042 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.24E-02 |
| 63 | J | PEP | 3.092 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.23E-02 |
| 64 | Y | PEP | 3.142 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.23E-02 |
| 65 | Y | PFC | 3.168 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.23E-02 |
| 66 | W | PEP | 3.220 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.23E-02 |
| 67 | W | PFC | 3.247 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.23E-02 |
| 68 | G | PEP | 3.299 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.14E-02 |
| 69 | G | PFC | 3.326 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.13E-02 |
| 70 | U | PEP | 3.385 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.09E-02 |
| 71 | U | PFC | 3.415 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.08E-02 |
| 72 | O | PEP | 3.475 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 7.86E-03 |
| 73 | O | PFC | 3.505 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 7.03E-03 |
| 74 | V | PEP | 3.570 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 7.03E-03 |
| 75 | V | PFC | 3.603 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 7.03E-03 |
| 76 | Z | PEP | 3.668 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 7.02E-03 |
| 77 | Z | PFC | 3.701 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 7.02E-03 |
| 78 | M | PEP | 3.770 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 7.02E-03 |
| 79 | M | PFC | 3.805 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 7.02E-03 |
| 80 | A | PEP | 3.884 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 5.75E-03 |
| 81 | A | PFC | 3.924 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 5.46E-03 |
| 82 | R | PEP | 4.004 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 5.28E-03 |
| 83 | R | PFC | 4.044 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 5.22E-03 |
| 84 | C | PEP | 4.125 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 5.18E-03 |
| 85 | C | PFC | 4.167 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 5.15E-03 |
| 86 | Q | PEP | 4.254 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 2.64E-03 |
| 87 | Q | PFC | 4.298 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.64E-03 |
| 88 | B | PEP | 4.396 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.43E-03 |
| 89 | B | PFC | 4.446 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |

A3.6 Secuencia obtenida con el indicador ACSFP

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | - | - | 0.000 | 2.55E-02 | 1.76E+00 | 2.85E-01 |
| 1 | D | FUSERV | 0.015 | 6.40E-03 | 9.61E-01 | 2.66E-01 |
| 2 | O | COMP | 0.144 | 5.22E-03 | 3.32E-01 | 1.72E-01 |
| 3 | E | COMP | 0.182 | 3.18E-03 | 2.79E-01 | 1.72E-01 |
| 4 | O | RESG | 0.183 | 3.02E-03 | 1.97E-01 | 1.61E-01 |
| 5 | Q | RESG | 0.183 | 2.75E-03 | 1.76E-01 | 1.13E-01 |
| 6 | Z | PRET | 0.194 | 2.25E-03 | 1.55E-01 | 1.13E-01 |
| 7 | A | VACIO | 0.194 | 1.73E-03 | 1.47E-01 | 5.53E-02 |
| 8 | I | RESG | 0.194 | 1.72E-03 | 1.46E-01 | 5.39E-02 |
| 9 | E | CUEN | 0.226 | 1.38E-03 | 1.38E-01 | 5.39E-02 |
| 10 | Z | DREN | 0.231 | 1.33E-03 | 1.36E-01 | 5.39E-02 |
| 11 | Q | PRE | 0.239 | 1.29E-03 | 1.33E-01 | 4.66E-02 |
| 12 | B | EIDC | 0.390 | 7.32E-04 | 1.29E-01 | 4.64E-02 |
| 13 | O | ALIV | 0.490 | 6.06E-04 | 6.30E-02 | 3.54E-02 |
| 14 | I | PRE | 0.495 | 5.95E-04 | 6.21E-02 | 3.38E-02 |
| 15 | T | ALIV | 0.663 | 5.01E-04 | 5.49E-02 | 3.37E-02 |
| 16 | J | EH | 0.685 | 4.93E-04 | 5.40E-02 | 1.93E-02 |
| 17 | Q | DF | 0.691 | 4.92E-04 | 5.38E-02 | 1.90E-02 |
| 18 | C | INYCIM | 0.695 | 4.91E-04 | 5.30E-02 | 1.89E-02 |
| 19 | A | LALIV | 0.837 | 4.66E-04 | 5.26E-02 | 1.62E-02 |
| 20 | C | INYCU | 0.838 | 4.66E-04 | 5.25E-02 | 1.62E-02 |
| 21 | R | AUS | 0.842 | 4.66E-04 | 5.22E-02 | 1.58E-02 |
| 22 | R | GRU | 0.844 | 4.66E-04 | 5.20E-02 | 1.56E-02 |
| 23 | W | AUS | 0.850 | 4.65E-04 | 5.20E-02 | 1.56E-02 |
| 24 | C | COMP | 0.880 | 4.64E-04 | 4.98E-02 | 1.52E-02 |
| 25 | V | AUS | 0.935 | 4.61E-04 | 4.95E-02 | 1.52E-02 |
| 26 | J | DREN | 0.976 | 4.60E-04 | 4.94E-02 | 1.26E-02 |
| 27 | Z | AUS | 0.988 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.26E-02 |
| 28 | X | DF | 1.074 | 4.59E-04 | 4.91E-02 | 1.26E-02 |
| 29 | A | AUS | 1.078 | 4.59E-04 | 4.91E-02 | 1.26E-02 |
| 30 | K | COMP | 1.107 | 4.59E-04 | 4.91E-02 | 1.26E-02 |
| 31 | Y | DC1 | 1.111 | 4.59E-04 | 4.91E-02 | 1.26E-02 |
| 32 | P | INY | 1.123 | 4.59E-04 | 4.91E-02 | 1.26E-02 |
| 33 | F | DREN | 1.164 | 4.59E-04 | 4.91E-02 | 1.26E-02 |
| 34 | I | DFI | 1.175 | 4.59E-04 | 4.91E-02 | 1.26E-02 |
| 35 | H | PIL | 2.201 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 36 | G | INY | 2.207 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 37 | T | AUS | 2.212 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 38 | Z | ALIV | 2.254 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 39 | I | ALIV | 2.282 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 40 | F | EH | 2.458 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 41 | M | COMP | 2.479 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 42 | M | INY | 2.486 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 43 | S | DF | 2.490 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 44 | F | PEP | 2.508 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 45 | H | PFC | 2.538 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 46 | K | PEP | 2.570 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 47 | K | PFC | 2.587 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 48 | N | PEP | 2.622 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 49 | N | PFC | 2.639 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 50 | S | PEP | 2.674 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 51 | S | PFC | 2.691 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 52 | X | PEP | 2.728 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 53 | X | PFC | 2.746 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 54 | L | PFC | 2.786 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 55 | T | PEP | 2.826 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 56 | T | PFC | 2.846 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 57 | U | DC | 2.892 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 58 | I | PEP | 2.940 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 59 | I | PFC | 2.964 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 60 | P | PEP | 3.011 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.24E-02 |
| 61 | P | PFC | 3.036 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.24E-02 |
| 62 | J | PEP | 3.085 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.23E-02 |
| 63 | Y | PEP | 3.135 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.23E-02 |
| 64 | Y | PFC | 3.161 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.23E-02 |
| 65 | W | PEP | 3.213 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.23E-02 |
| 66 | W | PFC | 3.240 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.23E-02 |
| 67 | G | PEP | 3.292 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.14E-02 |
| 68 | G | PFC | 3.319 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.13E-02 |
| 69 | U | PEP | 3.378 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.09E-02 |
| 70 | U | PFC | 3.408 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.08E-02 |
| 71 | O | PEP | 3.468 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 7.86E-03 |
| 72 | O | PFC | 3.498 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 7.03E-03 |
| 73 | V | PEP | 3.563 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 7.03E-03 |
| 74 | V | PFC | 3.596 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 7.03E-03 |
| 75 | Z | PEP | 3.661 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 7.02E-03 |
| 76 | Z | PFC | 3.694 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 7.02E-03 |
| 77 | M | PEP | 3.763 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 7.02E-03 |
| 78 | M | PFC | 3.798 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 7.02E-03 |
| 79 | A | PEP | 3.877 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 5.75E-03 |
| 80 | A | PFC | 3.917 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 5.46E-03 |
| 81 | R | PEP | 3.997 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 5.28E-03 |
| 82 | R | PFC | 4.037 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 5.22E-03 |
| 83 | C | PEP | 4.119 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 5.18E-03 |
| 84 | C | PFC | 4.160 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 5.15E-03 |
| 85 | Q | PEP | 4.247 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 2.64E-03 |
| 86 | Q | PFC | 4.291 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.64E-03 |
| 87 | B | PEP | 4.389 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.43E-03 |
| 88 | B | PFC | 4.439 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 89 | B | PFC | 4.446 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |

A3.7 Secuencia obtenida con el indicador ERDI

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | - | - | 0.000 | 2.55E-02 | 1.76E+00 | 2.85E-01 |
| 1 | D | FUSERV | 0.015 | 6.40E-03 | 9.61E-01 | 2.66E-01 |
| 2 | O | COMP | 0.144 | 5.22E-03 | 3.32E-01 | 1.72E-01 |
| 3 | O | ALIV | 0.244 | 5.00E-03 | 2.16E-01 | 1.54E-01 |
| 4 | E | COMP | 0.282 | 2.96E-03 | 1.63E-01 | 1.54E-01 |
| 5 | O | RESG | 0.283 | 2.90E-03 | 1.30E-01 | 1.50E-01 |
| 6 | Q | PRE | 0.291 | 2.62E-03 | 1.09E-01 | 9.99E-02 |
| 7 | Z | PRET | 0.302 | 2.12E-03 | 8.82E-02 | 9.99E-02 |
| 8 | E | CUEN | 0.334 | 1.78E-03 | 7.96E-02 | 9.99E-02 |
| 9 | A | VACIO | 0.334 | 1.25E-03 | 7.12E-02 | 4.27E-02 |
| 10 | T | ALIV | 0.502 | 1.16E-03 | 6.39E-02 | 4.26E-02 |
| 11 | B | EIDC | 0.653 | 6.02E-04 | 6.08E-02 | 4.24E-02 |
| 12 | Q | RESG | 0.653 | 5.71E-04 | 5.84E-02 | 3.67E-02 |
| 13 | C | COMP | 0.683 | 5.69E-04 | 5.62E-02 | 3.63E-02 |
| 14 | Z | DREN | 0.689 | 5.20E-04 | 5.42E-02 | 3.63E-02 |
| 15 | I | PRE | 0.693 | 5.00E-04 | 5.27E-02 | 3.33E-02 |
| 16 | J | DREN | 0.734 | 4.91E-04 | 5.17E-02 | 1.82E-02 |
| 17 | C | INYCIM | 0.738 | 4.91E-04 | 5.09E-02 | 1.81E-02 |
| 18 | A | LALIV | 0.880 | 4.66E-04 | 5.05E-02 | 1.54E-02 |
| 19 | R | AUS | 0.884 | 4.66E-04 | 5.02E-02 | 1.50E-02 |
| 20 | V | AUS | 0.939 | 4.63E-04 | 4.99E-02 | 1.50E-02 |
| 21 | Z | AUS | 0.952 | 4.63E-04 | 4.97E-02 | 1.50E-02 |
| 22 | R | GRU | 0.954 | 4.63E-04 | 4.95E-02 | 1.48E-02 |
| 23 | C | INYCU | 0.955 | 4.62E-04 | 4.93E-02 | 1.47E-02 |
| 24 | J | EH | 0.977 | 4.61E-04 | 4.92E-02 | 1.29E-02 |
| 25 | Q | DF | 0.983 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.26E-02 |
| 26 | H | PIL | 2.009 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.26E-02 |
| 27 | X | DF | 2.095 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.26E-02 |
| 28 | K | COMP | 2.124 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.26E-02 |
| 29 | I | RESG | 2.124 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 30 | A | AUS | 2.128 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 31 | Z | ALIV | 2.170 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 32 | W | AUS | 2.176 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 33 | Y | DC1 | 2.180 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 34 | F | DREN | 2.220 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 35 | I | ALIV | 2.248 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 36 | P | INY | 2.260 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 37 | G | INY | 2.265 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 38 | T | AUS | 2.271 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 39 | I | DFI | 2.282 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 40 | M | COMP | 2.303 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 41 | F | EH | 2.479 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 42 | M | INY | 2.486 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 43 | A | PEP | 2.565 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.13E-02 |
| 44 | A | PFC | 2.605 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.10E-02 |

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 45 | B | PEP | 2.703 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.07E-02 |
| 46 | B | PFC | 2.753 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.06E-02 |
| 47 | G | PEP | 2.806 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 9.76E-03 |
| 48 | G | PFC | 2.832 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 9.65E-03 |
| 49 | C | PEP | 2.914 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 9.61E-03 |
| 50 | C | PFC | 2.955 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 9.58E-03 |
| 51 | F | PEP | 2.973 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 9.58E-03 |
| 52 | H | PFC | 3.003 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 9.58E-03 |
| 53 | I | PEP | 3.050 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 9.58E-03 |
| 54 | I | PFC | 3.074 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 9.58E-03 |
| 55 | Q | PEP | 3.162 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 7.07E-03 |
| 56 | Q | PFC | 3.206 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 6.07E-03 |
| 57 | J | PEP | 3.255 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 6.01E-03 |
| 58 | K | PEP | 3.288 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 6.01E-03 |
| 59 | K | PFC | 3.304 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 6.01E-03 |
| 60 | N | PEP | 3.339 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 6.01E-03 |
| 61 | N | PFC | 3.356 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 6.01E-03 |
| 62 | M | PEP | 3.425 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 6.01E-03 |
| 63 | M | PFC | 3.460 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 6.01E-03 |
| 64 | O | PEP | 3.519 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 3.07E-03 |
| 65 | O | PFC | 3.549 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 2.25E-03 |
| 66 | P | PEP | 3.597 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 2.19E-03 |
| 67 | P | PFC | 3.621 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 2.16E-03 |
| 68 | R | PEP | 3.701 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.98E-03 |
| 69 | R | PFC | 3.741 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.92E-03 |
| 70 | T | PEP | 3.782 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.89E-03 |
| 71 | T | PFC | 3.802 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.89E-03 |
| 72 | U | PEP | 3.861 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.51E-03 |
| 73 | U | PFC | 3.891 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.38E-03 |
| 74 | U | DC | 3.937 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.38E-03 |
| 75 | V | PEP | 4.002 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.38E-03 |
| 76 | V | PFC | 4.035 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.38E-03 |
| 77 | Y | PEP | 4.086 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.34E-03 |
| 78 | Y | PFC | 4.111 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.33E-03 |
| 79 | W | PEP | 4.164 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.33E-03 |
| 80 | W | PFC | 4.190 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.33E-03 |
| 81 | X | PEP | 4.226 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.32E-03 |
| 82 | X | PFC | 4.245 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.31E-03 |
| 83 | Z | PEP | 4.310 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 84 | Z | PFC | 4.343 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 85 | L | PFC | 4.383 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 86 | S | PEP | 4.418 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 87 | S | PFC | 4.435 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 88 | S | DF | 4.439 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |

A3.8 Secuencia obtenida con el indicador CBR

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | - | - | 0.000 | 2.55E-02 | 1.76E+00 | 2.85E-01 |
| 1 | A | VACIO | 0.000 | 2.50E-02 | 1.75E+00 | 2.27E-01 |
| 2 | I | RESG | 0.000 | 2.49E-02 | 1.75E+00 | 2.26E-01 |
| 3 | Q | RESG | 0.000 | 2.47E-02 | 1.73E+00 | 1.78E-01 |
| 4 | O | RESG | 0.001 | 2.37E-02 | 1.21E+00 | 1.04E-01 |
| 5 | D | DET | 0.008 | 1.06E-02 | 6.57E-01 | 9.17E-02 |
| 6 | D | FUSERV | 0.023 | 4.59E-03 | 4.06E-01 | 8.59E-02 |
| 7 | Z | PRET | 0.035 | 4.10E-03 | 3.86E-01 | 8.59E-02 |
| 8 | O | COMP | 0.164 | 3.75E-03 | 1.99E-01 | 5.40E-02 |
| 9 | E | COMP | 0.201 | 1.72E-03 | 1.46E-01 | 5.39E-02 |
| 10 | O | ALIV | 0.301 | 1.59E-03 | 7.99E-02 | 4.29E-02 |
| 11 | Q | PRE | 0.309 | 1.55E-03 | 7.68E-02 | 3.56E-02 |
| 12 | Z | DREN | 0.315 | 1.50E-03 | 7.47E-02 | 3.56E-02 |
| 13 | E | CUEN | 0.346 | 1.16E-03 | 6.61E-02 | 3.56E-02 |
| 14 | C | INYCIM | 0.351 | 1.16E-03 | 6.53E-02 | 3.54E-02 |
| 15 | I | PRE | 0.355 | 1.15E-03 | 6.44E-02 | 3.38E-02 |
| 16 | C | INYCU | 0.356 | 1.15E-03 | 6.43E-02 | 3.38E-02 |
| 17 | R | AUS | 0.360 | 1.15E-03 | 6.40E-02 | 3.34E-02 |
| 18 | C | COMP | 0.390 | 1.15E-03 | 6.18E-02 | 3.30E-02 |
| 19 | R | GRU | 0.393 | 1.15E-03 | 6.16E-02 | 3.28E-02 |
| 20 | J | EH | 0.415 | 1.14E-03 | 6.07E-02 | 1.84E-02 |
| 21 | T | ALIV | 0.583 | 1.05E-03 | 5.34E-02 | 1.83E-02 |
| 22 | B | EIDC | 0.734 | 4.90E-04 | 5.03E-02 | 1.82E-02 |
| 23 | Z | AUS | 0.747 | 4.90E-04 | 5.01E-02 | 1.81E-02 |
| 24 | Q | DF | 0.752 | 4.89E-04 | 5.00E-02 | 1.79E-02 |
| 25 | V | AUS | 0.808 | 4.86E-04 | 4.97E-02 | 1.79E-02 |
| 26 | J | DREN | 0.848 | 4.85E-04 | 4.95E-02 | 1.53E-02 |
| 27 | A | LALIV | 0.990 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.26E-02 |
| 28 | K | COMP | 1.018 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.26E-02 |
| 29 | A | AUS | 1.023 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.26E-02 |
| 30 | X | DF | 1.108 | 4.59E-04 | 4.91E-02 | 1.26E-02 |
| 31 | W | AUS | 1.114 | 4.59E-04 | 4.91E-02 | 1.26E-02 |
| 32 | Y | DC1 | 1.118 | 4.59E-04 | 4.91E-02 | 1.26E-02 |
| 33 | Z | ALIV | 1.161 | 4.59E-04 | 4.91E-02 | 1.26E-02 |
| 34 | H | PIL | 2.187 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 35 | I | DFI | 2.198 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 36 | P | INY | 2.210 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 37 | G | INY | 2.215 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 38 | F | DREN | 2.256 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 39 | T | AUS | 2.261 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 40 | I | ALIV | 2.289 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 41 | M | COMP | 2.310 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 42 | F | EH | 2.486 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 43 | M | INY | 2.493 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.25E-02 |
| 44 | A | PEP | 2.572 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.13E-02 |

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 45 | A | PFC | 2.612 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.10E-02 |
| 46 | B | PEP | 2.710 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.07E-02 |
| 47 | B | PFC | 2.760 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.06E-02 |
| 48 | G | PEP | 2.813 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 9.76E-03 |
| 49 | G | PFC | 2.839 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 9.65E-03 |
| 50 | C | PEP | 2.921 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 9.61E-03 |
| 51 | C | PFC | 2.962 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 9.58E-03 |
| 52 | F | PEP | 2.979 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 9.58E-03 |
| 53 | H | PFC | 3.010 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 9.58E-03 |
| 54 | I | PEP | 3.057 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 9.58E-03 |
| 55 | I | PFC | 3.081 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 9.58E-03 |
| 56 | Q | PEP | 3.168 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 7.07E-03 |
| 57 | Q | PFC | 3.212 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 6.07E-03 |
| 58 | J | PEP | 3.262 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 6.01E-03 |
| 59 | K | PEP | 3.295 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 6.01E-03 |
| 60 | K | PFC | 3.311 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 6.01E-03 |
| 61 | N | PEP | 3.346 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 6.01E-03 |
| 62 | N | PFC | 3.363 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 6.01E-03 |
| 63 | M | PEP | 3.432 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 6.01E-03 |
| 64 | M | PFC | 3.467 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 6.01E-03 |
| 65 | O | PEP | 3.526 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 3.07E-03 |
| 66 | O | PFC | 3.556 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 2.25E-03 |
| 67 | P | PEP | 3.604 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 2.19E-03 |
| 68 | P | PFC | 3.628 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 2.16E-03 |
| 69 | R | PEP | 3.708 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.98E-03 |
| 70 | R | PFC | 3.748 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.92E-03 |
| 71 | T | PEP | 3.788 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.89E-03 |
| 72 | T | PFC | 3.809 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.89E-03 |
| 73 | U | PEP | 3.868 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.51E-03 |
| 74 | U | PFC | 3.898 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.38E-03 |
| 75 | U | DC | 3.944 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.38E-03 |
| 76 | V | PEP | 4.009 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.38E-03 |
| 77 | V | PFC | 4.042 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.38E-03 |
| 78 | Y | PEP | 4.092 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.34E-03 |
| 79 | Y | PFC | 4.118 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.33E-03 |
| 80 | W | PEP | 4.170 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.33E-03 |
| 81 | W | PFC | 4.197 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.33E-03 |
| 82 | X | PEP | 4.233 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.32E-03 |
| 83 | X | PFC | 4.251 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.31E-03 |
| 84 | Z | PEP | 4.317 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 85 | Z | PFC | 4.350 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 86 | L | PFC | 4.390 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 87 | S | PEP | 4.425 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 88 | S | PFC | 4.442 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 89 | S | DF | 4.446 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |

A3.9 Secuencia obtenida con una combinación del ACSLS y el ACSFP

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | - | - | 0.000 | 2.55E-02 | 1.76E+00 | 2.85E-01 |
| 1 | D | FUSERV | 0.015 | 6.40E-03 | 9.61E-01 | 2.66E-01 |
| 2 | O | COMP | 0.144 | 5.22E-03 | 3.32E-01 | 1.72E-01 |
| 3 | E | COMP | 0.182 | 3.18E-03 | 2.79E-01 | 1.72E-01 |
| 4 | O | RESG | 0.183 | 3.02E-03 | 1.97E-01 | 1.61E-01 |
| 5 | Q | RESG | 0.183 | 2.75E-03 | 1.76E-01 | 1.13E-01 |
| 6 | Z | PRET | 0.194 | 2.25E-03 | 1.55E-01 | 1.13E-01 |
| 7 | A | VACIO | 0.194 | 1.73E-03 | 1.47E-01 | 5.53E-02 |
| 8 | E | CUEN | 0.226 | 1.39E-03 | 1.38E-01 | 5.53E-02 |
| 9 | B | EIDC | 0.376 | 8.31E-04 | 1.35E-01 | 5.52E-02 |
| 10 | O | ALIV | 0.476 | 7.05E-04 | 6.87E-02 | 4.42E-02 |
| 11 | T | ALIV | 0.645 | 6.11E-04 | 6.15E-02 | 4.40E-02 |
| 12 | I | RESG | 0.645 | 6.03E-04 | 6.09E-02 | 4.27E-02 |
| 13 | Q | PRE | 0.653 | 5.62E-04 | 5.78E-02 | 3.53E-02 |
| 14 | J | EH | 0.675 | 5.54E-04 | 5.68E-02 | 2.09E-02 |
| 15 | I | PRE | 0.679 | 5.43E-04 | 5.60E-02 | 1.93E-02 |
| 16 | R | AUS | 0.683 | 5.43E-04 | 5.57E-02 | 1.89E-02 |
| 17 | R | GRU | 0.686 | 5.42E-04 | 5.55E-02 | 1.87E-02 |
| 18 | J | DREN | 0.726 | 5.41E-04 | 5.54E-02 | 1.62E-02 |
| 19 | O | PEP | 0.786 | 5.41E-04 | 5.54E-02 | 1.32E-02 |
| 20 | Q | DF | 0.791 | 5.40E-04 | 5.53E-02 | 1.30E-02 |
| 21 | A | PEP | 0.871 | 5.40E-04 | 5.53E-02 | 9.55E-03 |
| 22 | C | INYCIM | 0.875 | 5.39E-04 | 5.44E-02 | 9.42E-03 |
| 23 | C | INYCU | 0.876 | 5.39E-04 | 5.43E-02 | 9.39E-03 |
| 24 | Q | PEP | 0.963 | 5.39E-04 | 5.43E-02 | 6.87E-03 |
| 25 | O | PFC | 0.993 | 5.39E-04 | 5.43E-02 | 6.05E-03 |
| 26 | Q | PFC | 1.037 | 5.39E-04 | 5.43E-02 | 5.06E-03 |
| 27 | A | PFC | 1.077 | 5.39E-04 | 5.43E-02 | 4.27E-03 |
| 28 | G | PEP | 1.130 | 5.39E-04 | 5.43E-02 | 3.40E-03 |
| 29 | C | COMP | 1.160 | 5.37E-04 | 5.21E-02 | 3.00E-03 |
| 30 | U | PEP | 1.219 | 5.37E-04 | 5.21E-02 | 2.63E-03 |
| 31 | U | PFC | 1.249 | 5.37E-04 | 5.21E-02 | 2.50E-03 |
| 32 | G | PFC | 1.276 | 5.37E-04 | 5.21E-02 | 2.39E-03 |
| 33 | Z | AUS | 1.289 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 2.36E-03 |
| 34 | R | PEP | 1.369 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 2.18E-03 |
| 35 | B | PEP | 1.467 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.96E-03 |
| 36 | B | PFC | 1.517 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.84E-03 |
| 37 | R | PFC | 1.557 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.78E-03 |
| 38 | P | PEP | 1.605 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.71E-03 |
| 39 | H | PFC | 1.635 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.67E-03 |
| 40 | J | PEP | 1.684 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.61E-03 |
| 41 | P | PFC | 1.708 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.59E-03 |
| 42 | Y | PEP | 1.759 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.55E-03 |
| 43 | Z | DREN | 1.765 | 4.87E-04 | 4.98E-02 | 1.54E-03 |
| 44 | T | PEP | 1.805 | 4.87E-04 | 4.98E-02 | 1.51E-03 |

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 45 | A | AUS | 1.809 | 4.87E-04 | 4.98E-02 | 1.51E-03 |
| 46 | A | LALIV | 1.950 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.44E-03 |
| 47 | C | PEP | 2.032 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.39E-03 |
| 48 | C | PFC | 2.073 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.37E-03 |
| 49 | T | PFC | 2.093 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.36E-03 |
| 50 | Y | PFC | 2.119 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.35E-03 |
| 51 | X | PEP | 2.155 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.34E-03 |
| 52 | X | PFC | 2.174 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.33E-03 |
| 53 | Z | PEP | 2.239 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.32E-03 |
| 54 | V | AUS | 2.294 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 55 | Z | PFC | 2.327 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 56 | I | DFI | 2.338 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 57 | K | COMP | 2.367 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.31E-03 |
| 58 | H | PIL | 3.394 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 59 | F | PEP | 3.411 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 60 | W | AUS | 3.417 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 61 | P | INY | 3.429 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 62 | X | DF | 3.515 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 63 | V | PEP | 3.580 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 64 | V | PFC | 3.613 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 65 | I | ALIV | 3.640 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 66 | Y | DC1 | 3.644 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 67 | K | PEP | 3.677 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 68 | N | PEP | 3.712 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 69 | N | PFC | 3.729 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 70 | K | PFC | 3.746 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 71 | F | DREN | 3.786 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 72 | Z | ALIV | 3.828 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 73 | G | INY | 3.834 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 74 | M | COMP | 3.855 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 75 | T | AUS | 3.860 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 76 | I | PEP | 3.908 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 77 | I | PFC | 3.932 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 78 | W | PEP | 3.985 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 79 | W | PFC | 4.011 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 80 | F | EH | 4.187 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 81 | M | PEP | 4.256 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 82 | M | PFC | 4.291 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 83 | M | INY | 4.297 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 84 | S | DF | 4.301 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 85 | S | PEP | 4.336 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 86 | S | PFC | 4.353 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 87 | L | PFC | 4.393 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 88 | U | DC | 4.439 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 89 | B | PFC | 4.446 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |

ANEJO 4 SECUENCIAS DE IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS CON EL INDICADOR EWACSLS PARA DIFERENTES VALORES DE N

A4.1 Secuencia obtenida para un valor del parámetro n=1

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | - | - | 0.000 | 2.55E-02 | 1.76E+00 | 2.85E-01 |
| 1 | D | FUSERV | 0.015 | 6.40E-03 | 9.61E-01 | 2.66E-01 |
| 2 | O | COMP | 0.144 | 5.22E-03 | 3.32E-01 | 1.72E-01 |
| 3 | Q | RESG | 0.144 | 4.95E-03 | 3.11E-01 | 1.24E-01 |
| 4 | A | VACIO | 0.144 | 4.42E-03 | 3.03E-01 | 6.68E-02 |
| 5 | O | RESG | 0.145 | 4.26E-03 | 2.20E-01 | 5.54E-02 |
| 6 | E | COMP | 0.183 | 2.22E-03 | 1.67E-01 | 5.53E-02 |
| 7 | Z | PRET | 0.194 | 1.73E-03 | 1.47E-01 | 5.53E-02 |
| 8 | I | RESG | 0.194 | 1.72E-03 | 1.46E-01 | 5.39E-02 |
| 9 | Q | PRE | 0.202 | 1.68E-03 | 1.43E-01 | 4.66E-02 |
| 10 | J | EH | 0.224 | 1.67E-03 | 1.42E-01 | 3.22E-02 |
| 11 | O | ALIV | 0.324 | 1.54E-03 | 7.58E-02 | 2.12E-02 |
| 12 | I | PRE | 0.329 | 1.53E-03 | 7.50E-02 | 1.96E-02 |
| 13 | R | AUS | 0.333 | 1.53E-03 | 7.47E-02 | 1.92E-02 |
| 14 | R | GRU | 0.335 | 1.53E-03 | 7.45E-02 | 1.90E-02 |
| 15 | J | DREN | 0.376 | 1.53E-03 | 7.44E-02 | 1.64E-02 |
| 16 | O | PEP | 0.435 | 1.53E-03 | 7.44E-02 | 1.35E-02 |
| 17 | Q | DF | 0.441 | 1.53E-03 | 7.43E-02 | 1.32E-02 |
| 18 | A | PEP | 0.520 | 1.53E-03 | 7.43E-02 | 9.81E-03 |
| 19 | C | INYCIM | 0.525 | 1.53E-03 | 7.34E-02 | 9.68E-03 |
| 20 | C | INYCU | 0.525 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 9.65E-03 |
| 21 | Q | PEP | 0.612 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 7.13E-03 |
| 22 | O | PFC | 0.643 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 6.31E-03 |
| 23 | Q | PFC | 0.687 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 5.32E-03 |
| 24 | A | PFC | 0.727 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 4.53E-03 |
| 25 | G | PEP | 0.779 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 3.66E-03 |
| 26 | C | COMP | 0.809 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 3.26E-03 |
| 27 | U | PEP | 0.869 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 2.88E-03 |
| 28 | B | EIDC | 1.020 | 9.67E-04 | 6.80E-02 | 2.73E-03 |
| 29 | U | PFC | 1.050 | 9.67E-04 | 6.80E-02 | 2.61E-03 |
| 30 | G | PFC | 1.076 | 9.67E-04 | 6.80E-02 | 2.50E-03 |
| 31 | Z | AUS | 1.089 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 2.47E-03 |
| 32 | R | PEP | 1.169 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 2.29E-03 |
| 33 | B | PEP | 1.267 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 2.07E-03 |
| 34 | B | PFC | 1.317 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.95E-03 |
| 35 | T | PEP | 1.357 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.88E-03 |
| 36 | R | PFC | 1.398 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.82E-03 |
| 37 | P | PEP | 1.445 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.76E-03 |
| 38 | H | PFC | 1.475 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.72E-03 |
| 39 | J | PEP | 1.525 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.66E-03 |
| 40 | T | PFC | 1.545 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.63E-03 |
| 41 | P | PFC | 1.569 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.61E-03 |
| 42 | E | CUEN | 1.600 | 6.31E-04 | 5.91E-02 | 1.60E-03 |
| 43 | Y | PEP | 1.651 | 6.31E-04 | 5.91E-02 | 1.56E-03 |
| 44 | Z | DREN | 1.656 | 5.81E-04 | 5.70E-02 | 1.56E-03 |

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 45 | A | AUS | 1.661 | 5.81E-04 | 5.70E-02 | 1.56E-03 |
| 46 | T | ALIV | 1.829 | 4.87E-04 | 4.98E-02 | 1.50E-03 |
| 47 | A | LALIV | 1.971 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.43E-03 |
| 48 | C | PEP | 2.052 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.38E-03 |
| 49 | C | PFC | 2.093 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.36E-03 |
| 50 | Y | PFC | 2.119 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.35E-03 |
| 51 | X | PEP | 2.155 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.34E-03 |
| 52 | X | PFC | 2.174 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.33E-03 |
| 53 | Z | PEP | 2.239 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.32E-03 |
| 54 | V | AUS | 2.294 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 55 | Z | PFC | 2.327 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 56 | I | DFI | 2.338 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 57 | K | COMP | 2.367 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.31E-03 |
| 58 | H | PIL | 3.394 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 59 | F | PEP | 3.411 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 60 | W | AUS | 3.417 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 61 | P | INY | 3.429 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 62 | X | DF | 3.515 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 63 | V | PEP | 3.580 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 64 | V | PFC | 3.613 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 65 | I | ALIV | 3.640 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 66 | Y | DC1 | 3.644 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 67 | K | PEP | 3.677 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 68 | N | PEP | 3.712 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 69 | N | PFC | 3.729 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 70 | K | PFC | 3.746 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 71 | F | DREN | 3.786 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 72 | Z | ALIV | 3.828 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 73 | G | INY | 3.834 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 74 | M | COMP | 3.855 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 75 | T | AUS | 3.860 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 76 | I | PEP | 3.908 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 77 | I | PFC | 3.932 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 78 | W | PEP | 3.985 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 79 | W | PFC | 4.011 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 80 | F | EH | 4.187 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 81 | M | PEP | 4.256 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 82 | M | PFC | 4.291 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 83 | M | INY | 4.297 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 84 | S | DF | 4.301 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 85 | S | PEP | 4.336 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 86 | S | PFC | 4.353 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 87 | L | PFC | 4.393 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 88 | U | DC | 4.439 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |

A4.2 Secuencia obtenida para un valor del parámetro $n=0.05$

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | - | - | 0.000 | 2.55E-02 | 1.76E+00 | 2.85E-01 |
| 1 | O | COMP | 0.129 | 2.43E-02 | 1.13E+00 | 1.91E-01 |
| 2 | D | FUSERV | 0.144 | 5.22E-03 | 3.32E-01 | 1.72E-01 |
| 3 | Q | RESG | 0.144 | 4.95E-03 | 3.11E-01 | 1.24E-01 |
| 4 | O | RESG | 0.145 | 4.79E-03 | 2.29E-01 | 1.13E-01 |
| 5 | A | VACIO | 0.145 | 4.26E-03 | 2.20E-01 | 5.54E-02 |
| 6 | I | RESG | 0.145 | 4.25E-03 | 2.20E-01 | 5.40E-02 |
| 7 | E | COMP | 0.183 | 2.21E-03 | 1.67E-01 | 5.40E-02 |
| 8 | Z | PRET | 0.194 | 1.72E-03 | 1.46E-01 | 5.39E-02 |
| 9 | Q | PRE | 0.202 | 1.68E-03 | 1.43E-01 | 4.66E-02 |
| 10 | J | EH | 0.224 | 1.67E-03 | 1.42E-01 | 3.22E-02 |
| 11 | I | PRE | 0.229 | 1.66E-03 | 1.41E-01 | 3.06E-02 |
| 12 | O | ALIV | 0.329 | 1.53E-03 | 7.50E-02 | 1.96E-02 |
| 13 | R | AUS | 0.333 | 1.53E-03 | 7.47E-02 | 1.92E-02 |
| 14 | R | GRU | 0.335 | 1.53E-03 | 7.45E-02 | 1.90E-02 |
| 15 | J | DREN | 0.376 | 1.53E-03 | 7.44E-02 | 1.64E-02 |
| 16 | O | PEP | 0.435 | 1.53E-03 | 7.44E-02 | 1.35E-02 |
| 17 | Q | DF | 0.441 | 1.53E-03 | 7.43E-02 | 1.32E-02 |
| 18 | A | PEP | 0.520 | 1.53E-03 | 7.43E-02 | 9.81E-03 |
| 19 | C | INYCIM | 0.525 | 1.53E-03 | 7.34E-02 | 9.68E-03 |
| 20 | C | INYCU | 0.525 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 9.65E-03 |
| 21 | Q | PEP | 0.612 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 7.13E-03 |
| 22 | O | PFC | 0.643 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 6.31E-03 |
| 23 | Q | PFC | 0.687 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 5.32E-03 |
| 24 | A | PFC | 0.727 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 4.53E-03 |
| 25 | G | PEP | 0.779 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 3.66E-03 |
| 26 | C | COMP | 0.809 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 3.26E-03 |
| 27 | U | PEP | 0.869 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 2.88E-03 |
| 28 | U | PFC | 0.899 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 2.75E-03 |
| 29 | G | PFC | 0.926 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 2.65E-03 |
| 30 | Z | AUS | 0.938 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 2.62E-03 |
| 31 | B | PEP | 1.037 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 2.37E-03 |
| 32 | B | PFC | 1.087 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 2.20E-03 |
| 33 | R | PEP | 1.167 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 2.02E-03 |
| 34 | T | PEP | 1.207 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.96E-03 |
| 35 | R | PFC | 1.247 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.90E-03 |
| 36 | P | PEP | 1.295 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.83E-03 |
| 37 | H | PFC | 1.325 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.80E-03 |
| 38 | J | PEP | 1.374 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.73E-03 |
| 39 | T | PFC | 1.394 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.71E-03 |
| 40 | P | PFC | 1.418 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.68E-03 |
| 41 | Y | PEP | 1.469 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.64E-03 |
| 42 | Z | DREN | 1.475 | 1.47E-03 | 6.88E-02 | 1.64E-03 |
| 43 | A | AUS | 1.479 | 1.47E-03 | 6.88E-02 | 1.64E-03 |
| 44 | B | EIDC | 1.629 | 9.17E-04 | 6.57E-02 | 1.56E-03 |

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 45 | A | LALIV | 1.771 | 8.92E-04 | 6.53E-02 | 1.49E-03 |
| 46 | C | PEP | 1.852 | 8.92E-04 | 6.53E-02 | 1.44E-03 |
| 47 | C | PFC | 1.894 | 8.92E-04 | 6.53E-02 | 1.42E-03 |
| 48 | Y | PFC | 1.919 | 8.92E-04 | 6.53E-02 | 1.41E-03 |
| 49 | T | ALIV | 2.088 | 7.98E-04 | 5.80E-02 | 1.35E-03 |
| 50 | E | CUEN | 2.119 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.35E-03 |
| 51 | X | PEP | 2.155 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.34E-03 |
| 52 | X | PFC | 2.174 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.33E-03 |
| 53 | Z | PEP | 2.239 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.32E-03 |
| 54 | V | AUS | 2.294 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 55 | Z | PFC | 2.327 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 56 | I | DFI | 2.338 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 57 | K | COMP | 2.367 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.31E-03 |
| 58 | H | PIL | 3.394 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 59 | F | PEP | 3.411 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 60 | W | AUS | 3.417 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 61 | P | INY | 3.429 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 62 | X | DF | 3.515 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 63 | V | PEP | 3.580 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 64 | V | PFC | 3.613 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 65 | I | ALIV | 3.640 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 66 | Y | DC1 | 3.644 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 67 | K | PEP | 3.677 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 68 | N | PEP | 3.712 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 69 | N | PFC | 3.729 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 70 | K | PFC | 3.746 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 71 | F | DREN | 3.786 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 72 | Z | ALIV | 3.828 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 73 | G | INY | 3.834 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 74 | M | COMP | 3.855 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 75 | T | AUS | 3.860 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 76 | I | PEP | 3.908 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 77 | I | PFC | 3.932 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 78 | W | PEP | 3.985 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 79 | W | PFC | 4.011 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 80 | F | EH | 4.187 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 81 | M | PEP | 4.256 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 82 | M | PFC | 4.291 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 83 | M | INY | 4.297 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 84 | S | DF | 4.301 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 85 | S | PEP | 4.336 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 86 | S | PFC | 4.353 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 87 | L | PFC | 4.393 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 88 | U | DC | 4.439 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |

A4.3 Secuencia obtenida para un valor del parámetro n=0.1

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | - | - | 0.000 | 2.55E-02 | 1.76E+00 | 2.85E-01 |
| 1 | O | COMP | 0.129 | 2.43E-02 | 1.13E+00 | 1.91E-01 |
| 2 | D | FUSERV | 0.144 | 5.22E-03 | 3.32E-01 | 1.72E-01 |
| 3 | Q | RESG | 0.144 | 4.95E-03 | 3.11E-01 | 1.24E-01 |
| 4 | O | RESG | 0.145 | 4.79E-03 | 2.29E-01 | 1.13E-01 |
| 5 | A | VACIO | 0.145 | 4.26E-03 | 2.20E-01 | 5.54E-02 |
| 6 | I | RESG | 0.145 | 4.25E-03 | 2.20E-01 | 5.40E-02 |
| 7 | E | COMP | 0.183 | 2.21E-03 | 1.67E-01 | 5.40E-02 |
| 8 | Z | PRET | 0.194 | 1.72E-03 | 1.46E-01 | 5.39E-02 |
| 9 | Q | PRE | 0.202 | 1.68E-03 | 1.43E-01 | 4.66E-02 |
| 10 | J | EH | 0.224 | 1.67E-03 | 1.42E-01 | 3.22E-02 |
| 11 | I | PRE | 0.229 | 1.66E-03 | 1.41E-01 | 3.06E-02 |
| 12 | O | ALIV | 0.329 | 1.53E-03 | 7.50E-02 | 1.96E-02 |
| 13 | R | AUS | 0.333 | 1.53E-03 | 7.47E-02 | 1.92E-02 |
| 14 | R | GRU | 0.335 | 1.53E-03 | 7.45E-02 | 1.90E-02 |
| 15 | J | DREN | 0.376 | 1.53E-03 | 7.44E-02 | 1.64E-02 |
| 16 | O | PEP | 0.435 | 1.53E-03 | 7.44E-02 | 1.35E-02 |
| 17 | Q | DF | 0.441 | 1.53E-03 | 7.43E-02 | 1.32E-02 |
| 18 | A | PEP | 0.520 | 1.53E-03 | 7.43E-02 | 9.81E-03 |
| 19 | C | INYCIM | 0.525 | 1.53E-03 | 7.34E-02 | 9.68E-03 |
| 20 | C | INYCU | 0.525 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 9.65E-03 |
| 21 | Q | PEP | 0.612 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 7.13E-03 |
| 22 | O | PFC | 0.643 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 6.31E-03 |
| 23 | Q | PFC | 0.687 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 5.32E-03 |
| 24 | A | PFC | 0.727 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 4.53E-03 |
| 25 | G | PEP | 0.779 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 3.66E-03 |
| 26 | C | COMP | 0.809 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 3.26E-03 |
| 27 | U | PEP | 0.869 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 2.88E-03 |
| 28 | U | PFC | 0.899 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 2.75E-03 |
| 29 | G | PFC | 0.926 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 2.65E-03 |
| 30 | Z | AUS | 0.938 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 2.62E-03 |
| 31 | B | PEP | 1.037 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 2.37E-03 |
| 32 | B | PFC | 1.087 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 2.20E-03 |
| 33 | R | PEP | 1.167 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 2.02E-03 |
| 34 | T | PEP | 1.207 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.96E-03 |
| 35 | R | PFC | 1.247 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.90E-03 |
| 36 | P | PEP | 1.295 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.83E-03 |
| 37 | H | PFC | 1.325 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.80E-03 |
| 38 | J | PEP | 1.374 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.73E-03 |
| 39 | T | PFC | 1.394 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.71E-03 |
| 40 | P | PFC | 1.418 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.68E-03 |
| 41 | Y | PEP | 1.469 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.64E-03 |
| 42 | Z | DREN | 1.475 | 1.47E-03 | 6.88E-02 | 1.64E-03 |
| 43 | A | AUS | 1.479 | 1.47E-03 | 6.88E-02 | 1.64E-03 |
| 44 | B | EIDC | 1.629 | 9.17E-04 | 6.57E-02 | 1.56E-03 |

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 45 | A | LALIV | 1.771 | 8.92E-04 | 6.53E-02 | 1.49E-03 |
| 46 | C | PEP | 1.852 | 8.92E-04 | 6.53E-02 | 1.44E-03 |
| 47 | C | PFC | 1.894 | 8.92E-04 | 6.53E-02 | 1.42E-03 |
| 48 | Y | PFC | 1.919 | 8.92E-04 | 6.53E-02 | 1.41E-03 |
| 49 | T | ALIV | 2.088 | 7.98E-04 | 5.80E-02 | 1.35E-03 |
| 50 | E | CUEN | 2.119 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.35E-03 |
| 51 | X | PEP | 2.155 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.34E-03 |
| 52 | X | PFC | 2.174 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.33E-03 |
| 53 | Z | PEP | 2.239 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.32E-03 |
| 54 | V | AUS | 2.294 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 55 | Z | PFC | 2.327 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 56 | I | DFI | 2.338 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 57 | K | COMP | 2.367 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.31E-03 |
| 58 | H | PIL | 3.394 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 59 | F | PEP | 3.411 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 60 | W | AUS | 3.417 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 61 | P | INY | 3.429 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 62 | X | DF | 3.515 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 63 | V | PEP | 3.580 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 64 | V | PFC | 3.613 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 65 | I | ALIV | 3.640 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 66 | Y | DC1 | 3.644 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 67 | K | PEP | 3.677 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 68 | N | PEP | 3.712 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 69 | N | PFC | 3.729 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 70 | K | PFC | 3.746 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 71 | F | DREN | 3.786 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 72 | Z | ALIV | 3.828 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 73 | G | INY | 3.834 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 74 | M | COMP | 3.855 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 75 | T | AUS | 3.860 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 76 | I | PEP | 3.908 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 77 | I | PFC | 3.932 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 78 | W | PEP | 3.985 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 79 | W | PFC | 4.011 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 80 | F | EH | 4.187 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 81 | M | PEP | 4.256 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 82 | M | PFC | 4.291 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 83 | M | INY | 4.297 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 84 | S | DF | 4.301 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 85 | S | PEP | 4.336 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 86 | S | PFC | 4.353 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 87 | L | PFC | 4.393 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 88 | U | DC | 4.439 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |

A4.4 Secuencia obtenida para un valor del parámetro n=0.2

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | - | - | 0.000 | 2.55E-02 | 1.76E+00 | 2.85E-01 |
| 1 | O | COMP | 0.129 | 2.43E-02 | 1.13E+00 | 1.91E-01 |
| 2 | D | FUSERV | 0.144 | 5.22E-03 | 3.32E-01 | 1.72E-01 |
| 3 | Q | RESG | 0.144 | 4.95E-03 | 3.11E-01 | 1.24E-01 |
| 4 | O | RESG | 0.145 | 4.79E-03 | 2.29E-01 | 1.13E-01 |
| 5 | A | VACIO | 0.145 | 4.26E-03 | 2.20E-01 | 5.54E-02 |
| 6 | I | RESG | 0.145 | 4.25E-03 | 2.20E-01 | 5.40E-02 |
| 7 | E | COMP | 0.183 | 2.21E-03 | 1.67E-01 | 5.40E-02 |
| 8 | Z | PRET | 0.194 | 1.72E-03 | 1.46E-01 | 5.39E-02 |
| 9 | Q | PRE | 0.202 | 1.68E-03 | 1.43E-01 | 4.66E-02 |
| 10 | J | EH | 0.224 | 1.67E-03 | 1.42E-01 | 3.22E-02 |
| 11 | I | PRE | 0.229 | 1.66E-03 | 1.41E-01 | 3.06E-02 |
| 12 | O | ALIV | 0.329 | 1.53E-03 | 7.50E-02 | 1.96E-02 |
| 13 | R | AUS | 0.333 | 1.53E-03 | 7.47E-02 | 1.92E-02 |
| 14 | R | GRU | 0.335 | 1.53E-03 | 7.45E-02 | 1.90E-02 |
| 15 | J | DREN | 0.376 | 1.53E-03 | 7.44E-02 | 1.64E-02 |
| 16 | O | PEP | 0.435 | 1.53E-03 | 7.44E-02 | 1.35E-02 |
| 17 | Q | DF | 0.441 | 1.53E-03 | 7.43E-02 | 1.32E-02 |
| 18 | A | PEP | 0.520 | 1.53E-03 | 7.43E-02 | 9.81E-03 |
| 19 | C | INYCIM | 0.525 | 1.53E-03 | 7.34E-02 | 9.68E-03 |
| 20 | C | INYCU | 0.525 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 9.65E-03 |
| 21 | Q | PEP | 0.612 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 7.13E-03 |
| 22 | O | PFC | 0.643 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 6.31E-03 |
| 23 | Q | PFC | 0.687 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 5.32E-03 |
| 24 | A | PFC | 0.727 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 4.53E-03 |
| 25 | G | PEP | 0.779 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 3.66E-03 |
| 26 | C | COMP | 0.809 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 3.26E-03 |
| 27 | U | PEP | 0.869 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 2.88E-03 |
| 28 | U | PFC | 0.899 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 2.75E-03 |
| 29 | G | PFC | 0.926 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 2.65E-03 |
| 30 | Z | AUS | 0.938 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 2.62E-03 |
| 31 | B | PEP | 1.037 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 2.37E-03 |
| 32 | B | PFC | 1.087 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 2.20E-03 |
| 33 | R | PEP | 1.167 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 2.02E-03 |
| 34 | T | PEP | 1.207 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.96E-03 |
| 35 | R | PFC | 1.247 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.90E-03 |
| 36 | P | PEP | 1.295 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.83E-03 |
| 37 | H | PFC | 1.325 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.80E-03 |
| 38 | J | PEP | 1.374 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.73E-03 |
| 39 | T | PFC | 1.394 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.71E-03 |
| 40 | P | PFC | 1.418 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.68E-03 |
| 41 | Y | PEP | 1.469 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.64E-03 |
| 42 | Z | DREN | 1.475 | 1.47E-03 | 6.88E-02 | 1.64E-03 |
| 43 | B | EIDC | 1.625 | 9.17E-04 | 6.57E-02 | 1.56E-03 |
| 44 | A | AUS | 1.629 | 9.17E-04 | 6.57E-02 | 1.56E-03 |

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 45 | A | LALIV | 1.771 | 8.92E-04 | 6.53E-02 | 1.49E-03 |
| 46 | C | PEP | 1.852 | 8.92E-04 | 6.53E-02 | 1.44E-03 |
| 47 | C | PFC | 1.894 | 8.92E-04 | 6.53E-02 | 1.42E-03 |
| 48 | Y | PFC | 1.919 | 8.92E-04 | 6.53E-02 | 1.41E-03 |
| 49 | T | ALIV | 2.088 | 7.98E-04 | 5.80E-02 | 1.35E-03 |
| 50 | E | CUEN | 2.119 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.35E-03 |
| 51 | X | PEP | 2.155 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.34E-03 |
| 52 | X | PFC | 2.174 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.33E-03 |
| 53 | Z | PEP | 2.239 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.32E-03 |
| 54 | V | AUS | 2.294 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 55 | Z | PFC | 2.327 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 56 | I | DFI | 2.338 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 57 | K | COMP | 2.367 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.31E-03 |
| 58 | H | PIL | 3.394 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 59 | F | PEP | 3.411 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 60 | W | AUS | 3.417 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 61 | P | INY | 3.429 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 62 | X | DF | 3.515 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 63 | V | PEP | 3.580 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 64 | V | PFC | 3.613 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 65 | I | ALIV | 3.640 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 66 | Y | DC1 | 3.644 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 67 | K | PEP | 3.677 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 68 | N | PEP | 3.712 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 69 | N | PFC | 3.729 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 70 | K | PFC | 3.746 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 71 | F | DREN | 3.786 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 72 | Z | ALIV | 3.828 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 73 | G | INY | 3.834 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 74 | M | COMP | 3.855 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 75 | T | AUS | 3.860 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 76 | I | PEP | 3.908 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 77 | I | PFC | 3.932 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 78 | W | PEP | 3.985 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 79 | W | PFC | 4.011 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 80 | F | EH | 4.187 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 81 | M | PEP | 4.256 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 82 | M | PFC | 4.291 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 83 | M | INY | 4.297 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 84 | S | DF | 4.301 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 85 | S | PEP | 4.336 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 86 | S | PFC | 4.353 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 87 | L | PFC | 4.393 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 88 | U | DC | 4.439 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |

A4.5 Secuencia obtenida para un valor del parámetro $n=0.33$

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | - | - | 0.000 | 2.55E-02 | 1.76E+00 | 2.85E-01 |
| 1 | D | FUSERV | 0.015 | 6.40E-03 | 9.61E-01 | 2.66E-01 |
| 2 | O | COMP | 0.144 | 5.22E-03 | 3.32E-01 | 1.72E-01 |
| 3 | Q | RESG | 0.144 | 4.95E-03 | 3.11E-01 | 1.24E-01 |
| 4 | O | RESG | 0.145 | 4.79E-03 | 2.29E-01 | 1.13E-01 |
| 5 | A | VACIO | 0.145 | 4.26E-03 | 2.20E-01 | 5.54E-02 |
| 6 | I | RESG | 0.145 | 4.25E-03 | 2.20E-01 | 5.40E-02 |
| 7 | E | COMP | 0.183 | 2.21E-03 | 1.67E-01 | 5.40E-02 |
| 8 | Z | PRET | 0.194 | 1.72E-03 | 1.46E-01 | 5.39E-02 |
| 9 | Q | PRE | 0.202 | 1.68E-03 | 1.43E-01 | 4.66E-02 |
| 10 | J | EH | 0.224 | 1.67E-03 | 1.42E-01 | 3.22E-02 |
| 11 | I | PRE | 0.229 | 1.66E-03 | 1.41E-01 | 3.06E-02 |
| 12 | O | ALIV | 0.329 | 1.53E-03 | 7.50E-02 | 1.96E-02 |
| 13 | R | AUS | 0.333 | 1.53E-03 | 7.47E-02 | 1.92E-02 |
| 14 | R | GRU | 0.335 | 1.53E-03 | 7.45E-02 | 1.90E-02 |
| 15 | J | DREN | 0.376 | 1.53E-03 | 7.44E-02 | 1.64E-02 |
| 16 | O | PEP | 0.435 | 1.53E-03 | 7.44E-02 | 1.35E-02 |
| 17 | Q | DF | 0.441 | 1.53E-03 | 7.43E-02 | 1.32E-02 |
| 18 | A | PEP | 0.520 | 1.53E-03 | 7.43E-02 | 9.81E-03 |
| 19 | C | INYCIM | 0.525 | 1.53E-03 | 7.34E-02 | 9.68E-03 |
| 20 | C | INYCU | 0.525 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 9.65E-03 |
| 21 | Q | PEP | 0.612 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 7.13E-03 |
| 22 | O | PFC | 0.643 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 6.31E-03 |
| 23 | Q | PFC | 0.687 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 5.32E-03 |
| 24 | A | PFC | 0.727 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 4.53E-03 |
| 25 | G | PEP | 0.779 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 3.66E-03 |
| 26 | C | COMP | 0.809 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 3.26E-03 |
| 27 | U | PEP | 0.869 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 2.88E-03 |
| 28 | U | PFC | 0.899 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 2.75E-03 |
| 29 | G | PFC | 0.926 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 2.65E-03 |
| 30 | Z | AUS | 0.938 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 2.62E-03 |
| 31 | B | PEP | 1.037 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 2.37E-03 |
| 32 | B | PFC | 1.087 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 2.20E-03 |
| 33 | R | PEP | 1.167 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 2.02E-03 |
| 34 | T | PEP | 1.207 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.96E-03 |
| 35 | R | PFC | 1.247 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.90E-03 |
| 36 | P | PEP | 1.295 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.83E-03 |
| 37 | H | PFC | 1.325 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.80E-03 |
| 38 | J | PEP | 1.374 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.73E-03 |
| 39 | T | PFC | 1.394 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.71E-03 |
| 40 | P | PFC | 1.418 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.68E-03 |
| 41 | B | EIDC | 1.569 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.61E-03 |
| 42 | Y | PEP | 1.620 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.57E-03 |
| 43 | Z | DREN | 1.625 | 9.17E-04 | 6.57E-02 | 1.56E-03 |
| 44 | A | AUS | 1.629 | 9.17E-04 | 6.57E-02 | 1.56E-03 |

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 45 | A | LALIV | 1.771 | 8.92E-04 | 6.53E-02 | 1.49E-03 |
| 46 | C | PEP | 1.852 | 8.92E-04 | 6.53E-02 | 1.44E-03 |
| 47 | C | PFC | 1.894 | 8.92E-04 | 6.53E-02 | 1.42E-03 |
| 48 | E | CUEN | 1.925 | 5.56E-04 | 5.66E-02 | 1.41E-03 |
| 49 | T | ALIV | 2.093 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.36E-03 |
| 50 | Y | PFC | 2.119 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.35E-03 |
| 51 | X | PEP | 2.155 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.34E-03 |
| 52 | X | PFC | 2.174 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.33E-03 |
| 53 | Z | PEP | 2.239 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.32E-03 |
| 54 | V | AUS | 2.294 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 55 | Z | PFC | 2.327 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 56 | I | DFI | 2.338 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 57 | K | COMP | 2.367 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.31E-03 |
| 58 | H | PIL | 3.394 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 59 | F | PEP | 3.411 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 60 | W | AUS | 3.417 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 61 | P | INY | 3.429 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 62 | X | DF | 3.515 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 63 | V | PEP | 3.580 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 64 | V | PFC | 3.613 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 65 | I | ALIV | 3.640 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 66 | Y | DC1 | 3.644 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 67 | K | PEP | 3.677 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 68 | N | PEP | 3.712 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 69 | N | PFC | 3.729 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 70 | K | PFC | 3.746 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 71 | F | DREN | 3.786 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 72 | Z | ALIV | 3.828 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 73 | G | INY | 3.834 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 74 | M | COMP | 3.855 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 75 | T | AUS | 3.860 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 76 | I | PEP | 3.908 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 77 | I | PFC | 3.932 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 78 | W | PEP | 3.985 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 79 | W | PFC | 4.011 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 80 | F | EH | 4.187 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 81 | M | PEP | 4.256 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 82 | M | PFC | 4.291 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 83 | M | INY | 4.297 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 84 | S | DF | 4.301 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 85 | S | PEP | 4.336 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 86 | S | PFC | 4.353 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 87 | L | PFC | 4.393 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 88 | U | DC | 4.439 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |

A4.6 Secuencia obtenida para un valor del parámetro n=0.5

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | - | - | 0.000 | 2.55E-02 | 1.76E+00 | 2.85E-01 |
| 1 | D | FUSERV | 0.015 | 6.40E-03 | 9.61E-01 | 2.66E-01 |
| 2 | O | COMP | 0.144 | 5.22E-03 | 3.32E-01 | 1.72E-01 |
| 3 | Q | RESG | 0.144 | 4.95E-03 | 3.11E-01 | 1.24E-01 |
| 4 | O | RESG | 0.145 | 4.79E-03 | 2.29E-01 | 1.13E-01 |
| 5 | A | VACIO | 0.145 | 4.26E-03 | 2.20E-01 | 5.54E-02 |
| 6 | E | COMP | 0.183 | 2.22E-03 | 1.67E-01 | 5.53E-02 |
| 7 | I | RESG | 0.183 | 2.21E-03 | 1.67E-01 | 5.40E-02 |
| 8 | Z | PRET | 0.194 | 1.72E-03 | 1.46E-01 | 5.39E-02 |
| 9 | Q | PRE | 0.202 | 1.68E-03 | 1.43E-01 | 4.66E-02 |
| 10 | J | EH | 0.224 | 1.67E-03 | 1.42E-01 | 3.22E-02 |
| 11 | O | ALIV | 0.324 | 1.54E-03 | 7.58E-02 | 2.12E-02 |
| 12 | I | PRE | 0.329 | 1.53E-03 | 7.50E-02 | 1.96E-02 |
| 13 | R | AUS | 0.333 | 1.53E-03 | 7.47E-02 | 1.92E-02 |
| 14 | R | GRU | 0.335 | 1.53E-03 | 7.45E-02 | 1.90E-02 |
| 15 | J | DREN | 0.376 | 1.53E-03 | 7.44E-02 | 1.64E-02 |
| 16 | O | PEP | 0.435 | 1.53E-03 | 7.44E-02 | 1.35E-02 |
| 17 | Q | DF | 0.441 | 1.53E-03 | 7.43E-02 | 1.32E-02 |
| 18 | A | PEP | 0.520 | 1.53E-03 | 7.43E-02 | 9.81E-03 |
| 19 | C | INYCIM | 0.525 | 1.53E-03 | 7.34E-02 | 9.68E-03 |
| 20 | C | INYCU | 0.525 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 9.65E-03 |
| 21 | Q | PEP | 0.612 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 7.13E-03 |
| 22 | O | PFC | 0.643 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 6.31E-03 |
| 23 | Q | PFC | 0.687 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 5.32E-03 |
| 24 | A | PFC | 0.727 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 4.53E-03 |
| 25 | G | PEP | 0.779 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 3.66E-03 |
| 26 | C | COMP | 0.809 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 3.26E-03 |
| 27 | U | PEP | 0.869 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 2.88E-03 |
| 28 | U | PFC | 0.899 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 2.75E-03 |
| 29 | G | PFC | 0.926 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 2.65E-03 |
| 30 | Z | AUS | 0.938 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 2.62E-03 |
| 31 | B | PEP | 1.037 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 2.37E-03 |
| 32 | B | PFC | 1.087 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 2.20E-03 |
| 33 | R | PEP | 1.167 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 2.02E-03 |
| 34 | T | PEP | 1.207 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.96E-03 |
| 35 | R | PFC | 1.247 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.90E-03 |
| 36 | P | PEP | 1.295 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.83E-03 |
| 37 | H | PFC | 1.325 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.80E-03 |
| 38 | J | PEP | 1.374 | 1.52E-03 | 7.08E-02 | 1.73E-03 |
| 39 | B | EIDC | 1.525 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.66E-03 |
| 40 | T | PFC | 1.545 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.63E-03 |
| 41 | P | PFC | 1.569 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.61E-03 |
| 42 | Y | PEP | 1.620 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.57E-03 |
| 43 | Z | DREN | 1.625 | 9.17E-04 | 6.57E-02 | 1.56E-03 |
| 44 | A | AUS | 1.629 | 9.17E-04 | 6.57E-02 | 1.56E-03 |

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 45 | A | LALIV | 1.771 | 8.92E-04 | 6.53E-02 | 1.49E-03 |
| 46 | C | PEP | 1.852 | 8.92E-04 | 6.53E-02 | 1.44E-03 |
| 47 | C | PFC | 1.894 | 8.92E-04 | 6.53E-02 | 1.42E-03 |
| 48 | E | CUEN | 1.925 | 5.56E-04 | 5.66E-02 | 1.41E-03 |
| 49 | T | ALIV | 2.093 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.36E-03 |
| 50 | Y | PFC | 2.119 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.35E-03 |
| 51 | X | PEP | 2.155 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.34E-03 |
| 52 | X | PFC | 2.174 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.33E-03 |
| 53 | Z | PEP | 2.239 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.32E-03 |
| 54 | V | AUS | 2.294 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 55 | Z | PFC | 2.327 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 56 | I | DFI | 2.338 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 57 | K | COMP | 2.367 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.31E-03 |
| 58 | H | PIL | 3.394 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 59 | F | PEP | 3.411 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 60 | W | AUS | 3.417 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 61 | P | INY | 3.429 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 62 | X | DF | 3.515 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 63 | V | PEP | 3.580 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 64 | V | PFC | 3.613 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 65 | I | ALIV | 3.640 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 66 | Y | DC1 | 3.644 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 67 | K | PEP | 3.677 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 68 | N | PEP | 3.712 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 69 | N | PFC | 3.729 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 70 | K | PFC | 3.746 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 71 | F | DREN | 3.786 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 72 | Z | ALIV | 3.828 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 73 | G | INY | 3.834 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 74 | M | COMP | 3.855 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 75 | T | AUS | 3.860 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 76 | I | PEP | 3.908 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 77 | I | PFC | 3.932 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 78 | W | PEP | 3.985 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 79 | W | PFC | 4.011 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 80 | F | EH | 4.187 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 81 | M | PEP | 4.256 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 82 | M | PFC | 4.291 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 83 | M | INY | 4.297 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 84 | S | DF | 4.301 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 85 | S | PEP | 4.336 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 86 | S | PFC | 4.353 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 87 | L | PFC | 4.393 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 88 | U | DC | 4.439 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |

A4.7 Secuencia obtenida para un valor del parámetro $n=0.75$

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | - | - | 0.000 | 2.55E-02 | 1.76E+00 | 2.85E-01 |
| 1 | D | FUSERV | 0.015 | 6.40E-03 | 9.61E-01 | 2.66E-01 |
| 2 | O | COMP | 0.144 | 5.22E-03 | 3.32E-01 | 1.72E-01 |
| 3 | Q | RESG | 0.144 | 4.95E-03 | 3.11E-01 | 1.24E-01 |
| 4 | A | VACIO | 0.144 | 4.42E-03 | 3.03E-01 | 6.68E-02 |
| 5 | O | RESG | 0.145 | 4.26E-03 | 2.20E-01 | 5.54E-02 |
| 6 | E | COMP | 0.183 | 2.22E-03 | 1.67E-01 | 5.53E-02 |
| 7 | Z | PRET | 0.194 | 1.73E-03 | 1.47E-01 | 5.53E-02 |
| 8 | I | RESG | 0.194 | 1.72E-03 | 1.46E-01 | 5.39E-02 |
| 9 | Q | PRE | 0.202 | 1.68E-03 | 1.43E-01 | 4.66E-02 |
| 10 | J | EH | 0.224 | 1.67E-03 | 1.42E-01 | 3.22E-02 |
| 11 | O | ALIV | 0.324 | 1.54E-03 | 7.58E-02 | 2.12E-02 |
| 12 | I | PRE | 0.329 | 1.53E-03 | 7.50E-02 | 1.96E-02 |
| 13 | R | AUS | 0.333 | 1.53E-03 | 7.47E-02 | 1.92E-02 |
| 14 | R | GRU | 0.335 | 1.53E-03 | 7.45E-02 | 1.90E-02 |
| 15 | J | DREN | 0.376 | 1.53E-03 | 7.44E-02 | 1.64E-02 |
| 16 | O | PEP | 0.435 | 1.53E-03 | 7.44E-02 | 1.35E-02 |
| 17 | Q | DF | 0.441 | 1.53E-03 | 7.43E-02 | 1.32E-02 |
| 18 | A | PEP | 0.520 | 1.53E-03 | 7.43E-02 | 9.81E-03 |
| 19 | C | INYCIM | 0.525 | 1.53E-03 | 7.34E-02 | 9.68E-03 |
| 20 | C | INYCU | 0.525 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 9.65E-03 |
| 21 | Q | PEP | 0.612 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 7.13E-03 |
| 22 | O | PFC | 0.643 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 6.31E-03 |
| 23 | Q | PFC | 0.687 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 5.32E-03 |
| 24 | A | PFC | 0.727 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 4.53E-03 |
| 25 | G | PEP | 0.779 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 3.66E-03 |
| 26 | C | COMP | 0.809 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 3.26E-03 |
| 27 | U | PEP | 0.869 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 2.88E-03 |
| 28 | U | PFC | 0.899 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 2.75E-03 |
| 29 | G | PFC | 0.926 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 2.65E-03 |
| 30 | B | EIDC | 1.076 | 9.67E-04 | 6.80E-02 | 2.50E-03 |
| 31 | Z | AUS | 1.089 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 2.47E-03 |
| 32 | R | PEP | 1.169 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 2.29E-03 |
| 33 | B | PEP | 1.267 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 2.07E-03 |
| 34 | B | PFC | 1.317 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.95E-03 |
| 35 | T | PEP | 1.357 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.88E-03 |
| 36 | R | PFC | 1.398 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.82E-03 |
| 37 | P | PEP | 1.445 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.76E-03 |
| 38 | H | PFC | 1.475 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.72E-03 |
| 39 | J | PEP | 1.525 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.66E-03 |
| 40 | T | PFC | 1.545 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.63E-03 |
| 41 | P | PFC | 1.569 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.61E-03 |
| 42 | Y | PEP | 1.620 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.57E-03 |
| 43 | Z | DREN | 1.625 | 9.17E-04 | 6.57E-02 | 1.56E-03 |
| 44 | E | CUEN | 1.656 | 5.81E-04 | 5.70E-02 | 1.56E-03 |

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 45 | A | AUS | 1.661 | 5.81E-04 | 5.70E-02 | 1.56E-03 |
| 46 | A | LALIV | 1.802 | 5.56E-04 | 5.66E-02 | 1.48E-03 |
| 47 | T | ALIV | 1.971 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.43E-03 |
| 48 | C | PEP | 2.052 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.38E-03 |
| 49 | C | PFC | 2.093 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.36E-03 |
| 50 | Y | PFC | 2.119 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.35E-03 |
| 51 | X | PEP | 2.155 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.34E-03 |
| 52 | X | PFC | 2.174 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.33E-03 |
| 53 | Z | PEP | 2.239 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.32E-03 |
| 54 | V | AUS | 2.294 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 55 | Z | PFC | 2.327 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 56 | I | DFI | 2.338 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 57 | K | COMP | 2.367 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.31E-03 |
| 58 | H | PIL | 3.394 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 59 | F | PEP | 3.411 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 60 | W | AUS | 3.417 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 61 | P | INY | 3.429 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 62 | X | DF | 3.515 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 63 | V | PEP | 3.580 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 64 | V | PFC | 3.613 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 65 | I | ALIV | 3.640 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 66 | Y | DC1 | 3.644 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 67 | K | PEP | 3.677 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 68 | N | PEP | 3.712 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 69 | N | PFC | 3.729 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 70 | K | PFC | 3.746 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 71 | F | DREN | 3.786 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 72 | Z | ALIV | 3.828 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 73 | G | INY | 3.834 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 74 | M | COMP | 3.855 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 75 | T | AUS | 3.860 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 76 | I | PEP | 3.908 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 77 | I | PFC | 3.932 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 78 | W | PEP | 3.985 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 79 | W | PFC | 4.011 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 80 | F | EH | 4.187 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 81 | M | PEP | 4.256 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 82 | M | PFC | 4.291 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 83 | M | INY | 4.297 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 84 | S | DF | 4.301 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 85 | S | PEP | 4.336 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 86 | S | PFC | 4.353 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 87 | L | PFC | 4.393 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 88 | U | DC | 4.439 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |

A4.8 Secuencia obtenida para un valor del parámetro n=1.5

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | - | - | 0.000 | 2.55E-02 | 1.76E+00 | 2.85E-01 |
| 1 | D | FUSERV | 0.015 | 6.40E-03 | 9.61E-01 | 2.66E-01 |
| 2 | O | COMP | 0.144 | 5.22E-03 | 3.32E-01 | 1.72E-01 |
| 3 | A | VACIO | 0.144 | 4.69E-03 | 3.24E-01 | 1.15E-01 |
| 4 | Q | RESG | 0.144 | 4.42E-03 | 3.03E-01 | 6.68E-02 |
| 5 | O | RESG | 0.145 | 4.26E-03 | 2.20E-01 | 5.54E-02 |
| 6 | E | COMP | 0.183 | 2.22E-03 | 1.67E-01 | 5.53E-02 |
| 7 | Z | PRET | 0.194 | 1.73E-03 | 1.47E-01 | 5.53E-02 |
| 8 | I | RESG | 0.194 | 1.72E-03 | 1.46E-01 | 5.39E-02 |
| 9 | Q | PRE | 0.202 | 1.68E-03 | 1.43E-01 | 4.66E-02 |
| 10 | O | ALIV | 0.302 | 1.55E-03 | 7.68E-02 | 3.56E-02 |
| 11 | J | EH | 0.324 | 1.54E-03 | 7.58E-02 | 2.12E-02 |
| 12 | I | PRE | 0.329 | 1.53E-03 | 7.50E-02 | 1.96E-02 |
| 13 | R | AUS | 0.333 | 1.53E-03 | 7.47E-02 | 1.92E-02 |
| 14 | R | GRU | 0.335 | 1.53E-03 | 7.45E-02 | 1.90E-02 |
| 15 | J | DREN | 0.376 | 1.53E-03 | 7.44E-02 | 1.64E-02 |
| 16 | O | PEP | 0.435 | 1.53E-03 | 7.44E-02 | 1.35E-02 |
| 17 | Q | DF | 0.441 | 1.53E-03 | 7.43E-02 | 1.32E-02 |
| 18 | A | PEP | 0.520 | 1.53E-03 | 7.43E-02 | 9.81E-03 |
| 19 | C | INYCIM | 0.525 | 1.53E-03 | 7.34E-02 | 9.68E-03 |
| 20 | C | INYCU | 0.525 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 9.65E-03 |
| 21 | Q | PEP | 0.612 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 7.13E-03 |
| 22 | O | PFC | 0.643 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 6.31E-03 |
| 23 | Q | PFC | 0.687 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 5.32E-03 |
| 24 | A | PFC | 0.727 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 4.53E-03 |
| 25 | G | PEP | 0.779 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 3.66E-03 |
| 26 | C | COMP | 0.809 | 1.52E-03 | 7.11E-02 | 3.26E-03 |
| 27 | B | EIDC | 0.960 | 9.67E-04 | 6.80E-02 | 3.11E-03 |
| 28 | U | PEP | 1.020 | 9.67E-04 | 6.80E-02 | 2.73E-03 |
| 29 | U | PFC | 1.050 | 9.67E-04 | 6.80E-02 | 2.61E-03 |
| 30 | G | PFC | 1.076 | 9.67E-04 | 6.80E-02 | 2.50E-03 |
| 31 | Z | AUS | 1.089 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 2.47E-03 |
| 32 | R | PEP | 1.169 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 2.29E-03 |
| 33 | B | PEP | 1.267 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 2.07E-03 |
| 34 | B | PFC | 1.317 | 9.67E-04 | 6.77E-02 | 1.95E-03 |
| 35 | E | CUEN | 1.348 | 6.31E-04 | 5.91E-02 | 1.94E-03 |
| 36 | T | ALIV | 1.517 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.84E-03 |
| 37 | R | PFC | 1.557 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.78E-03 |
| 38 | P | PEP | 1.605 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.71E-03 |
| 39 | H | PFC | 1.635 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.67E-03 |
| 40 | J | PEP | 1.684 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.61E-03 |
| 41 | P | PFC | 1.708 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.59E-03 |
| 42 | Y | PEP | 1.759 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.55E-03 |
| 43 | Z | DREN | 1.765 | 4.87E-04 | 4.98E-02 | 1.54E-03 |
| 44 | T | PEP | 1.805 | 4.87E-04 | 4.98E-02 | 1.51E-03 |

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 45 | A | AUS | 1.809 | 4.87E-04 | 4.98E-02 | 1.51E-03 |
| 46 | A | LALIV | 1.950 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.44E-03 |
| 47 | C | PEP | 2.032 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.39E-03 |
| 48 | C | PFC | 2.073 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.37E-03 |
| 49 | T | PFC | 2.093 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.36E-03 |
| 50 | Y | PFC | 2.119 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.35E-03 |
| 51 | X | PEP | 2.155 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.34E-03 |
| 52 | X | PFC | 2.174 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.33E-03 |
| 53 | Z | PEP | 2.239 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.32E-03 |
| 54 | V | AUS | 2.294 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 55 | Z | PFC | 2.327 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 56 | I | DFI | 2.338 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 57 | K | COMP | 2.367 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.31E-03 |
| 58 | H | PIL | 3.394 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 59 | F | PEP | 3.411 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 60 | W | AUS | 3.417 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 61 | P | INY | 3.429 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 62 | X | DF | 3.515 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 63 | V | PEP | 3.580 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 64 | V | PFC | 3.613 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 65 | I | ALIV | 3.640 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 66 | Y | DC1 | 3.644 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 67 | K | PEP | 3.677 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 68 | N | PEP | 3.712 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 69 | N | PFC | 3.729 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 70 | K | PFC | 3.746 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 71 | F | DREN | 3.786 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 72 | Z | ALIV | 3.828 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 73 | G | INY | 3.834 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 74 | M | COMP | 3.855 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 75 | T | AUS | 3.860 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 76 | I | PEP | 3.908 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 77 | I | PFC | 3.932 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 78 | W | PEP | 3.985 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 79 | W | PFC | 4.011 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 80 | F | EH | 4.187 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 81 | M | PEP | 4.256 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 82 | M | PFC | 4.291 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 83 | M | INY | 4.297 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 84 | S | DF | 4.301 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 85 | S | PEP | 4.336 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 86 | S | PFC | 4.353 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 87 | L | PFC | 4.393 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 88 | U | DC | 4.439 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |

A4.9 Secuencia obtenida para un valor del parámetro n=2

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | - | - | 0.000 | 2.55E-02 | 1.76E+00 | 2.85E-01 |
| 1 | D | FUSERV | 0.015 | 6.40E-03 | 9.61E-01 | 2.66E-01 |
| 2 | O | COMP | 0.144 | 5.22E-03 | 3.32E-01 | 1.72E-01 |
| 3 | A | VACIO | 0.144 | 4.69E-03 | 3.24E-01 | 1.15E-01 |
| 4 | Q | RESG | 0.144 | 4.42E-03 | 3.03E-01 | 6.68E-02 |
| 5 | O | RESG | 0.145 | 4.26E-03 | 2.20E-01 | 5.54E-02 |
| 6 | E | COMP | 0.183 | 2.22E-03 | 1.67E-01 | 5.53E-02 |
| 7 | Z | PRET | 0.194 | 1.73E-03 | 1.47E-01 | 5.53E-02 |
| 8 | I | RESG | 0.194 | 1.72E-03 | 1.46E-01 | 5.39E-02 |
| 9 | Q | PRE | 0.202 | 1.68E-03 | 1.43E-01 | 4.66E-02 |
| 10 | O | ALIV | 0.302 | 1.55E-03 | 7.68E-02 | 3.56E-02 |
| 11 | J | EH | 0.324 | 1.54E-03 | 7.58E-02 | 2.12E-02 |
| 12 | I | PRE | 0.329 | 1.53E-03 | 7.50E-02 | 1.96E-02 |
| 13 | R | AUS | 0.333 | 1.53E-03 | 7.47E-02 | 1.92E-02 |
| 14 | R | GRU | 0.335 | 1.53E-03 | 7.45E-02 | 1.90E-02 |
| 15 | J | DREN | 0.376 | 1.53E-03 | 7.44E-02 | 1.64E-02 |
| 16 | O | PEP | 0.435 | 1.53E-03 | 7.44E-02 | 1.35E-02 |
| 17 | Q | DF | 0.441 | 1.53E-03 | 7.43E-02 | 1.32E-02 |
| 18 | A | PEP | 0.520 | 1.53E-03 | 7.43E-02 | 9.81E-03 |
| 19 | C | INYCIM | 0.525 | 1.53E-03 | 7.34E-02 | 9.68E-03 |
| 20 | C | INYCU | 0.525 | 1.53E-03 | 7.33E-02 | 9.65E-03 |
| 21 | B | EIDC | 0.676 | 9.68E-04 | 7.02E-02 | 9.50E-03 |
| 22 | Q | PEP | 0.763 | 9.68E-04 | 7.02E-02 | 6.98E-03 |
| 23 | O | PFC | 0.793 | 9.68E-04 | 7.02E-02 | 6.16E-03 |
| 24 | Q | PFC | 0.837 | 9.68E-04 | 7.02E-02 | 5.17E-03 |
| 25 | A | PFC | 0.877 | 9.68E-04 | 7.02E-02 | 4.38E-03 |
| 26 | G | PEP | 0.930 | 9.68E-04 | 7.02E-02 | 3.51E-03 |
| 27 | C | COMP | 0.960 | 9.67E-04 | 6.80E-02 | 3.11E-03 |
| 28 | U | PEP | 1.020 | 9.67E-04 | 6.80E-02 | 2.73E-03 |
| 29 | U | PFC | 1.050 | 9.67E-04 | 6.80E-02 | 2.61E-03 |
| 30 | G | PFC | 1.076 | 9.67E-04 | 6.80E-02 | 2.50E-03 |
| 31 | E | CUEN | 1.108 | 6.31E-04 | 5.93E-02 | 2.49E-03 |
| 32 | Z | AUS | 1.120 | 6.31E-04 | 5.91E-02 | 2.46E-03 |
| 33 | T | ALIV | 1.289 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 2.36E-03 |
| 34 | R | PEP | 1.369 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 2.18E-03 |
| 35 | B | PEP | 1.467 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.96E-03 |
| 36 | B | PFC | 1.517 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.84E-03 |
| 37 | R | PFC | 1.557 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.78E-03 |
| 38 | P | PEP | 1.605 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.71E-03 |
| 39 | H | PFC | 1.635 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.67E-03 |
| 40 | J | PEP | 1.684 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.61E-03 |
| 41 | P | PFC | 1.708 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.59E-03 |
| 42 | Y | PEP | 1.759 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.55E-03 |
| 43 | Z | DREN | 1.765 | 4.87E-04 | 4.98E-02 | 1.54E-03 |
| 44 | T | PEP | 1.805 | 4.87E-04 | 4.98E-02 | 1.51E-03 |

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 45 | A | AUS | 1.809 | 4.87E-04 | 4.98E-02 | 1.51E-03 |
| 46 | A | LALIV | 1.950 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.44E-03 |
| 47 | C | PEP | 2.032 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.39E-03 |
| 48 | C | PFC | 2.073 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.37E-03 |
| 49 | T | PFC | 2.093 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.36E-03 |
| 50 | Y | PFC | 2.119 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.35E-03 |
| 51 | X | PEP | 2.155 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.34E-03 |
| 52 | X | PFC | 2.174 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.33E-03 |
| 53 | Z | PEP | 2.239 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.32E-03 |
| 54 | V | AUS | 2.294 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 55 | Z | PFC | 2.327 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 56 | I | DFI | 2.338 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 57 | K | COMP | 2.367 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.31E-03 |
| 58 | H | PIL | 3.394 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 59 | F | PEP | 3.411 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 60 | W | AUS | 3.417 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 61 | P | INY | 3.429 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 62 | X | DF | 3.515 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 63 | V | PEP | 3.580 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 64 | V | PFC | 3.613 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 65 | I | ALIV | 3.640 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 66 | Y | DC1 | 3.644 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 67 | K | PEP | 3.677 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 68 | N | PEP | 3.712 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 69 | N | PFC | 3.729 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 70 | K | PFC | 3.746 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 71 | F | DREN | 3.786 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 72 | Z | ALIV | 3.828 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 73 | G | INY | 3.834 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 74 | M | COMP | 3.855 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 75 | T | AUS | 3.860 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 76 | I | PEP | 3.908 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 77 | I | PFC | 3.932 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 78 | W | PEP | 3.985 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 79 | W | PFC | 4.011 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 80 | F | EH | 4.187 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 81 | M | PEP | 4.256 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 82 | M | PFC | 4.291 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 83 | M | INY | 4.297 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 84 | S | DF | 4.301 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 85 | S | PEP | 4.336 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 86 | S | PFC | 4.353 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 87 | L | PFC | 4.393 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 88 | U | DC | 4.439 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |

A4.10 Secuencia obtenida para un valor del parámetro n=3

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | - | - | 0.000 | 2.55E-02 | 1.76E+00 | 2.85E-01 |
| 1 | D | FUSERV | 0.015 | 6.40E-03 | 9.61E-01 | 2.66E-01 |
| 2 | O | COMP | 0.144 | 5.22E-03 | 3.32E-01 | 1.72E-01 |
| 3 | A | VACIO | 0.144 | 4.69E-03 | 3.24E-01 | 1.15E-01 |
| 4 | Q | RESG | 0.144 | 4.42E-03 | 3.03E-01 | 6.68E-02 |
| 5 | O | ALIV | 0.244 | 4.19E-03 | 1.87E-01 | 4.89E-02 |
| 6 | O | RESG | 0.245 | 4.13E-03 | 1.54E-01 | 4.44E-02 |
| 7 | Z | PRET | 0.257 | 3.63E-03 | 1.34E-01 | 4.43E-02 |
| 8 | E | COMP | 0.295 | 1.60E-03 | 8.05E-02 | 4.43E-02 |
| 9 | I | RESG | 0.295 | 1.59E-03 | 7.99E-02 | 4.29E-02 |
| 10 | Q | PRE | 0.302 | 1.55E-03 | 7.68E-02 | 3.56E-02 |
| 11 | J | EH | 0.324 | 1.54E-03 | 7.58E-02 | 2.12E-02 |
| 12 | I | PRE | 0.329 | 1.53E-03 | 7.50E-02 | 1.96E-02 |
| 13 | B | EIDC | 0.480 | 9.73E-04 | 7.19E-02 | 1.94E-02 |
| 14 | R | AUS | 0.483 | 9.72E-04 | 7.16E-02 | 1.91E-02 |
| 15 | R | GRU | 0.486 | 9.72E-04 | 7.14E-02 | 1.88E-02 |
| 16 | J | DREN | 0.526 | 9.71E-04 | 7.13E-02 | 1.63E-02 |
| 17 | O | PEP | 0.586 | 9.71E-04 | 7.13E-02 | 1.33E-02 |
| 18 | Q | DF | 0.592 | 9.69E-04 | 7.11E-02 | 1.31E-02 |
| 19 | A | PEP | 0.671 | 9.69E-04 | 7.11E-02 | 9.66E-03 |
| 20 | C | INYCIM | 0.675 | 9.69E-04 | 7.03E-02 | 9.53E-03 |
| 21 | C | INYCU | 0.676 | 9.68E-04 | 7.02E-02 | 9.50E-03 |
| 22 | Q | PEP | 0.763 | 9.68E-04 | 7.02E-02 | 6.98E-03 |
| 23 | O | PFC | 0.793 | 9.68E-04 | 7.02E-02 | 6.16E-03 |
| 24 | Q | PFC | 0.837 | 9.68E-04 | 7.02E-02 | 5.17E-03 |
| 25 | A | PFC | 0.877 | 9.68E-04 | 7.02E-02 | 4.38E-03 |
| 26 | G | PEP | 0.930 | 9.68E-04 | 7.02E-02 | 3.51E-03 |
| 27 | C | COMP | 0.960 | 9.67E-04 | 6.80E-02 | 3.11E-03 |
| 28 | E | CUEN | 0.991 | 6.31E-04 | 5.93E-02 | 3.11E-03 |
| 29 | U | PEP | 1.051 | 6.31E-04 | 5.93E-02 | 2.73E-03 |
| 30 | T | ALIV | 1.219 | 5.37E-04 | 5.21E-02 | 2.63E-03 |
| 31 | U | PFC | 1.249 | 5.37E-04 | 5.21E-02 | 2.50E-03 |
| 32 | G | PFC | 1.276 | 5.37E-04 | 5.21E-02 | 2.39E-03 |
| 33 | Z | AUS | 1.289 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 2.36E-03 |
| 34 | R | PEP | 1.369 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 2.18E-03 |
| 35 | B | PEP | 1.467 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.96E-03 |
| 36 | B | PFC | 1.517 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.84E-03 |
| 37 | R | PFC | 1.557 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.78E-03 |
| 38 | P | PEP | 1.605 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.71E-03 |
| 39 | H | PFC | 1.635 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.67E-03 |
| 40 | J | PEP | 1.684 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.61E-03 |
| 41 | P | PFC | 1.708 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.59E-03 |
| 42 | Y | PEP | 1.759 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.55E-03 |
| 43 | Z | DREN | 1.765 | 4.87E-04 | 4.98E-02 | 1.54E-03 |
| 44 | T | PEP | 1.805 | 4.87E-04 | 4.98E-02 | 1.51E-03 |

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 45 | A | AUS | 1.809 | 4.87E-04 | 4.98E-02 | 1.51E-03 |
| 46 | A | LALIV | 1.950 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.44E-03 |
| 47 | C | PEP | 2.032 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.39E-03 |
| 48 | C | PFC | 2.073 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.37E-03 |
| 49 | T | PFC | 2.093 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.36E-03 |
| 50 | Y | PFC | 2.119 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.35E-03 |
| 51 | X | PEP | 2.155 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.34E-03 |
| 52 | X | PFC | 2.174 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.33E-03 |
| 53 | Z | PEP | 2.239 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.32E-03 |
| 54 | V | AUS | 2.294 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 55 | Z | PFC | 2.327 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 56 | I | DFI | 2.338 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 57 | K | COMP | 2.367 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.31E-03 |
| 58 | H | PIL | 3.394 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 59 | F | PEP | 3.411 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 60 | W | AUS | 3.417 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 61 | P | INY | 3.429 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 62 | X | DF | 3.515 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 63 | V | PEP | 3.580 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 64 | V | PFC | 3.613 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 65 | I | ALIV | 3.640 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 66 | Y | DC1 | 3.644 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 67 | K | PEP | 3.677 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 68 | N | PEP | 3.712 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 69 | N | PFC | 3.729 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 70 | K | PFC | 3.746 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 71 | F | DREN | 3.786 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 72 | Z | ALIV | 3.828 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 73 | G | INY | 3.834 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 74 | M | COMP | 3.855 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 75 | T | AUS | 3.860 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 76 | I | PEP | 3.908 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 77 | I | PFC | 3.932 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 78 | W | PEP | 3.985 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 79 | W | PFC | 4.011 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 80 | F | EH | 4.187 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 81 | M | PEP | 4.256 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 82 | M | PFC | 4.291 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 83 | M | INY | 4.297 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 84 | S | DF | 4.301 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 85 | S | PEP | 4.336 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 86 | S | PFC | 4.353 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 87 | L | PFC | 4.393 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 88 | U | DC | 4.439 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |

A4.11 Secuencia obtenida para un valor del parámetro n=5

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | - | - | 0.000 | 2.55E-02 | 1.76E+00 | 2.85E-01 |
| 1 | D | FUSERV | 0.015 | 6.40E-03 | 9.61E-01 | 2.66E-01 |
| 2 | O | COMP | 0.144 | 5.22E-03 | 3.32E-01 | 1.72E-01 |
| 3 | A | VACIO | 0.144 | 4.69E-03 | 3.24E-01 | 1.15E-01 |
| 4 | Q | RESG | 0.144 | 4.42E-03 | 3.03E-01 | 6.68E-02 |
| 5 | O | ALIV | 0.244 | 4.19E-03 | 1.87E-01 | 4.89E-02 |
| 6 | Z | PRET | 0.256 | 3.70E-03 | 1.66E-01 | 4.88E-02 |
| 7 | E | COMP | 0.293 | 1.66E-03 | 1.13E-01 | 4.88E-02 |
| 8 | O | RESG | 0.295 | 1.60E-03 | 8.05E-02 | 4.43E-02 |
| 9 | I | RESG | 0.295 | 1.59E-03 | 7.99E-02 | 4.29E-02 |
| 10 | B | EIDC | 0.445 | 1.03E-03 | 7.68E-02 | 4.28E-02 |
| 11 | Q | PRE | 0.453 | 9.92E-04 | 7.36E-02 | 3.54E-02 |
| 12 | J | EH | 0.475 | 9.84E-04 | 7.27E-02 | 2.10E-02 |
| 13 | I | PRE | 0.480 | 9.73E-04 | 7.19E-02 | 1.94E-02 |
| 14 | E | CUEN | 0.511 | 6.37E-04 | 6.32E-02 | 1.94E-02 |
| 15 | R | AUS | 0.515 | 6.37E-04 | 6.29E-02 | 1.90E-02 |
| 16 | R | GRU | 0.517 | 6.36E-04 | 6.28E-02 | 1.88E-02 |
| 17 | J | DREN | 0.558 | 6.35E-04 | 6.26E-02 | 1.63E-02 |
| 18 | O | PEP | 0.617 | 6.35E-04 | 6.26E-02 | 1.33E-02 |
| 19 | Q | DF | 0.623 | 6.33E-04 | 6.25E-02 | 1.31E-02 |
| 20 | A | PEP | 0.702 | 6.33E-04 | 6.25E-02 | 9.65E-03 |
| 21 | C | INYCIM | 0.706 | 6.33E-04 | 6.17E-02 | 9.52E-03 |
| 22 | C | INYCU | 0.707 | 6.33E-04 | 6.15E-02 | 9.49E-03 |
| 23 | Q | PEP | 0.794 | 6.33E-04 | 6.15E-02 | 6.98E-03 |
| 24 | O | PFC | 0.825 | 6.33E-04 | 6.15E-02 | 6.15E-03 |
| 25 | Q | PFC | 0.869 | 6.33E-04 | 6.15E-02 | 5.16E-03 |
| 26 | A | PFC | 0.909 | 6.33E-04 | 6.15E-02 | 4.37E-03 |
| 27 | G | PEP | 0.961 | 6.33E-04 | 6.15E-02 | 3.51E-03 |
| 28 | T | ALIV | 1.130 | 5.39E-04 | 5.43E-02 | 3.40E-03 |
| 29 | C | COMP | 1.160 | 5.37E-04 | 5.21E-02 | 3.00E-03 |
| 30 | U | PEP | 1.219 | 5.37E-04 | 5.21E-02 | 2.63E-03 |
| 31 | U | PFC | 1.249 | 5.37E-04 | 5.21E-02 | 2.50E-03 |
| 32 | G | PFC | 1.276 | 5.37E-04 | 5.21E-02 | 2.39E-03 |
| 33 | Z | AUS | 1.289 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 2.36E-03 |
| 34 | R | PEP | 1.369 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 2.18E-03 |
| 35 | B | PEP | 1.467 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.96E-03 |
| 36 | B | PFC | 1.517 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.84E-03 |
| 37 | R | PFC | 1.557 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.78E-03 |
| 38 | P | PEP | 1.605 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.71E-03 |
| 39 | H | PFC | 1.635 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.67E-03 |
| 40 | J | PEP | 1.684 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.61E-03 |
| 41 | P | PFC | 1.708 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.59E-03 |
| 42 | Y | PEP | 1.759 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.55E-03 |
| 43 | Z | DREN | 1.765 | 4.87E-04 | 4.98E-02 | 1.54E-03 |
| 44 | T | PEP | 1.805 | 4.87E-04 | 4.98E-02 | 1.51E-03 |

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 45 | A | AUS | 1.809 | 4.87E-04 | 4.98E-02 | 1.51E-03 |
| 46 | A | LALIV | 1.950 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.44E-03 |
| 47 | C | PEP | 2.032 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.39E-03 |
| 48 | C | PFC | 2.073 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.37E-03 |
| 49 | T | PFC | 2.093 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.36E-03 |
| 50 | Y | PFC | 2.119 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.35E-03 |
| 51 | X | PEP | 2.155 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.34E-03 |
| 52 | X | PFC | 2.174 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.33E-03 |
| 53 | Z | PEP | 2.239 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.32E-03 |
| 54 | V | AUS | 2.294 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 55 | Z | PFC | 2.327 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 56 | I | DFI | 2.338 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 57 | K | COMP | 2.367 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.31E-03 |
| 58 | H | PIL | 3.394 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 59 | F | PEP | 3.411 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 60 | W | AUS | 3.417 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 61 | P | INY | 3.429 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 62 | X | DF | 3.515 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 63 | V | PEP | 3.580 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 64 | V | PFC | 3.613 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 65 | I | ALIV | 3.640 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 66 | Y | DC1 | 3.644 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 67 | K | PEP | 3.677 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 68 | N | PEP | 3.712 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 69 | N | PFC | 3.729 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 70 | K | PFC | 3.746 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 71 | F | DREN | 3.786 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 72 | Z | ALIV | 3.828 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 73 | G | INY | 3.834 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 74 | M | COMP | 3.855 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 75 | T | AUS | 3.860 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 76 | I | PEP | 3.908 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 77 | I | PFC | 3.932 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 78 | W | PEP | 3.985 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 79 | W | PFC | 4.011 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 80 | F | EH | 4.187 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 81 | M | PEP | 4.256 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 82 | M | PFC | 4.291 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 83 | M | INY | 4.297 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 84 | S | DF | 4.301 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 85 | S | PEP | 4.336 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 86 | S | PFC | 4.353 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 87 | L | PFC | 4.393 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 88 | U | DC | 4.439 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |

A4.12 Secuencia obtenida para un valor del parámetro n=10

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | - | - | 0.000 | 2.55E-02 | 1.76E+00 | 2.85E-01 |
| 1 | D | FUSERV | 0.015 | 6.40E-03 | 9.61E-01 | 2.66E-01 |
| 2 | O | COMP | 0.144 | 5.22E-03 | 3.32E-01 | 1.72E-01 |
| 3 | A | VACIO | 0.144 | 4.69E-03 | 3.24E-01 | 1.15E-01 |
| 4 | Q | RESG | 0.144 | 4.42E-03 | 3.03E-01 | 6.68E-02 |
| 5 | O | ALIV | 0.244 | 4.19E-03 | 1.87E-01 | 4.89E-02 |
| 6 | Z | PRET | 0.256 | 3.70E-03 | 1.66E-01 | 4.88E-02 |
| 7 | E | COMP | 0.293 | 1.66E-03 | 1.13E-01 | 4.88E-02 |
| 8 | O | RESG | 0.295 | 1.60E-03 | 8.05E-02 | 4.43E-02 |
| 9 | I | RESG | 0.295 | 1.59E-03 | 7.99E-02 | 4.29E-02 |
| 10 | B | EIDC | 0.445 | 1.03E-03 | 7.68E-02 | 4.28E-02 |
| 11 | E | CUEN | 0.476 | 6.97E-04 | 6.81E-02 | 4.28E-02 |
| 12 | Q | PRE | 0.484 | 6.56E-04 | 6.50E-02 | 3.54E-02 |
| 13 | J | EH | 0.506 | 6.48E-04 | 6.40E-02 | 2.10E-02 |
| 14 | I | PRE | 0.511 | 6.37E-04 | 6.32E-02 | 1.94E-02 |
| 15 | T | ALIV | 0.679 | 5.43E-04 | 5.60E-02 | 1.93E-02 |
| 16 | R | AUS | 0.683 | 5.43E-04 | 5.57E-02 | 1.89E-02 |
| 17 | R | GRU | 0.686 | 5.42E-04 | 5.55E-02 | 1.87E-02 |
| 18 | J | DREN | 0.726 | 5.41E-04 | 5.54E-02 | 1.62E-02 |
| 19 | O | PEP | 0.786 | 5.41E-04 | 5.54E-02 | 1.32E-02 |
| 20 | Q | DF | 0.791 | 5.40E-04 | 5.53E-02 | 1.30E-02 |
| 21 | A | PEP | 0.871 | 5.40E-04 | 5.53E-02 | 9.55E-03 |
| 22 | C | INYCIM | 0.875 | 5.39E-04 | 5.44E-02 | 9.42E-03 |
| 23 | C | INYCU | 0.876 | 5.39E-04 | 5.43E-02 | 9.39E-03 |
| 24 | Q | PEP | 0.963 | 5.39E-04 | 5.43E-02 | 6.87E-03 |
| 25 | O | PFC | 0.993 | 5.39E-04 | 5.43E-02 | 6.05E-03 |
| 26 | Q | PFC | 1.037 | 5.39E-04 | 5.43E-02 | 5.06E-03 |
| 27 | A | PFC | 1.077 | 5.39E-04 | 5.43E-02 | 4.27E-03 |
| 28 | G | PEP | 1.130 | 5.39E-04 | 5.43E-02 | 3.40E-03 |
| 29 | C | COMP | 1.160 | 5.37E-04 | 5.21E-02 | 3.00E-03 |
| 30 | U | PEP | 1.219 | 5.37E-04 | 5.21E-02 | 2.63E-03 |
| 31 | U | PFC | 1.249 | 5.37E-04 | 5.21E-02 | 2.50E-03 |
| 32 | G | PFC | 1.276 | 5.37E-04 | 5.21E-02 | 2.39E-03 |
| 33 | Z | AUS | 1.289 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 2.36E-03 |
| 34 | R | PEP | 1.369 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 2.18E-03 |
| 35 | B | PEP | 1.467 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.96E-03 |
| 36 | B | PFC | 1.517 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.84E-03 |
| 37 | R | PFC | 1.557 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.78E-03 |
| 38 | P | PEP | 1.605 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.71E-03 |
| 39 | H | PFC | 1.635 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.67E-03 |
| 40 | J | PEP | 1.684 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.61E-03 |
| 41 | P | PFC | 1.708 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.59E-03 |
| 42 | Y | PEP | 1.759 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.55E-03 |
| 43 | Z | DREN | 1.765 | 4.87E-04 | 4.98E-02 | 1.54E-03 |
| 44 | T | PEP | 1.805 | 4.87E-04 | 4.98E-02 | 1.51E-03 |

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 45 | A | AUS | 1.809 | 4.87E-04 | 4.98E-02 | 1.51E-03 |
| 46 | A | LALIV | 1.950 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.44E-03 |
| 47 | C | PEP | 2.032 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.39E-03 |
| 48 | C | PFC | 2.073 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.37E-03 |
| 49 | T | PFC | 2.093 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.36E-03 |
| 50 | Y | PFC | 2.119 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.35E-03 |
| 51 | X | PEP | 2.155 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.34E-03 |
| 52 | X | PFC | 2.174 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.33E-03 |
| 53 | Z | PEP | 2.239 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.32E-03 |
| 54 | V | AUS | 2.294 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 55 | Z | PFC | 2.327 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 56 | I | DFI | 2.338 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 57 | K | COMP | 2.367 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.31E-03 |
| 58 | H | PIL | 3.394 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 59 | F | PEP | 3.411 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 60 | W | AUS | 3.417 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 61 | P | INY | 3.429 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 62 | X | DF | 3.515 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 63 | V | PEP | 3.580 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 64 | V | PFC | 3.613 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 65 | I | ALIV | 3.640 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 66 | Y | DC1 | 3.644 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 67 | K | PEP | 3.677 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 68 | N | PEP | 3.712 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 69 | N | PFC | 3.729 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 70 | K | PFC | 3.746 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 71 | F | DREN | 3.786 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 72 | Z | ALIV | 3.828 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 73 | G | INY | 3.834 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 74 | M | COMP | 3.855 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 75 | T | AUS | 3.860 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 76 | I | PEP | 3.908 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 77 | I | PFC | 3.932 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 78 | W | PEP | 3.985 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 79 | W | PFC | 4.011 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 80 | F | EH | 4.187 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 81 | M | PEP | 4.256 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 82 | M | PFC | 4.291 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 83 | M | INY | 4.297 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 84 | S | DF | 4.301 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 85 | S | PEP | 4.336 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 86 | S | PFC | 4.353 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 87 | L | PFC | 4.393 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 88 | U | DC | 4.439 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |

A4.13 Secuencia obtenida para un valor del parámetro n=20

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | - | - | 0.000 | 2.55E-02 | 1.76E+00 | 2.85E-01 |
| 1 | D | FUSERV | 0.015 | 6.40E-03 | 9.61E-01 | 2.66E-01 |
| 2 | O | COMP | 0.144 | 5.22E-03 | 3.32E-01 | 1.72E-01 |
| 3 | A | VACIO | 0.144 | 4.69E-03 | 3.24E-01 | 1.15E-01 |
| 4 | Z | PRET | 0.155 | 4.19E-03 | 3.04E-01 | 1.15E-01 |
| 5 | E | COMP | 0.193 | 2.16E-03 | 2.51E-01 | 1.15E-01 |
| 6 | Q | RESG | 0.193 | 1.88E-03 | 2.30E-01 | 6.67E-02 |
| 7 | O | ALIV | 0.293 | 1.66E-03 | 1.13E-01 | 4.88E-02 |
| 8 | O | RESG | 0.295 | 1.60E-03 | 8.05E-02 | 4.43E-02 |
| 9 | I | RESG | 0.295 | 1.59E-03 | 7.99E-02 | 4.29E-02 |
| 10 | B | EIDC | 0.445 | 1.03E-03 | 7.68E-02 | 4.28E-02 |
| 11 | E | CUEN | 0.476 | 6.97E-04 | 6.81E-02 | 4.28E-02 |
| 12 | T | ALIV | 0.645 | 6.03E-04 | 6.09E-02 | 4.27E-02 |
| 13 | Q | PRE | 0.653 | 5.62E-04 | 5.78E-02 | 3.53E-02 |
| 14 | J | EH | 0.675 | 5.54E-04 | 5.68E-02 | 2.09E-02 |
| 15 | I | PRE | 0.679 | 5.43E-04 | 5.60E-02 | 1.93E-02 |
| 16 | R | AUS | 0.683 | 5.43E-04 | 5.57E-02 | 1.89E-02 |
| 17 | R | GRU | 0.686 | 5.42E-04 | 5.55E-02 | 1.87E-02 |
| 18 | J | DREN | 0.726 | 5.41E-04 | 5.54E-02 | 1.62E-02 |
| 19 | O | PEP | 0.786 | 5.41E-04 | 5.54E-02 | 1.32E-02 |
| 20 | Q | DF | 0.791 | 5.40E-04 | 5.53E-02 | 1.30E-02 |
| 21 | A | PEP | 0.871 | 5.40E-04 | 5.53E-02 | 9.55E-03 |
| 22 | C | INYCIM | 0.875 | 5.39E-04 | 5.44E-02 | 9.42E-03 |
| 23 | C | INYCU | 0.876 | 5.39E-04 | 5.43E-02 | 9.39E-03 |
| 24 | Q | PEP | 0.963 | 5.39E-04 | 5.43E-02 | 6.87E-03 |
| 25 | O | PFC | 0.993 | 5.39E-04 | 5.43E-02 | 6.05E-03 |
| 26 | Q | PFC | 1.037 | 5.39E-04 | 5.43E-02 | 5.06E-03 |
| 27 | A | PFC | 1.077 | 5.39E-04 | 5.43E-02 | 4.27E-03 |
| 28 | G | PEP | 1.130 | 5.39E-04 | 5.43E-02 | 3.40E-03 |
| 29 | C | COMP | 1.160 | 5.37E-04 | 5.21E-02 | 3.00E-03 |
| 30 | U | PEP | 1.219 | 5.37E-04 | 5.21E-02 | 2.63E-03 |
| 31 | U | PFC | 1.249 | 5.37E-04 | 5.21E-02 | 2.50E-03 |
| 32 | G | PFC | 1.276 | 5.37E-04 | 5.21E-02 | 2.39E-03 |
| 33 | Z | AUS | 1.289 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 2.36E-03 |
| 34 | R | PEP | 1.369 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 2.18E-03 |
| 35 | B | PEP | 1.467 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.96E-03 |
| 36 | B | PFC | 1.517 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.84E-03 |
| 37 | R | PFC | 1.557 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.78E-03 |
| 38 | P | PEP | 1.605 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.71E-03 |
| 39 | H | PFC | 1.635 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.67E-03 |
| 40 | J | PEP | 1.684 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.61E-03 |
| 41 | P | PFC | 1.708 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.59E-03 |
| 42 | Y | PEP | 1.759 | 5.37E-04 | 5.18E-02 | 1.55E-03 |
| 43 | Z | DREN | 1.765 | 4.87E-04 | 4.98E-02 | 1.54E-03 |
| 44 | T | PEP | 1.805 | 4.87E-04 | 4.98E-02 | 1.51E-03 |

| Paso | Modelo | Medida | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|--------|--------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 45 | A | AUS | 1.809 | 4.87E-04 | 4.98E-02 | 1.51E-03 |
| 46 | A | LALIV | 1.950 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.44E-03 |
| 47 | C | PEP | 2.032 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.39E-03 |
| 48 | C | PFC | 2.073 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.37E-03 |
| 49 | T | PFC | 2.093 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.36E-03 |
| 50 | Y | PFC | 2.119 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.35E-03 |
| 51 | X | PEP | 2.155 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.34E-03 |
| 52 | X | PFC | 2.174 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.33E-03 |
| 53 | Z | PEP | 2.239 | 4.62E-04 | 4.94E-02 | 1.32E-03 |
| 54 | V | AUS | 2.294 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 55 | Z | PFC | 2.327 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 56 | I | DFI | 2.338 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.32E-03 |
| 57 | K | COMP | 2.367 | 4.60E-04 | 4.91E-02 | 1.31E-03 |
| 58 | H | PIL | 3.394 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 59 | F | PEP | 3.411 | 4.60E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 60 | W | AUS | 3.417 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 61 | P | INY | 3.429 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 62 | X | DF | 3.515 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 63 | V | PEP | 3.580 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 64 | V | PFC | 3.613 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 65 | I | ALIV | 3.640 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 66 | Y | DC1 | 3.644 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 67 | K | PEP | 3.677 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 68 | N | PEP | 3.712 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 69 | N | PFC | 3.729 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 70 | K | PFC | 3.746 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 71 | F | DREN | 3.786 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 72 | Z | ALIV | 3.828 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 73 | G | INY | 3.834 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 74 | M | COMP | 3.855 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 75 | T | AUS | 3.860 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 76 | I | PEP | 3.908 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 77 | I | PFC | 3.932 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 78 | W | PEP | 3.985 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 79 | W | PFC | 4.011 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 80 | F | EH | 4.187 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 81 | M | PEP | 4.256 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 82 | M | PFC | 4.291 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 83 | M | INY | 4.297 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 84 | S | DF | 4.301 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 85 | S | PEP | 4.336 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 86 | S | PFC | 4.353 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 87 | L | PFC | 4.393 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |
| 88 | U | DC | 4.439 | 4.59E-04 | 4.90E-02 | 1.30E-03 |

ANEJO 5 SECUENCIAS DE IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS EN EL TIEMPO

A5.1 Secuencia obtenida para un horizonte de decisión de 3 años

| Paso | Tiempo (años) | Medidas | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|---------------|--|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | 0 | - | 0.000 | 2.548E-02 | 1.762E+00 | 2.847E-01 |
| 1 | 3 | A:VACIO_Q:PRE_O:PEP_D:FUSERV_J:DREN | 0.123 | 5.583E-03 | 9.294E-01 | 5.499E-02 |
| 2 | 6 | O:PFC_A:PEP_I:PRE_J:EH_Q:RESG_O:RESG | 0.260 | 4.533E-03 | 4.013E-01 | 1.218E-02 |
| 3 | 9 | Q:PEP_G:PEP_A:PFC_C:INYCIM | 0.444 | 4.532E-03 | 4.005E-01 | 7.700E-03 |
| 4 | 12 | Q:PFC_R:PEP_C:COMP_G:PFC | 0.625 | 4.530E-03 | 3.983E-01 | 5.607E-03 |
| 5 | 15 | U:PEP_B:PEP_R:PFC_R:AUS | 0.827 | 4.530E-03 | 3.980E-01 | 4.747E-03 |
| 6 | 18 | B:PFC_U:PFC_P:PEP_J:PEP_Z:PEP_R:GRU_Q:DF | 1.078 | 4.528E-03 | 3.977E-01 | 4.179E-03 |
| 7 | 21 | Y:PEP_T:PEP_P:PFC_C:INYCU_Z:PRET_X:PEP | 1.241 | 4.031E-03 | 3.771E-01 | 3.999E-03 |
| 8 | 24 | C:PEP_Y:PFC_I:RESG_T:PFC_Z:AUS_X:PFC | 1.400 | 4.031E-03 | 3.769E-01 | 3.900E-03 |
| 9 | 27 | C:PFC_E:COMP_V:AUS_H:PFC_Z:PFC_A:AUS | 1.601 | 1.993E-03 | 3.236E-01 | 3.802E-03 |
| 10 | 30 | K:COMP_Z:DREN_I:ALIV_P:INY | 1.674 | 1.943E-03 | 3.215E-01 | 3.800E-03 |
| 11 | 33 | F:DREN_V:PEP_K:PEP | 1.812 | 1.943E-03 | 3.215E-01 | 3.799E-03 |
| 12 | 36 | V:PFC_N:PEP_Z:ALIV_W:AUS_K:PFC_I:DFI | 1.956 | 1.943E-03 | 3.215E-01 | 3.799E-03 |
| 13 | 39 | N:PFC_Y:DC1_M:COMP_G:INY_I:PEP_T:AUS | 2.057 | 1.943E-03 | 3.215E-01 | 3.799E-03 |
| 14 | 42 | X:DF_I:PFC | 2.167 | 1.942E-03 | 3.215E-01 | 3.799E-03 |
| 15 | 45 | W:PEP_M:PEP_F:PEP | 2.306 | 1.942E-03 | 3.215E-01 | 3.799E-03 |
| 16 | 48 | W:PFC_M:PFC_M:INY_S:PEP | 2.408 | 1.942E-03 | 3.215E-01 | 3.799E-03 |
| 17 | 51 | S:DF | 2.412 | 1.942E-03 | 3.215E-01 | 3.799E-03 |
| 18 | 54 | O:COMP_L:PFC | 2.581 | 1.598E-03 | 1.349E-01 | 2.111E-03 |
| 19 | 57 | F:EH_S:PFC | 2.775 | 1.598E-03 | 1.349E-01 | 2.111E-03 |
| 20 | 60 | U:DC | 2.820 | 1.598E-03 | 1.349E-01 | 2.111E-03 |
| 21 | 64 | E:CUEN | 2.852 | 1.262E-03 | 1.263E-01 | 2.104E-03 |
| 22 | 68 | B:EIDC | 3.002 | 7.039E-04 | 1.232E-01 | 2.027E-03 |
| 23 | 73 | O:ALIV | 3.102 | 5.778E-04 | 5.667E-02 | 1.443E-03 |
| 24 | 78 | A:LALIV | 3.244 | 5.530E-04 | 5.628E-02 | 1.367E-03 |
| 25 | 84 | T:ALIV | 3.413 | 4.591E-04 | 4.905E-02 | 1.314E-03 |
| 26 | 126 | H:PIL | 4.439 | 4.590E-04 | 4.900E-02 | 1.301E-03 |

A5.2 Secuencia obtenida para un horizonte de decisión de 1 año

| Paso | Tiempo (años) | Medidas | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|---------------|--|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | 0 | - | 0.000 | 2.548E-02 | 1.762E+00 | 2.847E-01 |
| 1 | 2 | A:VACIO_Q:PRE_D:FUSERV_J:DREN | 0.064 | 5.583E-03 | 9.294E-01 | 1.440E-01 |
| 2 | 4 | I:PRE_J:EH | 0.090 | 5.562E-03 | 9.279E-01 | 1.392E-01 |
| 3 | 6 | Q:RESG | 0.090 | 5.531E-03 | 9.254E-01 | 1.335E-01 |
| 4 | 8 | C:COMP | 0.120 | 5.530E-03 | 9.232E-01 | 1.331E-01 |
| 5 | 10 | O:COMP | 0.249 | 4.346E-03 | 2.951E-01 | 3.910E-02 |
| 6 | 12 | O:RESG | 0.250 | 4.186E-03 | 2.126E-01 | 2.768E-02 |
| 7 | 15 | O:PEP_Q:PEP_A:PEP_G:PEP | 0.528 | 4.186E-03 | 2.126E-01 | 9.644E-03 |
| 8 | 18 | O:PFC_Q:PFC_A:PFC_R:PEP_U:PEP_C:INYCIM_G:PFC | 0.813 | 4.186E-03 | 2.118E-01 | 3.541E-03 |
| 9 | 21 | B:PEP_R:PFC_U:PFC_R:AUS_J:PEP_R:GRU | 1.038 | 4.185E-03 | 2.113E-01 | 2.820E-03 |
| 10 | 24 | B:PFC_P:PEP_Z:PEP_Q:DF_T:PEP | 1.246 | 4.184E-03 | 2.112E-01 | 2.426E-03 |
| 11 | 27 | C:PEP_Y:PEP_P:PFC_C:INYCU_I:RESG | 1.403 | 4.184E-03 | 2.110E-01 | 2.281E-03 |
| 12 | 30 | C:PFC_E:COMP_Z:PRET_X:PEP_Y:PFC_T:PFC_Z:AUS | 1.589 | 1.651E-03 | 1.373E-01 | 2.166E-03 |
| 13 | 33 | X:PFC_V:AUS_H:PFC_Z:PFC_A:AUS_Z:DREN | 1.735 | 1.598E-03 | 1.350E-01 | 2.113E-03 |
| 14 | 36 | K:COMP_I:ALIV_F:DREN | 1.831 | 1.598E-03 | 1.350E-01 | 2.111E-03 |
| 15 | 39 | V:PEP_P:INY_K:PEP_N:PEP_W:AUS | 1.981 | 1.598E-03 | 1.350E-01 | 2.111E-03 |
| 16 | 42 | V:PFC_N:PFC_Z:ALIV_K:PFC_I:DFI_Y:DC1 | 2.106 | 1.598E-03 | 1.350E-01 | 2.111E-03 |
| 17 | 45 | X:DF | 2.192 | 1.598E-03 | 1.349E-01 | 2.111E-03 |
| 18 | 48 | M:COMP_G:INY_I:PEP_T:AUS | 2.272 | 1.598E-03 | 1.349E-01 | 2.111E-03 |
| 19 | 51 | I:PFC_W:PEP_M:PEP_F:PEP_M:INY | 2.441 | 1.598E-03 | 1.349E-01 | 2.111E-03 |
| 20 | 54 | W:PFC_M:PFC_U:DC_S:DF | 2.552 | 1.598E-03 | 1.349E-01 | 2.111E-03 |
| 21 | 57 | S:PEP | 2.586 | 1.598E-03 | 1.349E-01 | 2.111E-03 |
| 22 | 60 | F:EH_L:PFC | 2.803 | 1.598E-03 | 1.349E-01 | 2.111E-03 |
| 23 | 63 | S:PFC | 2.820 | 1.598E-03 | 1.349E-01 | 2.111E-03 |
| 24 | 66 | T:ALIV | 2.989 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 2.057E-03 |
| 25 | 70 | E:CUEN | 3.020 | 1.168E-03 | 1.190E-01 | 2.051E-03 |
| 26 | 74 | B:EIDC | 3.171 | 6.101E-04 | 1.159E-01 | 1.974E-03 |
| 27 | 79 | O:ALIV | 3.271 | 4.839E-04 | 4.944E-02 | 1.390E-03 |
| 28 | 84 | A:LALIV | 3.413 | 4.591E-04 | 4.905E-02 | 1.314E-03 |
| 29 | 126 | H:PIL | 4.439 | 4.590E-04 | 4.900E-02 | 1.301E-03 |

A5.3 Secuencia obtenida para un horizonte de decisión de 2 años

| Paso | Tiempo (años) | Medidas | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|---------------|---|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | 0 | - | 0.000 | 2.548E-02 | 1.762E+00 | 2.847E-01 |
| 1 | 2 | A:VACIO_Q:PRE_D:FUSERV_J:DREN_I:PRE | 0.068 | 5.563E-03 | 9.280E-01 | 1.411E-01 |
| 2 | 4 | J:EH_Q:RESG | 0.090 | 5.531E-03 | 9.254E-01 | 1.335E-01 |
| 3 | 6 | C:COMP | 0.120 | 5.530E-03 | 9.232E-01 | 1.331E-01 |
| 4 | 9 | O:PEP_Q:PEP_A:PEP | 0.346 | 5.530E-03 | 9.232E-01 | 3.792E-02 |
| 5 | 12 | O:PFC_Q:PFC_G:PEP_A:PFC_R:PEP_O:RESG_C:INYCIM | 0.598 | 4.530E-03 | 3.983E-01 | 5.713E-03 |
| 6 | 15 | U:PEP_B:PEP_R:PFC_G:PFC_R:AUS | 0.827 | 4.530E-03 | 3.980E-01 | 4.747E-03 |
| 7 | 18 | B:PFC_U:PFC_P:PEP_J:PEP_Z:PEP_R:GRU_Q:DF | 1.078 | 4.528E-03 | 3.977E-01 | 4.179E-03 |
| 8 | 21 | Y:PEP_T:PEP_P:PFC_C:INYCU_Z:PRET_X:PEP | 1.241 | 4.031E-03 | 3.771E-01 | 3.999E-03 |
| 9 | 24 | C:PEP_Y:PFC_I:RESG_T:PFC_Z:AUS_X:PFC | 1.400 | 4.031E-03 | 3.769E-01 | 3.900E-03 |
| 10 | 27 | C:PFC_E:COMP_V:AUS_H:PFC_Z:PFC_A:AUS | 1.601 | 1.993E-03 | 3.236E-01 | 3.802E-03 |
| 11 | 30 | K:COMP_Z:DREN_I:ALIV_P:INY | 1.674 | 1.943E-03 | 3.215E-01 | 3.800E-03 |
| 12 | 33 | F:DREN_V:PEP_K:PEP | 1.812 | 1.943E-03 | 3.215E-01 | 3.799E-03 |
| 13 | 36 | V:PFC_N:PEP_Z:ALIV_W:AUS_K:PFC_I:DFI | 1.956 | 1.943E-03 | 3.215E-01 | 3.799E-03 |
| 14 | 39 | N:PFC_Y:DC1_M:COMP_G:INY_I:PEP_T:AUS | 2.057 | 1.943E-03 | 3.215E-01 | 3.799E-03 |
| 15 | 42 | X:DF_I:PFC | 2.167 | 1.942E-03 | 3.215E-01 | 3.799E-03 |
| 16 | 45 | W:PEP_M:PEP_F:PEP | 2.306 | 1.942E-03 | 3.215E-01 | 3.799E-03 |
| 17 | 48 | W:PFC_M:PFC_M:INY_S:PEP | 2.408 | 1.942E-03 | 3.215E-01 | 3.799E-03 |
| 18 | 51 | S:DF | 2.412 | 1.942E-03 | 3.215E-01 | 3.799E-03 |
| 19 | 54 | O:COMP_L:PFC | 2.581 | 1.598E-03 | 1.349E-01 | 2.111E-03 |
| 20 | 57 | F:EH_S:PFC | 2.775 | 1.598E-03 | 1.349E-01 | 2.111E-03 |
| 21 | 60 | U:DC | 2.820 | 1.598E-03 | 1.349E-01 | 2.111E-03 |
| 22 | 64 | E:CUEN | 2.852 | 1.262E-03 | 1.263E-01 | 2.104E-03 |
| 23 | 68 | B:EIDC | 3.002 | 7.039E-04 | 1.232E-01 | 2.027E-03 |
| 24 | 73 | O:ALIV | 3.102 | 5.778E-04 | 5.667E-02 | 1.443E-03 |
| 25 | 78 | A:LALIV | 3.244 | 5.530E-04 | 5.628E-02 | 1.367E-03 |
| 26 | 84 | T:ALIV | 3.413 | 4.591E-04 | 4.905E-02 | 1.314E-03 |
| 27 | 126 | H:PIL | 4.439 | 4.590E-04 | 4.900E-02 | 1.301E-03 |

A5.4 Secuencia obtenida para un horizonte de decisión de 4 años

| Paso | Tiempo (años) | Medidas | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|---------------|--|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | 0 | - | 0.000 | 2.548E-02 | 1.762E+00 | 2.847E-01 |
| 1 | 4 | A:VACIO_Q:PRE_O:PEP_D:FUSERV_J:DREN_I:PRE_J:E_H_Q:RESG | 0.150 | 5.531E-03 | 9.254E-01 | 4.442E-02 |
| 2 | 8 | Q:PEP_O:PFC_A:PEP_O:RESG_C:INYCIM | 0.352 | 4.532E-03 | 4.005E-01 | 9.357E-03 |
| 3 | 12 | Q:PFC_G:PEP_A:PFC_C:COMP_U:PEP_R:AUS_J:PEP | 0.631 | 4.530E-03 | 3.980E-01 | 5.442E-03 |
| 4 | 16 | R:PEP_B:PEP_U:PFC_G:PFC_R:GRU_Q:DF | 0.874 | 4.528E-03 | 3.977E-01 | 4.536E-03 |
| 5 | 20 | R:PFC_B:PFC_P:PEP_Z:PEP_Y:PEP_T:PEP_C:INYCU | 1.169 | 4.528E-03 | 3.976E-01 | 4.047E-03 |
| 6 | 24 | C:PEP_E:COMP_P:PFC_Z:PRET_Y:PFC_I:RESG_T:PFC_Z:AUS | 1.383 | 1.995E-03 | 3.239E-01 | 3.890E-03 |
| 7 | 28 | C:PFC_X:PEP_E:CUEN_H:PFC_Z:PFC_K:COMP_A:AUS_Z:DREN | 1.593 | 1.610E-03 | 3.131E-01 | 3.802E-03 |
| 8 | 32 | X:PFC_V:AUS_I:ALIV_F:DREN_W:AUS | 1.740 | 1.607E-03 | 3.129E-01 | 3.793E-03 |
| 9 | 36 | X:DF_P:INY_Y:DC1 | 1.842 | 1.606E-03 | 3.128E-01 | 3.793E-03 |
| 10 | 40 | V:PEP_K:PEP_N:PEP_I:DFI_G:INY_T:AUS | 1.996 | 1.606E-03 | 3.128E-01 | 3.793E-03 |
| 11 | 44 | V:PFC_N:PFC_Z:ALIV_K:PFC_M:COMP_I:PEP_F:PEP | 2.192 | 1.606E-03 | 3.128E-01 | 3.792E-03 |
| 12 | 48 | I:PFC_W:PEP_M:PEP_M:INY_S:DF | 2.348 | 1.606E-03 | 3.128E-01 | 3.792E-03 |
| 13 | 52 | O:COMP_W:PFC_M:PFC | 2.537 | 1.262E-03 | 1.263E-01 | 2.104E-03 |
| 14 | 56 | S:PEP | 2.572 | 1.262E-03 | 1.263E-01 | 2.104E-03 |
| 15 | 60 | B:EIDC_S:PFC | 2.740 | 7.039E-04 | 1.232E-01 | 2.027E-03 |
| 16 | 64 | L:PFC | 2.780 | 7.039E-04 | 1.232E-01 | 2.027E-03 |
| 17 | 68 | T:ALIV_U:DC | 2.994 | 6.101E-04 | 1.159E-01 | 1.974E-03 |
| 18 | 73 | O:ALIV | 3.094 | 4.839E-04 | 4.944E-02 | 1.390E-03 |
| 19 | 78 | A:LALIV | 3.236 | 4.591E-04 | 4.905E-02 | 1.314E-03 |
| 20 | 84 | F:EH | 3.413 | 4.591E-04 | 4.905E-02 | 1.314E-03 |
| 21 | 126 | H:PIL | 4.439 | 4.590E-04 | 4.900E-02 | 1.301E-03 |

A5.5 Secuencia obtenida para un horizonte de decisión de 5 años

| Paso | Tiempo (años) | Medidas | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|---------------|---|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | 0 | - | 0.000 | 2.548E-02 | 1.762E+00 | 2.847E-01 |
| 1 | 5 | A:VACIO_Q:PRE_O:PEP_D:FUSERV_J:DREN_A:PEP_I:PRE_Q:RESG_O:RESG | 0.208 | 4.534E-03 | 4.015E-01 | 2.375E-02 |
| 2 | 10 | Q:PEP_O:PFC_J:EH_G:PEP_A:PFC_C:COMP_R:AUS | 0.474 | 4.531E-03 | 3.988E-01 | 7.076E-03 |
| 3 | 15 | Q:PFC_O:ALIV_C:INYCIM_G:PFC_J:PEP_R:GRU_Q:DF | 0.707 | 4.324E-03 | 2.892E-01 | 4.506E-03 |
| 4 | 20 | R:PEP_U:PEP_B:PEP_C:INYCU | 0.945 | 4.324E-03 | 2.890E-01 | 3.682E-03 |
| 5 | 25 | O:COMP_R:PFC_B:PFC_U:PFC_I:RESG | 1.194 | 4.057E-03 | 1.445E-01 | 1.993E-03 |
| 6 | 30 | P:PEP_Y:PEP_T:PEP_Z:PRET_Z:AUS_E:CUEN_H:PFC | 1.418 | 2.032E-03 | 8.403E-02 | 1.699E-03 |
| 7 | 35 | Z:PEP_C:PEP_E:COMP_P:PFC_Y:PFC_T:PFC_A:AUS_Z:DREN | 1.682 | 1.139E-03 | 6.012E-02 | 1.568E-03 |
| 8 | 40 | C:PFC_X:PEP_V:AUS_Z:PFC_K:COMP_P:INY_I:DFI | 1.900 | 1.136E-03 | 5.982E-02 | 1.526E-03 |
| 9 | 45 | X:PFC_X:DF_F:DREN_K:PEP | 2.077 | 1.136E-03 | 5.979E-02 | 1.520E-03 |
| 10 | 50 | I:ALIV_V:PEP_N:PEP_Z:ALIV_W:AUS_K:PFC | 2.269 | 1.136E-03 | 5.979E-02 | 1.520E-03 |
| 11 | 55 | V:PFC_N:PFC_Y:DC1_M:COMP_G:INY_I:PEP_T:AUS_W:PEP_F:PEP_M:INY | 2.480 | 1.136E-03 | 5.978E-02 | 1.520E-03 |
| 12 | 60 | I:PFC_W:PFC_M:PEP_U:DC_S:DF | 2.648 | 1.136E-03 | 5.978E-02 | 1.520E-03 |
| 13 | 65 | B:EIDC_M:PFC_L:PFC | 2.874 | 5.778E-04 | 5.667E-02 | 1.443E-03 |
| 14 | 70 | A:LALIV | 3.016 | 5.530E-04 | 5.628E-02 | 1.367E-03 |
| 15 | 75 | S:PEP | 3.050 | 5.530E-04 | 5.628E-02 | 1.367E-03 |
| 16 | 80 | T:ALIV_S:PFC | 3.236 | 4.591E-04 | 4.905E-02 | 1.314E-03 |
| 17 | 85 | F:EH | 3.413 | 4.591E-04 | 4.905E-02 | 1.314E-03 |
| 18 | 126 | H:PIL | 4.439 | 4.590E-04 | 4.900E-02 | 1.301E-03 |

A5.6 Secuencia obtenida con un presupuesto máximo anual de 0.1 M€

| Paso | Tiempo (años) | Medidas | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|---------------|--------------------------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | 0 | - | 0.000 | 2.548E-02 | 1.762E+00 | 2.847E-01 |
| 1 | 3 | A:VACIO_Q:PRE_I:PRE | 0.013 | 2.465E-02 | 1.730E+00 | 1.746E-01 |
| 2 | 6 | D:FUSERV | 0.028 | 5.572E-03 | 9.290E-01 | 1.562E-01 |
| 3 | 9 | Q:RESG | 0.028 | 5.541E-03 | 9.266E-01 | 1.504E-01 |
| 4 | 12 | O:PEP | 0.088 | 5.541E-03 | 9.266E-01 | 6.137E-02 |
| 5 | 15 | O:PFC | 0.118 | 5.541E-03 | 9.266E-01 | 3.646E-02 |
| 6 | 18 | J:DREN | 0.158 | 5.532E-03 | 9.256E-01 | 2.138E-02 |
| 7 | 21 | J:EH_O:RESG | 0.181 | 4.533E-03 | 4.013E-01 | 1.560E-02 |
| 8 | 26 | G:PEP | 0.233 | 4.533E-03 | 4.013E-01 | 1.473E-02 |
| 9 | 31 | C:INYCIM_G:PFC | 0.264 | 4.532E-03 | 4.005E-01 | 1.449E-02 |
| 10 | 36 | A:PEP_R:AUS | 0.347 | 4.531E-03 | 4.002E-01 | 1.072E-02 |
| 11 | 41 | A:PFC_P:PEP | 0.435 | 4.531E-03 | 4.002E-01 | 9.859E-03 |
| 12 | 46 | J:PEP | 0.484 | 4.531E-03 | 4.002E-01 | 9.796E-03 |
| 13 | 51 | Q:PEP | 0.571 | 4.531E-03 | 4.002E-01 | 7.108E-03 |
| 14 | 56 | Q:PFC_R:GRU | 0.618 | 4.531E-03 | 4.001E-01 | 5.826E-03 |
| 15 | 61 | C:COMP_Q:DF | 0.654 | 4.528E-03 | 3.977E-01 | 5.397E-03 |
| 16 | 66 | U:PEP | 0.714 | 4.528E-03 | 3.977E-01 | 5.018E-03 |
| 17 | 71 | U:PFC_T:PEP_P:PFC | 0.808 | 4.528E-03 | 3.977E-01 | 4.799E-03 |
| 18 | 76 | Z:PEP_C:INYCU | 0.874 | 4.528E-03 | 3.976E-01 | 4.712E-03 |
| 19 | 81 | Y:PEP_I:RESG | 0.925 | 4.528E-03 | 3.976E-01 | 4.663E-03 |
| 20 | 86 | Z:PRET_Y:PFC_T:PFC_Z:AUS | 0.995 | 4.031E-03 | 3.769E-01 | 4.609E-03 |
| 21 | 91 | E:CUEN_H:PFC | 1.056 | 2.503E-03 | 3.371E-01 | 4.550E-03 |
| 22 | 96 | X:PEP_Z:PFC | 1.126 | 2.503E-03 | 3.371E-01 | 4.538E-03 |
| 23 | 101 | X:PFC_A:AUS_Z:DREN | 1.154 | 2.453E-03 | 3.350E-01 | 4.529E-03 |
| 24 | 106 | R:PEP | 1.233 | 2.453E-03 | 3.350E-01 | 4.352E-03 |
| 25 | 111 | R:PFC_V:PEP | 1.339 | 2.453E-03 | 3.350E-01 | 4.292E-03 |
| 26 | 116 | F:DREN_V:PFC | 1.412 | 2.453E-03 | 3.350E-01 | 4.290E-03 |
| 27 | 121 | K:PEP | 1.445 | 2.453E-03 | 3.350E-01 | 4.290E-03 |

| Paso | Tiempo (años) | Medidas | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|---------------|--------------------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 28 | 126 | I:ALIV | 1.472 | 2.453E-03 | 3.350E-01 | 4.289E-03 |
| 29 | 131 | K:COMP | 1.501 | 2.453E-03 | 3.350E-01 | 4.289E-03 |
| 31 | 141 | N:PEP_K:PFC_I:DFI | 1.581 | 2.453E-03 | 3.350E-01 | 4.289E-03 |
| 32 | 146 | N:PFC_Y:DC1_M:COMP | 1.624 | 2.453E-03 | 3.350E-01 | 4.289E-03 |
| 33 | 151 | G:INY_T:AUS | 1.635 | 2.453E-03 | 3.350E-01 | 4.289E-03 |
| 34 | 156 | C:PEP | 1.716 | 2.453E-03 | 3.350E-01 | 4.246E-03 |
| 35 | 161 | C:PFC_I:PEP | 1.805 | 2.453E-03 | 3.350E-01 | 4.221E-03 |
| 36 | 166 | I:PFC_F:PEP | 1.847 | 2.453E-03 | 3.350E-01 | 4.221E-03 |
| 37 | 171 | W:PEP_M:INY | 1.906 | 2.453E-03 | 3.350E-01 | 4.221E-03 |
| 38 | 176 | W:PFC_L:PFC | 1.972 | 2.453E-03 | 3.350E-01 | 4.221E-03 |
| 39 | 181 | B:PEP | 2.071 | 2.453E-03 | 3.350E-01 | 3.980E-03 |
| 40 | 186 | B:PFC_S:PEP | 2.155 | 2.453E-03 | 3.350E-01 | 3.806E-03 |
| 41 | 191 | M:PEP_S:PFC | 2.241 | 2.453E-03 | 3.350E-01 | 3.806E-03 |
| 42 | 196 | M:PFC_S:DF | 2.280 | 2.453E-03 | 3.350E-01 | 3.806E-03 |
| 43 | 201 | E:COMP | 2.318 | 1.609E-03 | 3.131E-01 | 3.794E-03 |
| 44 | 209 | Z:ALIV | 2.360 | 1.609E-03 | 3.131E-01 | 3.794E-03 |
| 45 | 218 | U:DC | 2.405 | 1.609E-03 | 3.131E-01 | 3.794E-03 |
| 46 | 229 | V:AUS | 2.461 | 1.607E-03 | 3.129E-01 | 3.793E-03 |
| 47 | 247 | X:DF | 2.546 | 1.606E-03 | 3.128E-01 | 3.792E-03 |
| 48 | 267 | O:ALIV | 2.647 | 1.402E-03 | 2.043E-01 | 2.837E-03 |
| 49 | 294 | O:COMP | 2.775 | 1.136E-03 | 5.978E-02 | 1.520E-03 |
| 50 | 322 | F:EH | 2.952 | 1.136E-03 | 5.978E-02 | 1.520E-03 |
| 51 | 351 | A:LALIV | 3.094 | 1.111E-03 | 5.940E-02 | 1.444E-03 |
| 52 | 381 | B:EIDC | 3.244 | 5.530E-04 | 5.628E-02 | 1.367E-03 |
| 53 | 416 | T:ALIV | 3.413 | 4.591E-04 | 4.905E-02 | 1.314E-03 |
| 54 | 626 | H:PIL | 4.439 | 4.590E-04 | 4.900E-02 | 1.301E-03 |

A5.7 Secuencia obtenida con un presupuesto máximo anual de 0.75 M€

| Paso | Tiempo (años) | Medidas | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|---------------|--|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | 0 | - | 0.000 | 2.548E-02 | 1.762E+00 | 2.847E-01 |
| 1 | 3 | A:VACIO_Q:PRE_O:PEP_D:FUSERV_J:DREN_I:PRE_J:E H | 0.150 | 5.562E-03 | 9.279E-01 | 5.016E-02 |
| 2 | 6 | Q:PEP_O:PFC_A:PEP_G:PEP_Q:RESG_O:RESG | 0.400 | 4.533E-03 | 4.013E-01 | 8.624E-03 |
| 3 | 9 | Q:PFC_A:PFC_R:PEP_C:COMP_U:PEP_C:INYCIM_G:PF C | 0.684 | 4.530E-03 | 3.983E-01 | 5.229E-03 |
| 4 | 12 | O:COMP_R:PFC_U:PFC | 0.883 | 4.186E-03 | 2.118E-01 | 3.235E-03 |
| 5 | 15 | B:PEP_P:PEP_R:AUS_J:PEP_R:GRU_Q:DF | 1.091 | 4.184E-03 | 2.112E-01 | 2.724E-03 |
| 6 | 18 | B:PFC_Z:PEP_C:PEP_Y:PEP_T:PEP_P:PFC_C:INYCU | 1.403 | 4.184E-03 | 2.110E-01 | 2.291E-03 |
| 7 | 21 | C:PFC_E:COMP_Z:PRET_X:PEP_Y:PFC_I:RESG_T:PFC_Z :AUS | 1.589 | 1.651E-03 | 1.373E-01 | 2.166E-03 |
| 8 | 24 | X:PFC_V:AUS_H:PFC_Z:PFC_K:COMP_A:AUS_Z:DREN_ I:ALIV | 1.791 | 1.598E-03 | 1.350E-01 | 2.112E-03 |
| 9 | 27 | X:DF_F:DREN_V:PEP | 1.982 | 1.598E-03 | 1.349E-01 | 2.111E-03 |
| 10 | 30 | V:PFC_P:INY_K:PEP_N:PEP_Z:ALIV_W:AUS_I:DFI | 2.154 | 1.598E-03 | 1.349E-01 | 2.111E-03 |
| 11 | 33 | N:PFC_K:PFC_Y:DC1_M:COMP_G:INY_I:PEP_T:AUS | 2.272 | 1.598E-03 | 1.349E-01 | 2.111E-03 |
| 12 | 36 | T:ALIV_I:PFC | 2.464 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 2.057E-03 |
| 13 | 39 | W:PEP_M:PEP_F:PEP_M:INY_L:PFC | 2.650 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 2.057E-03 |
| 14 | 42 | W:PFC_M:PFC_U:DC_S:DF | 2.760 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 2.057E-03 |
| 15 | 45 | F:EH_S:PEP | 2.971 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 2.057E-03 |
| 16 | 48 | S:PFC | 2.989 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 2.057E-03 |
| 17 | 52 | B:EIDC_E:CUEN | 3.171 | 6.101E-04 | 1.159E-01 | 1.974E-03 |
| 18 | 57 | O:ALIV_A:LALIV | 3.413 | 4.591E-04 | 4.905E-02 | 1.314E-03 |
| 19 | 84 | H:PIL | 4.439 | 4.590E-04 | 4.900E-02 | 1.301E-03 |

A5.8 Secuencia obtenida con un presupuesto máximo anual de 1 M€

| Paso | Tiempo (años) | Medidas | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|---------------|--|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | 0 | - | 0.000 | 2.548E-02 | 1.762E+00 | 2.847E-01 |
| 1 | 3 | A:VACIO_Q:PRE_O:PEP_D:FUSERV_J:DREN_Q:PEP_I:PRE_J:EH | 0.237 | 5.562E-03 | 9.279E-01 | 4.383E-02 |
| 2 | 6 | O:PFC_A:PEP_Q:PFC_G:PEP_Q:RESG_R:PEP_C:COMP_O:RESG | 0.554 | 4.531E-03 | 3.991E-01 | 6.637E-03 |
| 3 | 9 | O:COMP_A:PFC_U:PEP_R:PFC_C:INYCIM_G:PFC | 0.853 | 4.186E-03 | 2.118E-01 | 3.364E-03 |
| 4 | 12 | B:PEP_U:PFC_P:PEP_R:AUS_J:PEP_Z:PEP_R:GRU_Y:PEP | 1.201 | 4.185E-03 | 2.113E-01 | 2.657E-03 |
| 5 | 15 | B:PFC_C:PEP_Q:DF_T:PEP_E:COMP_P:PFC_C:INYCU_Z:PRET_X:PEP | 1.489 | 1.651E-03 | 1.376E-01 | 2.242E-03 |
| 6 | 18 | C:PFC_Y:PFC_I:RESG_T:PFC_Z:AUS_X:PFC_V:AUS_H:PFC_Z:PFC | 1.725 | 1.648E-03 | 1.370E-01 | 2.116E-03 |
| 7 | 21 | T:ALIV_K:COMP_A:AUS_Z:DREN_I:ALIV_P:INY | 1.971 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 2.058E-03 |
| 8 | 24 | X:DF_F:DREN_V:PEP_W:AUS | 2.168 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 2.058E-03 |
| 9 | 27 | V:PFC_K:PEP_N:PEP_Z:ALIV_I:DFI_Y:DC1_M:COMP | 2.347 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 2.057E-03 |
| 10 | 30 | N:PFC_K:PFC_F:EH_G:INY_I:PEP_T:AUS | 2.617 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 2.057E-03 |
| 11 | 33 | I:PFC_W:PEP_M:PEP_F:PEP_M:INY_U:DC_L:PFC | 2.872 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 2.057E-03 |
| 12 | 36 | W:PFC_M:PFC_S:PEP | 2.967 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 2.057E-03 |
| 13 | 39 | S:DF | 2.971 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 2.057E-03 |
| 14 | 42 | S:PFC | 2.989 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 2.057E-03 |
| 15 | 46 | B:EIDC_E:CUEN | 3.171 | 6.101E-04 | 1.159E-01 | 1.974E-03 |
| 16 | 51 | O:ALIV_A:LALIV | 3.413 | 4.591E-04 | 4.905E-02 | 1.314E-03 |
| 17 | 63 | H:PIL | 4.439 | 4.590E-04 | 4.900E-02 | 1.301E-03 |

A5.9 Secuencia obtenida con un presupuesto máximo anual de 1.5 M€

| Paso | Tiempo (años) | Medidas | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|---------------|--|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | 0 | - | 0.000 | 2.548E-02 | 1.762E+00 | 2.847E-01 |
| 1 | 3 | O:COMP_A:VACIO_Q:PRE_O:PEP_D:FUSERV_J:DREN_I:PRE | 0.256 | 4.379E-03 | 2.999E-01 | 2.759E-02 |
| 2 | 6 | Q:PEP_O:PFC_A:PEP_J:EH_G:PEP_Q:RESG_R:PEP_C:COMP_U:PEP_O:RESG | 0.698 | 4.186E-03 | 2.126E-01 | 5.630E-03 |
| 3 | 9 | Q:PFC_A:PFC_B:PEP_R:PFC_C:INYCIM_U:PFC_G:PFC_P:PEP_R:AUS_J:PEP | 1.083 | 4.185E-03 | 2.115E-01 | 2.801E-03 |
| 4 | 12 | B:PFC_T:ALIV_Z:PEP_C:PEP_R:GRU_Y:PEP_Q:DF_T:PEP_E:COMP_P:PFC | 1.608 | 2.054E-03 | 1.510E-01 | 2.216E-03 |
| 5 | 15 | C:PFC_C:INYCU_Z:PRET_X:PEP_Y:PFC_I:RESG_T:PFC_Z:AUS_V:AUS | 1.812 | 1.554E-03 | 1.298E-01 | 2.109E-03 |
| 6 | 18 | X:PFC_H:PFC_Z:PFC_K:COMP_A:AUS_Z:DREN_I:ALIV_X:DF_F:DREN_V:PEP | 2.151 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 2.058E-03 |
| 7 | 21 | V:PFC_P:INY_K:PEP_N:PEP_Z:ALIV_W:AUS_I:DFI_Y:DC1 | 2.326 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 2.057E-03 |
| 8 | 24 | N:PFC_K:PFC_M:COMP_F:EH_G:INY_I:PEP_T:AUS_W:PEP | 2.669 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 2.057E-03 |
| 9 | 27 | I:PFC_W:PFC_M:PEP_F:PEP_M:INY_U:DC_L:PFC | 2.898 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 2.057E-03 |
| 10 | 30 | M:PFC_S:PEP | 2.967 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 2.057E-03 |
| 11 | 33 | S:DF | 2.971 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 2.057E-03 |
| 12 | 36 | H:PIL_S:PFC | 4.015 | 1.504E-03 | 1.276E-01 | 2.044E-03 |
| 13 | 40 | B:EIDC_E:CUEN | 4.197 | 6.099E-04 | 1.159E-01 | 1.961E-03 |
| 14 | 45 | O:ALIV_A:LALIV | 4.439 | 4.590E-04 | 4.900E-02 | 1.301E-03 |

A5.10 Secuencia obtenida minimizando la probabilidad de fallo

| Paso | Tiempo (años) | Medidas | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|---------------|---|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | 0 | - | 0.000 | 2.548E-02 | 1.762E+00 | 2.847E-01 |
| 1 | 3 | D:FUSERV_E:COMP_A:VACIO_Z:PRET_O:RESG_Z:DREN_Q:RESG | 0.071 | 2.020E-03 | 3.315E-01 | 8.722E-02 |
| 2 | 6 | Q:PRE_I:PRE_J:DREN_Q:DF_C:COMP_C:INYCIM | 0.165 | 1.948E-03 | 3.228E-01 | 6.100E-02 |
| 3 | 9 | V:AUS_R:AUS_Z:AUS_W:AUS_R:GRU_C:INYCU | 0.246 | 1.944E-03 | 3.217E-01 | 6.035E-02 |
| 4 | 12 | J:EH_I:RESG_K:COMP_A:AUS_P:INY | 0.312 | 1.943E-03 | 3.215E-01 | 5.845E-02 |
| 5 | 15 | F:DREN_I:ALIV_Y:DC1_T:AUS_G:INY_I:DFI | 0.406 | 1.943E-03 | 3.215E-01 | 5.845E-02 |
| 6 | 18 | Z:ALIV_M:COMP_M:INY | 0.476 | 1.943E-03 | 3.215E-01 | 5.845E-02 |
| 7 | 21 | B:PEP | 0.575 | 1.943E-03 | 3.215E-01 | 5.821E-02 |
| 8 | 24 | X:DF_B:PFC | 0.710 | 1.942E-03 | 3.215E-01 | 5.803E-02 |
| 9 | 27 | F:PEP | 0.728 | 1.942E-03 | 3.215E-01 | 5.803E-02 |
| 10 | 30 | O:COMP_H:PFC | 0.887 | 1.598E-03 | 1.349E-01 | 2.608E-02 |
| 11 | 33 | I:PEP | 0.934 | 1.598E-03 | 1.349E-01 | 2.608E-02 |
| 12 | 36 | F:EH_I:PFC | 1.135 | 1.598E-03 | 1.349E-01 | 2.608E-02 |
| 13 | 39 | Q:PEP | 1.222 | 1.598E-03 | 1.349E-01 | 2.356E-02 |
| 14 | 42 | K:PEP | 1.255 | 1.598E-03 | 1.349E-01 | 2.356E-02 |
| 15 | 45 | K:PFC | 1.272 | 1.598E-03 | 1.349E-01 | 2.356E-02 |
| 16 | 48 | T:ALIV_G:PEP_N:PEP | 1.527 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 2.259E-02 |
| 17 | 51 | M:PEP | 1.596 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 2.259E-02 |
| 18 | 54 | O:PEP | 1.655 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 1.152E-02 |
| 19 | 57 | O:PFC | 1.686 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 8.415E-03 |
| 20 | 60 | P:PEP | 1.733 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 8.351E-03 |
| 21 | 63 | P:PFC | 1.757 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 8.326E-03 |
| 22 | 66 | R:PEP | 1.837 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 8.148E-03 |
| 23 | 69 | R:PFC | 1.878 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 8.090E-03 |
| 24 | 72 | T:PEP | 1.918 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 8.059E-03 |
| 25 | 75 | T:PFC | 1.938 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 8.050E-03 |
| 26 | 78 | U:PEP | 1.997 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 7.671E-03 |
| 27 | 81 | U:PFC | 2.027 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 7.542E-03 |

| Paso | Tiempo (años) | Medidas | Coste anual (M€) | Suma prob. de fallo (1/años) | Suma riesgo econ. (M€/año) | Suma riesgo social (vidas/año) |
|------|---------------|----------------|------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 28 | 84 | U:DC | 2.073 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 7.542E-03 |
| 29 | 87 | V:PEP | 2.138 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 7.542E-03 |
| 31 | 93 | Y:PEP | 2.222 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 7.503E-03 |
| 32 | 96 | Y:PFC | 2.247 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 7.493E-03 |
| 33 | 99 | W:PEP | 2.300 | 1.504E-03 | 1.277E-01 | 7.493E-03 |
| 34 | 102 | H:PIL_W:PFC | 3.352 | 1.504E-03 | 1.276E-01 | 7.480E-03 |
| 35 | 105 | X:PEP | 3.389 | 1.504E-03 | 1.276E-01 | 7.470E-03 |
| 36 | 108 | Z:PEP | 3.454 | 1.504E-03 | 1.276E-01 | 7.458E-03 |
| 37 | 111 | Z:PFC | 3.487 | 1.504E-03 | 1.276E-01 | 7.457E-03 |
| 38 | 114 | L:PFC | 3.527 | 1.504E-03 | 1.276E-01 | 7.457E-03 |
| 39 | 117 | S:PEP | 3.562 | 1.504E-03 | 1.276E-01 | 7.457E-03 |
| 40 | 120 | S:PFC | 3.579 | 1.504E-03 | 1.276E-01 | 7.457E-03 |
| 41 | 123 | S:DF | 3.583 | 1.504E-03 | 1.276E-01 | 7.457E-03 |
| 42 | 126 | X:PFC | 3.601 | 1.504E-03 | 1.276E-01 | 7.452E-03 |
| 43 | 129 | M:PFC | 3.636 | 1.504E-03 | 1.276E-01 | 7.452E-03 |
| 44 | 132 | N:PFC | 3.654 | 1.504E-03 | 1.276E-01 | 7.452E-03 |
| 45 | 135 | J:PEP | 3.703 | 1.504E-03 | 1.276E-01 | 7.389E-03 |
| 46 | 138 | Q:PFC | 3.747 | 1.504E-03 | 1.276E-01 | 6.397E-03 |
| 47 | 141 | C:PEP | 3.828 | 1.504E-03 | 1.276E-01 | 6.354E-03 |
| 48 | 144 | C:PFC | 3.869 | 1.504E-03 | 1.276E-01 | 6.329E-03 |
| 49 | 147 | G:PFC | 3.896 | 1.504E-03 | 1.276E-01 | 6.223E-03 |
| 50 | 150 | A:PEP | 3.975 | 1.504E-03 | 1.276E-01 | 2.829E-03 |
| 51 | 153 | A:PFC | 4.015 | 1.504E-03 | 1.276E-01 | 2.044E-03 |
| 52 | 157 | B:EIDC_E:CUEN | 4.197 | 6.099E-04 | 1.159E-01 | 1.961E-03 |
| 53 | 162 | O:ALIV_A:LALIV | 4.439 | 4.590E-04 | 4.900E-02 | 1.301E-03 |

