



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ETS INGENIEROS DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS

# TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Gestión de seguridad de presas informada en riesgo a escala portfolio: Definición de un plan de actuaciones conjunto para dos presas situadas en las provincias de Cáceres y Badajoz. Presa 1: Análisis del riesgo para una presa de materiales sueltos.

*Presentado por*

Mascarell Gómez, Alba

*Para la obtención del*

Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

*Curso: 2017/2018*

*Fecha: Septiembre 2018*

*Tutor: Ignacio Escuder Bueno*

*Cotutor: Jessica Castillo Rodríguez*



## RESUMEN

En este documento se ha profundizado en la aplicación de técnicas de Análisis de Riesgo para la definición de un plan de actuaciones conjunto relacionado con la seguridad de dos presas ubicadas en las provincias de Cáceres y Badajoz, respectivamente. La definición del plan conjunto ha sido el resultado de la priorización de actuaciones de ambas presas, para las cuales se han planteado tanto medidas estructurales como no estructurales. Cada una de las medidas ha sido analizada a través de un indicador que se basa en principios de equidad y eficiencia para la reducción del riesgo, dando como resultado una secuencia de actuaciones que permitirá gestionar de forma eficiente rápida y eficaz la seguridad de ambas presas.

El plan de actuaciones se ha realizado teniendo en cuenta las proyecciones para el año 2050. Estas proyecciones parten de dos premisas asociadas a la gestión de la seguridad de las dos presas objeto de estudio de este documento.

La primera premisa es el incremento socio económico de la población aguas abajo de las presas. Tras la implantación de un nuevo PGOU se potencia el crecimiento de la población estacional, fomentando el sector turístico en el municipio principal situada aguas abajo y se refuerzan las infraestructuras y servicios dando como resultado un incremento estacional de la población.

La segunda premisa es el efecto del Cambio Climático, según lo publicado en el Informe del IPCC, publicado en 2014, las precipitaciones aumentarán en el futuro, dando lugar a escenarios de gran torrencialidad. Por tanto, en este trabajo se han tenido en cuenta los potenciales incrementos de los caudales pico de las avenidas. El resultado de la aplicación de estas dos premisas, como escenario futuro para el año 2050, es el aumento del riesgo económico y social aguas abajo de las presas. Por tanto, el objetivo del plan de actuaciones que se define en este documento es reducir el riesgo actual y futuro, mediante una gestión de seguridad conjunta informada en riesgo.



## RESUM

En este document s'ha aprofundit en tècniques d'Anàlisi de Risc per a la definició d'un pla d'actuacions conjunt relacionat amb la seguretat de preses. El pla d'actuacions es realitza per a dues preses: Presa 1 i Presa 2, ubicades en les províncies de Càceres i Badajoz, respectivament. La definició del pla conjunt ha sigut el resultat de la prioritització d'actuacions de cada una de les preses, per a les quals s'hi han plantejat tant mesures estructurals com no estructurals. Cada una de les mesures ha estat analitzada a través d'un indicador que es basa en principis d'equitat i eficiència per a la reducció del risc, i dona com a resultat una seqüència d'actuacions que permetrà gestionar de forma eficient, ràpida i eficaç la seguretat d'ambdues preses.

El pla d'actuacions s'ha realitzat tenint en compte les projeccions per a l'any 2050. Aquestes projeccions parteixen de dues premisses associades a la gestió de la seguretat de les dues preses objecte d'estudi d'aquest document.

La primera premissa és l'increment soci econòmic de la població aigües avall de la presa. Aquest increment es causat per un augment estaciona lde la població, degut al desenvolupament del turisme i el reforç de la comunicació en les infraestructures.

La segona premissa és l'efecte del Canvi Climàtic, segons la publicació de l'Informe del ICCP, publicat en 2014 les precipitacions serán majors en el futur, donant lloc a escenaris de gran torrencialitat. Per tant, en aquest document s'han tingut en compte els potencials increments del cabals màxims de les avingudes. El resultat de l'aplicació d'aquestes dues premisses d'escenari futur és l'increment del risc econòmic i social aigües avall de la presa. Per tant l'objectiu del pla d'actuacions que es defineix en aquest document es reduir el risc present i futur amb una gestió de seguretat conjunta informada en risc.



## **ABSTRACT**

This document describes the work conducted on the application of risk analysis techniques the definition of a Joint Action Plan for dam safety management for two large dams located in the provinces of Cáceres and Badajoz. The definition of the Joint Action Plan has been the result of the prioritization of actions for each dam and at portfolio scale. Structural and non-structural measures were proposed for both dams. Each proposed measure has been analyzed through an indicator based on equity and efficiency principles for risk reduction, resulting in a sequence of actions that will allow the efficient and effective dam safety management.

The Joint Action Plan has been carried out taking into account the projections for the year 2050. These projections are based on two premises.

The first includes a potential population increase of downstream locations due to an increase on seasonal population, by boosting tourism and strengthening infrastructures and services.

The second includes the effect of Climate Change, as published in the Fifth Report of the IPCC, published in 2014; precipitation rates will increase in the future, leading to events of high torrentiality. The result of the application of these two premises is a future scenario for the year 2050 resulting in a higher economic and societal risk. Therefore, the objective of the Joint Action Plan defined in this document is to reduce current and future risk, through a joint dam safety management.



## INDICE

<b>CAPITULO 01. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>21</b>
<b>1.1 MOTIVACIÓN .....</b>	<b>23</b>
<b>1.2 OBJETO DEL TRABAJO .....</b>	<b>24</b>
<b>CAPITULO 02. ANÁLISIS DE RIESGO .....</b>	<b>25</b>
<b>2.1 ANÁLISIS DE RIESGO APLICADO A LA GESTIÓN DE SEGURIDAD DE PRESAS .....</b>	<b>27</b>
<b>2.2 METODOLOGÍA EMPLEADA .....</b>	<b>31</b>
<b>CAPITULO 03. CASOS DE ESTUDIO .....</b>	<b>77</b>
<b>3.1 CASO DE ESTUDIO 1: PRESA DE MATERIALES SUELTOS .....</b>	<b>79</b>
<b>3.2 CASO DE ESTUDIO 2: PRESA DE HORMIGÓN .....</b>	<b>122</b>
<b>CAPITULO 04. ANÁLISIS CONJUNTO .....</b>	<b>167</b>
<b>CAPITULO 05. CONCLUSIONES .....</b>	<b>173</b>
<b>CAPITULO 06. REFERENCIAS .....</b>	<b>177</b>



## ACRÓNIMOS

<b>AEP</b>	Probabilidad Anual de Excedencia
<b>ALIV0'5</b>	Rebaje Aliviadero 0,5m
<b>ALIV1</b>	Rebaje Aliviadero 1m
<b>ANCOLD</b>	Australian National Committee on Large Dams
<b>DañosF</b>	Consecuencias económicas
<b>EC2050</b>	Escenario 2050
<b>EURO-CORDEX</b>	Coordinated Downscaling Experiment - European Domain
<b>Pérdida de vidasF</b>	Pérdida potencial de vidas
<b>HEC HMS</b>	Hydrologic Modeling System
<b>INE</b>	Instituto Nacional de Estadística
<b>MaxWL</b>	Nivel máximo alcanzado
<b>MOD</b>	Mejora operatividad órganos de desagüe
<b>N.A.P</b>	Nivel Avenida de Proyecto
<b>NMN</b>	Nivel Máximo Normal
<b>NTS</b>	Normas Técnicas de Seguridad
<b>O.D.</b>	Órgano de Desagüe
<b>OpA</b>	Operatividad Aliviadero
<b>OpDF</b>	Operatividad Desagüe de Fondo
<b>OpOD</b>	Operatividad Órgano Desagüe
<b>PEP</b>	Plan de Emergencia de Presas
<b>PFC</b>	Pla de Formación Continua
<b>PRE</b>	Pretil
<b>PrevWL</b>	Nivel Previo
<b>QFallo</b>	Caudal pico de rotura
<b>QMax</b>	Caudales máximos
<b>QNo_Fallo</b>	Caudal laminado máximo
<b>SPANCOLD</b>	Comité Nacional Español de Grandes Presas
<b>USACE</b>	United States Army Corps of Engineers
<b>USBR</b>	Unites States Bureau of Reclamation



## INDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1: ADAPTACIÓN DEL ESQUEMA DE GESTIÓN INTEGRAL DE LA SEGURIDAD DE PRESAS Y EMBALSES Y VÍNCULOS ENTRE EL MODELO DE RIESGO Y DE LOS DOCUMENTOS DEL ARCHIVO TÉCNICO. FUENTE: ADAPTADO DE SPANCOLD (2012).[1] .....	30
ILUSTRACIÓN 2 ADAPTACIÓN DEL ESQUEMA DEL PROCESO DE ANÁLISIS DE RIESGO, RESALTANDO LOS PROCESOS ESPECÍFICOS DE LA ARQUITECTURA Y CÁLCULO DEL MODELO DE RIESGO. FUENTE: SPANCOLD[1] .....	32
ILUSTRACIÓN 3 DIAGRAMA DE INFLUENCIA EMPLEADO. FUENTE: ADAPTADO DE IPRESAS HIDSIMP[11] .....	36
ILUSTRACIÓN 4 INDICACIÓN DEL NODO ESTACIÓN EN EL DIAGRAMA DE INFLUENCIA EMPLEADO. FUENTE: MANUAL DE: IPRESAS HIDSIMP[11] .....	37
ILUSTRACIÓN 5 INDICACIÓN DEL NODO MOMENTO EN EL DIAGRAMA DE INFLUENCIA EMPLEADO .FUENTE: MANUAL DE: IPRESAS HIDSIMP[11] .....	37
ILUSTRACIÓN 6 INDICACIÓN DEL NODO AVENIDAS EN EL DIAGRAMA DE INFLUENCIA EMPLEADO. FUENTE: MANUAL DE: IPRESAS HIDSIMP[11] .....	38
ILUSTRACIÓN 7 INDICACIÓN DEL NODO NIVEL PREVIO EN EL DIAGRAMA DE INFLUENCIA EMPLEADO .FUENTE: MANUAL DE: IPRESAS HIDSIMP[11] .....	38
ILUSTRACIÓN 8 INDICACIÓN DEL NODO NIVEL PREVIO EN EL DIAGRAMA DE INFLUENCIA EMPLEADO. FUENTE: MANUAL DE: IPRESAS HIDSIMP[11] .....	40
ILUSTRACIÓN 9 INDICACIÓN DEL NODO LAMINACIÓN EN EL DIAGRAMA DE INFLUENCIA EMPLEADO .FUENTE: MANUAL DE: IPRESAS HIDSIMP[11] .....	42
ILUSTRACIÓN 10 CURVAS QUE RELACIONAN LA PROBABILIDAD DE ROTURA CON LA ALTURA DE SOBREVERTIDO PARA CADA TIPO DE PRESA. FUENTE: SPANCOLD, 2012[1]. .....	43
ILUSTRACIÓN 11 INDICACIÓN DEL NODO ROTURA EN EL DIAGRAMA DE INFLUENCIA ESTABLECIDO PARA EL CÁLCULO SIMPLIFICADO DEL RIESGO DE INUNDACIÓN POR ESCORRENTÍA, AVENIDA O DESBORDAMIENTO DE CAUCES (PRESA) .FUENTE: MANUAL DE: IPRESAS HIDSIMP[11] .....	44
ILUSTRACIÓN 12 INDICACIÓN DEL NODO QFALLO EN EL DIAGRAMA DE INFLUENCIA ESTABLECIDO PARA EL CÁLCULO SIMPLIFICADO DEL RIESGO DE INUNDACIÓN POR ESCORRENTÍA, AVENIDA O DESBORDAMIENTO DE CAUCES (PRESA) .FUENTE: MANUAL DE: IPRESAS HIDSIMP[11] .....	44
ILUSTRACIÓN 13 ADAPTACIÓN DEL ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA PARA ESTIMACIÓN NÚMERO DE HERIDOS Y MUERTOS .FUENTE: MAGRAMA (2013) [14].....	46
ILUSTRACIÓN 14 INDICACIÓN DEL NODO VIDAS FALLO EN EL DIAGRAMA DE INFLUENCIA EMPLEADO .FUENTE: MANUAL DE: IPRESAS HIDSIMP[11] .....	54
ILUSTRACIÓN 15 INDICACIÓN DEL NODO VIDAS NO FALLO EN EL DIAGRAMA DE INFLUENCIA ESTABLECIDO PARA EL CÁLCULO SIMPLIFICADO DEL RIESGO DE INUNDACIÓN POR ESCORRENTÍA, AVENIDA O DESBORDAMIENTO DE CAUCES (PRESA) .FUENTE: MANUAL DE: IPRESAS HIDSIMP[11] .....	55
ILUSTRACIÓN 16 COEFICIENTES ASIGNADOS EN FUNCIÓN DEL TRAMO DE ALTURA ESTABLECIDO.....	56
ILUSTRACIÓN 17 INDICACIÓN DEL NODO DAÑOS FALLO EN EL DIAGRAMA DE INFLUENCIA ESTABLECIDO PARA EL CÁLCULO SIMPLIFICADO DEL RIESGO DE INUNDACIÓN POR ESCORRENTÍA, AVENIDA O DESBORDAMIENTO DE CAUCES (PRESA) .FUENTE: MANUAL DE: IPRESAS HIDSIMP[11] .....	58
ILUSTRACIÓN 18 INDICACIÓN DEL NODO DAÑOS FALLO EN EL DIAGRAMA DE INFLUENCIA ESTABLECIDO PARA EL CÁLCULO SIMPLIFICADO DEL RIESGO DE INUNDACIÓN POR ESCORRENTÍA, AVENIDA O DESBORDAMIENTO DE CAUCES (PRESA) .FUENTE: MANUAL DE: IPRESAS HIDSIMP[11] .....	58
ILUSTRACIÓN 19 ESQUEMA DEL PROCESO DE CÁLCULO DE RIESGO. FUENTE: MANUAL DE: IPRESAS HIDSIMP[11] .....	59

<i>ILUSTRACIÓN 20 RECOMENDACIONES DE TOLERABILIDAD DE RIESGO PROPUESTAS POR EL USBR EN EL AÑO 2011. FUENTE: MORALES, ADRIÁN, 2012[5].....</i>	<i>63</i>
<i>ILUSTRACIÓN 21 RECOMENDACIONES DE TOLERABILIDAD DE RIESGO PROPUESTAS POR EL ANCOLD. FUENTE: MORALES, ADRIÁN, 2012[5] .....</i>	<i>64</i>
<i>ILUSTRACIÓN 22 RECOMENDACIONES DE TOLERABILIDAD DE RIESGO PROPUESTAS POR EL ANCOLD. FUENTE: MORALES, ADRIÁN, 2012[5] .....</i>	<i>65</i>
<i>ILUSTRACIÓN 23 RECOMENDACIONES DE TOLERABILIDAD DE RIESGO INDIVIDUAL PROPUESTA POR EL USACE FUENTE: MORALES, ADRIÁN, 2012[5].....</i>	<i>65</i>
<i>ILUSTRACIÓN 24 PROCESO DE TOMA DE DECISIONES A PARTIR DE LOS RESULTADOS DE RIESGO. FUENTE: MORALES, ADRIÁN (2012) [5] .....</i>	<i>70</i>
<i>ILUSTRACIÓN 25 EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE PRIORIZACIÓN DE MEDIDAS EN DOS PRESAS. FUENTE: MORALES, ADRIÁN (2012) [5].....</i>	<i>74</i>
<i>ILUSTRACIÓN 26 DIAGRAMA DE INFLUENCIA ESTABLECIDO PARA EL CÁLCULO SIMPLIFICADO DEL RIESGO DE INUNDACIÓN POR ESCORRENTÍA, AVENIDA O DESBORDAMIENTO DE CAUCES PARA LA PRESA 1. FUENTE: MANUAL DE: IPRESAS HIDSIMP[11] .....</i>	<i>81</i>
<i>ILUSTRACIÓN 27 AVENIDAS ENTRANTES AL EMBALSE DE LA PRESA 1. ....</i>	<i>84</i>
<i>ILUSTRACIÓN 28 REGISTRO HISTÓRICO DE NIVELES EN EL EMBALSE 1.....</i>	<i>85</i>
<i>ILUSTRACIÓN 29 CURVA DE PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE LOS NIVELES PREVIOS DEL EMBALSE 1.....</i>	<i>86</i>
<i>ILUSTRACIÓN 30 : CURVA CARACTERÍSTICA DEL EMBALSE 1.....</i>	<i>88</i>
<i>ILUSTRACIÓN 31 LEY DE DESAGÜE DEL ALIVIADERO DE LA PRESA 1 .....</i>	<i>89</i>
<i>ILUSTRACIÓN 32 : LEY DE DESAGÜE DEL DESAGÜE DE FONDO DELA PRESA 1 .....</i>	<i>91</i>
<i>ILUSTRACIÓN 33 REPRESENTACIÓN DE LOS CAUDALES MÁXIMOS ASOCIADOS A CADA PERIODO DE RETORNO DE LA PRESA1 PARA EL CASO BASE. ....</i>	<i>92</i>
<i>ILUSTRACIÓN 34 REPRESENTACIÓN DE LOS NIVELES MÁXIMOS ALCANZADOS ASOCIADOS CADA PERIODO DE RETORNO DE LA PRESA1 PARA EL CASO BASE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....</i>	<i>92</i>
<i>ILUSTRACIÓN 35: HIDROGRAMAS DE AVENIDAS ENTRANTES AL EMBALSE 1 PARA EL ESCENARIO 2050. ....</i>	<i>99</i>
<i>ILUSTRACIÓN 36 REPRESENTACIÓN DE LOS CAUDALES MÁXIMOS PARA CADA PERIODO DE RETORNO ASOCIADO DE LA PRESA 1 PARA ESCENARIO 2050.FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....</i>	<i>100</i>
<i>ILUSTRACIÓN 37 REPRESENTACIÓN DE LOS NIVELES MÁXIMOS ALCANZADOS ASOCIADOS CADA PERIODO DE RETORNO DE LA PRESA1 PARA EL ESCENARIO 2050.FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....</i>	<i>101</i>
<i>ILUSTRACIÓN 38 GRÁFICO FN PARA EL CASO BASE Y ESCENARIO FUTURO BASÁNDOSE EN LAS RECOMENDACIONES DE TOLERABILIDAD DE RIESGO PROPUESTAS POR EL USBR EN EL AÑO 2011.....</i>	<i>106</i>
<i>ILUSTRACIÓN 39: CURVAS FN PARA EL CASO BASE Y ESCENARIO FUTURO ASOCIADAS A LAS RECOMENDACIONES DE TOLERABILIDAD DE RIESGO SOCIAL PROPUESTA POR EL USACE .....</i>	<i>107</i>
<i>ILUSTRACIÓN 40 RESUMEN DE LOS NODOS DEL MODELO DE RIESGO AFECTADOS POR LAS MEDIDA 01.1 DE REDUCCIÓN DE RIESGO PLANTEADA EN LA PRESA1 .....</i>	<i>108</i>
<i>ILUSTRACIÓN 41 RESUMEN DE LOS NODOS DEL MODELO DE RIESGO AFECTADOS POR LAS MEDIDA 01.2 DE REDUCCIÓN DE RIESGO PLANTEADA EN LA PRESA 1.....</i>	<i>109</i>
<i>ILUSTRACIÓN 42 RESUMEN DE LOS NODOS DEL MODELO DE RIESGO AFECTADOS POR LAS MEDIDA 01.3 DE REDUCCIÓN DE RIESGO PLANTEADA EN LA PRESA 1.....</i>	<i>110</i>
<i>ILUSTRACIÓN 43 RESUMEN DE LOS NODOS DEL MODELO DE RIESGO AFECTADOS POR LAS MEDIDA 01.4 DE REDUCCIÓN DE RIESGO PLANTEADA EN LA PRESA 1.....</i>	<i>111</i>
<b>INDICE DE ILUSTRACIONES</b>	<b>14</b>

ILUSTRACIÓN 44 RESUMEN DE LOS NODOS DEL MODELO DE RIESGO AFECTADOS POR LAS MEDIDA 01.5 Y 01.6 DE REDUCCIÓN DE RIESGO PLANTEADA EN LA PRESA 1 .....	111
ILUSTRACIÓN 45 GRÁFICO FN PARA EL CASO BASE Y MEDIDAS DE REDUCCIÓN DE RIESGO BASÁNDOSE EN LAS RECOMENDACIONES DE TOLERABILIDAD DE RIESGO PROPUESTAS POR EL USBR EN EL AÑO 2011 .....	113
ILUSTRACIÓN 46: CURVAS FN PARA EL CASO BASE Y MEDIDAS DE REDUCCIÓN DE RIESGO ASOCIADAS A LAS RECOMENDACIONES DE TOLERABILIDAD DE RIESGO SOCIAL PROPUESTA POR EL USACE .....	114
ILUSTRACIÓN 47 GRÁFICO FN PARA EL ESCENARIO FUTURO Y MEDIDAS DE REDUCCIÓN DE RIESGO BASÁNDOSE EN LAS RECOMENDACIONES DE TOLERABILIDAD DE RIESGO PROPUESTAS POR EL USBR EN EL AÑO 2011 .....	118
ILUSTRACIÓN 48 DIAGRAMA DE INFLUENCIA EMPLEADO PARA LA PRESA 2. FUENTE: MANUAL DE: IPRESAS HIDSIMP[11] .....	124
ILUSTRACIÓN 49 HIDROGRAMAS DE AVENIDAS ENTRANTES AL EMBALSE 2 .....	126
ILUSTRACIÓN 50 REGISTRO HISTÓRICO DE NIVELES EN EL EMBALSE 2 .....	127
ILUSTRACIÓN 51 CURVA DE PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE LOS NIVELES PREVIOS DEL EMBALSE 2 .....	128
ILUSTRACIÓN 52: CURVA CARACTERÍSTICA DEL EMBALSE 2 .....	130
ILUSTRACIÓN 53: LEY DE DESAGÜE DEL ALIVIADERO DE LA PRESA 2 .....	131
ILUSTRACIÓN 54: LEY DE DESAGÜE DEL DESAGÜE DE FONDO DELA PRESA 2 .....	132
ILUSTRACIÓN 55 REPRESENTACIÓN DE LOS CAUDALES MÁXIMOS ASOCIADOS A LOS PERIODOS DE RETORNO DE LA PRESA 2 PARA EL CASO BASE. ....	133
ILUSTRACIÓN 56 REPRESENTACIÓN DE LOS NIVELES MÁXIMOS ASOCIADOS A LOS DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO DE LA PRESA 2 PARA EL CASO BASE. ....	134
ILUSTRACIÓN 57: HIDROGRAMAS DE AVENIDAS ENTRANTES AL EMBALSE 2 PARA EL ESCENARIO 2050 .....	142
ILUSTRACIÓN 58 REPRESENTACIÓN DE LOS CAUDALES MÁXIMOS ASOCIADOS A LOS PERIODOS DE RETORNO EN LA PRESA 2 PARA EL ESCENARIO 2050 .....	143
ILUSTRACIÓN 59 REPRESENTACIÓN DE LOS NIVELES MÁXIMOS ASOCIADOS A CADA PERIODO DE RETORNO DE LA PRESA 2 PARA EL ESCENARIO 2050 .....	144
ILUSTRACIÓN 60 GRÁFICO FN PARA EL CASO BASE Y ESCENARIO FUTURO BASÁNDOSE EN LAS RECOMENDACIONES DE TOLERABILIDAD DE RIESGO PROPUESTAS POR EL USBR EN EL AÑO 2011 .....	149
ILUSTRACIÓN 61: CURVAS FN PARA EL CASO BASE Y ESCENARIO FUTURO ASOCIADAS A LAS RECOMENDACIONES DE TOLERABILIDAD DE RIESGO SOCIAL PROPUESTA POR EL USACE .....	150
ILUSTRACIÓN 62: RESUMEN DE LOS NODOS DEL MODELO DE RIESGO AFECTADOS POR LAS MEDIDA 02.1 DE REDUCCIÓN DE RIESGO PLANTEADA EN LA PRESA 2 .....	152
ILUSTRACIÓN 63: RESUMEN DE LOS NODOS DEL MODELO DE RIESGO AFECTADOS POR LAS MEDIDA 02.2 DE REDUCCIÓN DE RIESGO PLANTEADA EN LA PRESA 2 .....	153
ILUSTRACIÓN 64: RESUMEN DE LOS NODOS DEL MODELO DE RIESGO AFECTADOS POR LAS MEDIDA 02.3 DE REDUCCIÓN DE RIESGO PLANTEADA EN LA PRESA 2 .....	154
ILUSTRACIÓN 65: RESUMEN DE LOS NODOS DEL MODELO DE RIESGO AFECTADOS POR LAS MEDIDA 02.4 DE REDUCCIÓN DE RIESGO PLANTEADA EN LA PRESA 2 .....	154
ILUSTRACIÓN 66: RESUMEN DE LOS NODOS DEL MODELO DE RIESGO AFECTADOS POR LAS MEDIDA 02.5 Y 02.6 DE REDUCCIÓN DE RIESGO PLANTEADA EN LA PRESA 2 .....	155
ILUSTRACIÓN 67 GRÁFICO FN PARA EL CASO BASE Y MEDIDAS DE REDUCCIÓN DE RIESGO BASÁNDOSE EN LAS RECOMENDACIONES DE TOLERABILIDAD DE RIESGO PROPUESTAS POR EL USBR EN EL AÑO 2011 .....	157

<i>ILUSTRACIÓN 68: CURVAS FN PARA EL CASO BASE Y MEDIDAS DE REDUCCIÓN DE RIESGO ASOCIADAS A LAS RECOMENDACIONES DE TOLERABILIDAD DE RIESGO SOCIAL PROPUESTA POR EL USACE.....</i>	<i>158</i>
<i>ILUSTRACIÓN 69 SECUENCIA DE PRIORIZACIÓN CONJUNTA MOSTRANDO LA REDUCCIÓN DE PROBABILIDAD DE FALLO AGREGADA .....</i>	<i>170</i>
<i>ILUSTRACIÓN 70 SECUENCIA DE PRIORIZACIÓN CONJUNTA MOSTRANDO LA REDUCCIÓN DE RIESGO ECONÓMICO AGREGADA .....</i>	<i>170</i>
<i>ILUSTRACIÓN 71 SECUENCIA DE PRIORIZACIÓN CONJUNTA MOSTRANDO LA REDUCCIÓN DE RIESGO SOCIAL AGREGADA .....</i>	<i>171</i>

## INDICE DE TABLAS

TABLA 1 EJEMPLO DE PARTE DE LA HOJA DE CÁLCULO INTRODUCIDA EN EL NODO LAMINACIÓN DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DEL CASO PRESA 1. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	41
TABLA 2 ASIGNACIÓN DEL COEFICIENTE DEL FLUJO DE ESCOMBROS EN FUNCIÓN DEL CALADO Y LOS USOS DEL SUELO. FUENTE: MAGRAMA (2013).....	47
TABLA 3 VALOR DE HR CON LA DESCRIPCIÓN CORRESPONDIENTE Y EL TIPO DE PELIGROSIDAD. FUENTE: MAGRAMA (2013)(13) ...	47
TABLA 4 CÁLCULO DEL VALOR DEL ÁREA VULNERABLE SEGÚN LA DEFRA. FUENTE: MAGRAMA (2013)(15).....	48
TABLA 5 ADAPTACIÓN DEL CÁLCULO DEL VALOR DEL ÁREA VULNERABLE DE LA DEFRA A LAS CONDICIONES ESPAÑOLAS. FUENTE: MAGRAMA (2013) (15).....	48
TABLA 6: FACTOR DE MODO DE FALLO (HORAS). FUENTE: ESCUDER BUENO, I ET AL, (2013). (8).....	51
TABLA 7 - FACTOR DE PLAN DE EMERGENCIA (HORAS). FUENTE: ESCUDER BUENO, I ET AL, (2013). (8).....	51
TABLA 8 ADAPTACIÓN TABLA DE TASA MORTALIDAD PARA LAS CATEGORÍAS 3,4 Y10. . FUENTE: MAGRAMA (2013) (15).....	52
TABLA 9: TABLA INTRODUCIDA EN EL NODO VIDAS F EN EL MODELO DE RIESGO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	53
TABLA 10 TABLA INTRODUCIDA EN EL NODO VIDAS NF EN EL MODELO DE RIESGO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	54
TABLA 11 COEFICIENTES ASIGNADOS EN FUNCIÓN DEL TRAMO DE ALTURA ESTABLECIDO. FUENTE: MAGRAMA (2013)(15).....	55
TABLA 12 TABLA INTRODUCIDA EN EL NODO DAÑOS F EN EL MODELO DE RIESGO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	57
TABLA 13 TABLA INTRODUCIDA EN EL NODO VIDAS NF EN EL MODELO DE RIESGO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	58
TABLA 14 TABLA DE RESULTADOS DE PROBABILIDAD Y RIESGO OBTENIDOS MEDIANTE EL MODELO DE RIESGO CON PRESA 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	60
TABLA 15 RESUMEN DE ALGUNAS DE LAS MEDIDAS DE REDUCCIÓN DE RIESGO PARA PRESAS MÁS EMPLEADAS. FUENTE: MAGRAMA (2016)(16).....	66
TABLA 16 VALORES OBTENIDOS PARA EL CÁLCULO DEL INDICADOR ACSLS DE LA PRESA 2.....	73
TABLA 17: RESUMEN CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA PRESA 1.....	81
TABLA 18 DATOS DE ENTRADA DEL NODO ESTACIÓN DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 1. ....	82
TABLA 19 DATOS DE ENTRADA DEL NODO MOMENTO DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 1. ....	82
TABLA 20 AVENIDAS ENTRANTES AL EMBALSE DE LA PRESA 1. ....	83
TABLA 21 DATOS DE ENTRADA DEL NODO AVENIDAS DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 1.....	84
TABLA 22: PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE ESTAR EN UN INTERVALO DETERMINADO DE NIVELES PREVIOS.....	87
TABLA 23: ESTRUCTURA DE LA HOJA DE CÁLCULO PARA EL NODO NIVEL PREVIO.....	87
TABLA 24: DATOS DE ENTRADA EN EL NODO Op. O.P.....	87
TABLA 25: ESTRUCTURA DEL FICHERO DE MICROSOFT EXCEL UTILIZADO PARA INTRODUCIR LOS DATOS DE LA LAMINACIÓN AL MODELO. ....	91
TABLA 26 DATOS DE ENTRADA DEL NODO ROTURA DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 1.....	93
TABLA 27 DATOS DE ENTRADA DEL NODO QFALLO DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 1.....	93
TABLA 28 CÁLCULO DE PÉRDIDA DE VIDAS. METODOLOGÍA SUFRI DE LA PRESA 1.....	94
TABLA 29 COSTES DE INUNDACIÓN DE LA PRESA 1 PARA EL ESCENARIO H1.....	94
TABLA 30 COSTES DE INUNDACIÓN DE LA PRESA 1 PARA EL ESCENARIO H2.....	95

TABLA 31 COSTE DE RECONSTRUCCIÓN PRESA 1 .....	95
TABLA 32 COSTE POR LUCRO CESANTE PRESA 1 .....	95
TABLA 33 COSTE EN CASO DE ROTURA DESGLOSADO DE LA PRESA 1.....	96
TABLA 34 TABLA RESUMEN DE CONSECUENCIAS ECONÓMICAS DE LA PRESA 1 .....	96
TABLA 35: DATOS DE ENTRADA DEL NODO VIDAS F DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 1.....	96
TABLA 36 DATOS DE ENTRADA DEL NODO VIDAS NF DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 2 .....	97
TABLA 37: DATOS DE ENTRADA DEL NODO DAÑOS F DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 1 .....	97
TABLA 38: DATOS DE ENTRADA DEL NODO DAÑOS NF DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 1.....	97
TABLA 39: DATOS DE ENTRADA DEL NODO AVENIDAS DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 1.....	98
TABLA 40 AVENIDAS ENTRANTES AL EMBALSE 1 PARA EL ESCENARIO CAMBIO CLIMÁTICO.....	99
TABLA 41 ESTRUCTURA DEL FICHERO DE MICROSOFT EXCEL UTILIZADO PARA INTRODUCIR LOS DATOS DE LA LAMINACIÓN AL MODELO. ESCENARIO 2050.....	100
TABLA 42 CÁLCULO DE PÉRDIDA DE VIDAS. METODOLOGÍA SUFRI DE LA PRESA 1 PARA EL ESCENARIO CAMBIO CLIMÁTICO .....	101
TABLA 43: DATOS DE ENTRADA DEL NODO VIDAS F DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 1 PARA EL ESCENARIO 2050..	102
TABLA 44 DATOS DE ENTRADA DEL NODO VIDAS NF DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 1 PARA EL ESCENARIO 2050	102
TABLA 45: DATOS DE ENTRADA DEL NODO DAÑOS F DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 1 .....	103
TABLA 46: DATOS DE ENTRADA DEL NODO DAÑOS NF DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 1.....	103
TABLA 47 PROBABILIDADES Y RIESGOS ASOCIADOS AL ESCENARIO CASO BASE DE LA PRESA 1 .....	104
TABLA 48 PROBABILIDADES Y RIESGOS ASOCIADOS AL ESCENARIO FUTURO DE LA PRESA 1 .....	105
TABLA 49 MEDIDAS ESTRUCTURALES Y NO ESTRUCTURALES IMPLANTADAS SOBRE LOS ESCENARIOS DE LA PRESA 1. ....	108
TABLA 50: VALORES DE RIESGO ASOCIADOS AL CASO BASE Y SUS MEDIDAS DE REDUCCIÓN DEL RIESGO .....	112
TABLA 51: INDICADOR ACSLS ASOCIADO A LAS MEDIDAS DE REDUCCIÓN DE RIESGO ASOCIADAS AL CASO BASE.....	115
TABLA 52: PRIORIZACIÓN DE MEDIDAS RESPECTO DEL ESCENARIO ACTUAL: CASO BASE PARA LA PRESA 2 .....	116
TABLA 53: REDUCCIÓN DEL RIESGO TOTAL PARA 3 ALTERNATIVAS RESPECTO EL ESCENARIO BASE ACTUAL. ....	117
TABLA 55: CURVAS FN PARA EL FUTURO Y MEDIDAS DE REDUCCIÓN DE RIESGO ASOCIADAS A LAS RECOMENDACIONES DE TOLERABILIDAD DE RIESGO SOCIAL PROPUESTA POR EL USACE.....	119
TABLA 56: PRIORIZACIÓN PRESA 1 PARA EL ESCENARIO FUTURO.....	120
TABLA 57 SECUENCIA DE PRIORIZACIÓN DE MEDIDAS PRESA 1 .....	121
TABLA 58 RESUMEN CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA PRESA 2.....	123
TABLA 59 DATOS DE ENTRADA DEL NODO ESTACIÓN DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 2. ....	124
TABLA 60 DATOS DE ENTRADA DEL NODO MOMENTO DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 2 .....	125
TABLA 61 AVENIDAS ENTRANTES AL EMBALSE 2.....	126
TABLA 62: DATOS DE ENTRADA DEL NODO AVENIDAS DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 2.....	127
TABLA 63: PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE ESTAR EN UN INTERVALO DETERMINADO DE NIVELES PREVIOS.....	128
TABLA 64: ESTRUCTURA DE LA HOJA DE CÁLCULO PARA EL NODO NIVEL PREVIO .....	129
TABLA 65: DATOS DE ENTRADA EN EL NODO Op. O.P.....	129

TABLA 66: ESTRUCTURA DEL FICHERO DE MICROSOFT EXCEL UTILIZADO PARA INTRODUCIR LOS DATOS DE LA LAMINACIÓN AL MODELO.	133
TABLA 67 DATOS DE ENTRADA DEL NODO ROTURA DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 2	134
TABLA 68 DATOS DE ENTRADA DEL NODO QFALLO DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 2	134
TABLA 69 CÁLCULO DE PÉRDIDA DE VIDAS. METODOLOGÍA SUFRI DE LA PRESA 2	135
TABLA 70 COSTES DE INUNDACIÓN DE LA PRESA 2 PARA EL ESCENARIO H1	136
TABLA 71 COSTES DE INUNDACIÓN DE LA PRESA 2 PARA EL ESCENARIO H2	137
TABLA 72 COSTE DE RECONSTRUCCIÓN PRESA 2	137
TABLA 73 COSTE POR LUCRO CESANTE PRESA 2	138
TABLA 74 COSTE EN CASO DE ROTURA DESGLOSADO DE LA PRESA 2	138
TABLA 75 TABLA RESUMEN DE CONSECUENCIAS ECONÓMICAS DE LA PRESA 2	138
TABLA 76: DATOS DE ENTRADA DEL NODO VIDAS F DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 2	139
TABLA 77 DATOS DE ENTRADA DEL NODO VIDAS NF DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 2	139
TABLA 78: DATOS DE ENTRADA DEL NODO DAÑOS F DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 2	139
TABLA 79: DATOS DE ENTRADA DEL NODO DAÑOS NF DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 2	140
TABLA 80: DATOS DE ENTRADA DEL NODO AVENIDAS DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 2	141
TABLA 81 AVENIDAS ENTRANTES AL EMBALSE 2 PARA EL ESCENARIO 2050	142
TABLA 82 ESTRUCTURA DEL FICHERO DE MICROSOFT EXCEL UTILIZADO PARA INTRODUCIR LOS DATOS DE LA LAMINACIÓN AL MODELO. ESCENARIO 2050	143
TABLA 83 CÁLCULO DE PÉRDIDA DE VIDAS. METODOLOGÍA SUFRI DE LA PRESA 2 PARA EL ESCENARIO 2050	145
TABLA 84: DATOS DE ENTRADA DEL NODO VIDAS F DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 2 PARA EL ESCENARIO 2050	145
TABLA 85 DATOS DE ENTRADA DEL NODO VIDAS NF DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 2 PARA EL ESCENARIO CAMBIO CLIMÁTICO	146
TABLA 86: DATOS DE ENTRADA DEL NODO DAÑOS F DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 2	146
TABLA 87: DATOS DE ENTRADA DEL NODO DAÑOS NF DEL MODELO DE ANÁLISIS DE RIESGO DE LA PRESA 2	146
TABLA 88 PROBABILIDADES Y RIESGOS ASOCIADOS AL ESCENARIO CASO BASE DE LA PRESA 2	147
TABLA 89 PROBABILIDADES Y RIESGOS ASOCIADOS AL ESCENARIO FUTURO DE LA PRESA 2	148
TABLA 90 MEDIDAS ESTRUCTURALES Y NO ESTRUCTURALES IMPLANTADAS SOBRE LOS ESCENARIOS DE LA PRESA 2	151
TABLA 91: VALORES DE RIESGO ASOCIADOS AL CASO BASE Y SUS MEDIDAS DE REDUCCIÓN DEL RIESGO	156
TABLA 92: INDICADOR ACSLS ASOCIADO A LAS MEDIDAS DE REDUCCIÓN DE RIESGO ASOCIADAS AL CASO BASE	159
TABLA 93: PRIORIZACIÓN DE MEDIDAS RESPECTO DEL ESCENARIO ACTUAL: CASO BASE PARA LA PRESA 2	160
TABLA 94: REDUCCIÓN DEL RIESGO TOTAL PARA 3 ALTERNATIVAS RESPECTO EL ESCENARIO BASE ACTUAL	161
TABLA 95 GRÁFICO FN PARA EL ESCENARIO FUTURO Y MEDIDAS DE REDUCCIÓN DE RIESGO BASÁNDOSE EN LAS RECOMENDACIONES DE TOLERABILIDAD DE RIESGO PROPUESTAS POR EL USBR EN EL AÑO 2011	162
TABLA 96: CURVAS FN PARA EL FUTURO Y MEDIDAS DE REDUCCIÓN DE RIESGO ASOCIADAS A LAS RECOMENDACIONES DE TOLERABILIDAD DE RIESGO SOCIAL PROPUESTA POR EL USACE	163
TABLA 97: PRIORIZACIÓN PRESA 2 PARA EL ESCENARIO FUTURO	164

<i>TABLA 98 SECUENCIA DE PRIORIZACIÓN DE MEDIDAS PRESA 2</i> .....	165
<i>TABLA 99 SECUENCIA DE PRIORIZACIÓN PARA PRESA 1 Y 2 POR SEPARADO</i> .....	169
<i>TABLA 100 SECUENCIA DE PRIORIZACIÓN CONJUNTA</i> .....	169

## **CAPITULO 01. INTRODUCCIÓN**



## 1.1 MOTIVACIÓN

El presente Trabajo Final de Máster surge del interés de los autores acerca del papel que desempeña el/la ingeniero/a de Caminos, Canales y Puertos en la actualidad en el ámbito del diseño, construcción y gestión de infraestructuras, concretamente en el análisis y gestión del riesgo de inundación y la definición de medidas de reducción del mismo.

En los últimos años, ha surgido la necesidad de incorporar los impactos potenciales del Cambio Climático en la gestión del riesgo de inundación, entre los que destacan el aumento del nivel del mar, mayor frecuencia e intensidad de tormentas, e inundaciones...además de la disminución de recursos naturales debidos a fenómenos antropogénicos. En definitiva, impactos que en el pasado no se contemplaban en el diseño y construcción de infraestructuras hidráulicas, como son las presas, y que en la actualidad no se pueden eludir. Estos impactos requieren de la revisión de las infraestructuras que fueron diseñadas con anterioridad a este nuevo contexto, debido a que los parámetros y coeficientes empleados en su diseño no se ajustan con las necesidades de gestión y seguridad actuales. Por tanto, muchas de ellas pueden presentar deficiencias o necesidades de mejora para evitar que su fallo o mal funcionamiento suponga un riesgo para la sociedad.

De esta premisa parte la posición que debe tener el Ingeniero/a Civil en la actualidad, es decir, frente a los efectos que se están desarrollando, su deber es, plantear soluciones que permitan mitigar los riesgos naturales en la medida de lo posible o determinar medidas sostenibles que aprovechen de la mejor manera los recursos de los que depende la sociedad tales como agua, energía, etc. En resumen, diseñar estrategias de buena gobernanza de riesgos naturales.

La motivación de los autores del presente Trabajo Final de Máster es debida al papel fundamental que tiene la figura del Ingeniero/a Civil frente a los problemas ambientales que se están desarrollando, y la importancia que tiene una gestión eficiente de las actuaciones que se desempeñan para evitar la potencial pérdida de vidas y consecuencias económicas derivadas del fallo o mal funcionamiento de obras de defensa frente a inundaciones, como son las presas, así como el desarrollo de estrategias de buena gobernanza que permitan gestionar el riesgo de forma efectiva y eficiente.

## **1.2 OBJETO DEL TRABAJO**

El presente Trabajo Final de Máster tiene como objetivo principal profundizar en la aplicación de técnicas de análisis de riesgo para informar la toma de decisiones en materia de gestión de seguridad de presas a través de casos reales, dos presas ubicadas en las provincias de Cáceres y Badajoz, respectivamente.

Para ello, se ha realizado en primer lugar un estudio de las referencias clave del estado del arte actual en materia de gestión de seguridad de presas informada en riesgo.

Tras conocer el estado del arte se ha procedido a la revisión y selección de la información de cada caso de estudio para la elaboración de un modelo de riesgo para cada presa. Para la elaboración del modelo de riesgo se han realizado los cálculos necesarios para la estimación de los datos de entrada al modelo en lo referente a solicitaciones, respuesta del sistema y consecuencias.

Una vez definido el modelo se ha calculado y evaluado el riesgo tanto para la situación base como para dos escenarios futuros. Los escenarios futuros que se han estudiado proyectan el riesgo de las presas para el año 2050, teniendo en cuenta los efectos del cambio climático y el desarrollo socioeconómico de la zona donde se encuentran.

Finalmente, se han planteado secuencias de priorización de medidas de reducción del riesgo a escala individual y en conjunto para las dos presas analizadas.

## **CAPITULO 02. ANÁLISIS DE RIESGO**



## **2.1 ANÁLISIS DE RIESGO APLICADO A LA GESTIÓN DE SEGURIDAD DE PRESAS**

El análisis de riesgo surge como herramienta para informar la toma de decisiones ante la necesidad de aumentar la seguridad de las infraestructuras y priorizar inversiones. En el caso de las infraestructuras hidráulicas, dichas infraestructuras representan grandes avances para la sociedad, pero al mismo tiempo también la hacen más vulnerable. En el caso de las presas, fue la rotura de la presa de Teton (USA) en 1976 la que dio lugar a una nueva visión en la forma de entender y estudiar la gestión en seguridad de presas (SPANCOLD, 2012)[1]. A finales de 1990, fue el Bureau of Reclamation de los Estados Unidos quien inició trabajos relacionados con la gestión del riesgo en seguridad de presas. En 2005, el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE) junto con el organismo regulador de la energía hidroeléctrica de dicho país (FERC) siguieron los pasos iniciados por el Bureau of Reclamation, lo que indica el incremento de la importancia de la aplicación del análisis del riesgo en países desarrollados (SPANCOLD,2012)[1].

En España, las roturas de la presa de Ribadelago en 1959 y Tous en 1982, motivaron el desarrollo de instrumentos normativos de apoyo hacia un diseño y gestión eficaz de estas infraestructuras, (J.T. Castillo-Rodríguez et al., (2016)[9]

Desde entonces, en los últimos años se han desarrollado estrategias de gestión de riesgo que no sólo tienen en cuenta medidas de seguridad de las infraestructuras, sino también la escasez de los recursos, población afectada y la evolución de esta, así como el impacto del Cambio Climático.

De este contexto surge el Análisis del Riesgo como herramienta de apoyo a la toma de decisiones, que permite integrar toda la información necesaria para el análisis del riesgo del sistema presa-embalse y la definición de la secuencia óptima de medidas de reducción del mismo.

### **2.1.1 Marco normativo en materia de seguridad de presas**

Hasta hace unos años el marco normativo referente a la seguridad de presas se centraba principalmente en la protección de la infraestructura ignorando los riesgos asociados a las consecuencias derivadas de un fallo de esta.

En España, en 1967 surge la “Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas” donde se definen las nuevas responsabilidades de los propietarios de las presas en lo referente al diseño, construcción y explotación de las mismas.

Posteriormente, surgieron nuevos paradigmas en materia de seguridad de presas a partir de la publicación en el BOE de la “Directriz Básica de la Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones” (1995) donde por primera vez se obliga a redactar e implantar Planes de Emergencia de Presas clasificadas previamente en función de su riesgo potencial (SPANCOLD,2012).

En 1996 se aprobó el “Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses” cuyo objetivo era actualizar los conceptos y criterios sobre la seguridad de presas que quedaron desactualizados estableciendo que el riesgo potencial es el principal criterio que debe guiar las actuaciones en seguridad de presas.

Los dos instrumentos anteriores constituyen el marco normativo actual en materia de gestión de seguridad de presas en España.

En Europa, la Directiva Europea de Inundaciones de 2007 (2007/60/CE) y la Directiva Europea sobre la identificación y designación de infraestructuras críticas europeas de 2008 (2008/114/CE) introducen la gestión del Análisis de Riesgos.

Actualmente, es competencia del ahora Ministerio de Transición Ecológica definir los aspectos generales y los criterios de la Seguridad de las Presas, con la actual necesidad de unificar la Instrucción y el Reglamento dando lugar a un único documento normativo. Actualmente, el Ministerio trabaja en la publicación de las Normas Técnicas de Seguridad (NTS).

Las exigencias mínimas de seguridad se recogerán, por tanto, en tres Normas Técnicas de Seguridad (MAGRAMA, 2016)[15]:

- Norma Técnica de Seguridad para la clasificación de las presas y para la elaboración e implantación de los planes de emergencia de presas y embalses.
- Norma Técnica de Seguridad para el proyecto, construcción y puesta en carga de presas y llenado de embalses.
- Norma Técnica de Seguridad para la explotación, revisiones de seguridad y puesta fuera de servicio de presas.

Por tanto, actualmente, el marco normativo referente en seguridad de presas viene definido por la Instrucción y el Reglamento, a falta de que se aprueben las NTS.

### **2.1.2 Gestión de seguridad de presas informada en riesgo**

Como se ha comentado en la introducción de este capítulo el análisis de riesgo en presas surge como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones, ya que integra toda la información necesaria del sistema y permite analizar y evaluar el riesgo.

Diversos condicionantes prácticos han marcado el desarrollo en los últimos años de técnicas de análisis de riesgos a partir de las cuales llevar a cabo una gestión moderna, eficiente y transparente en seguridad de presas, de los cuales destacan la responsabilidad pública de los titulares de la presas junto al desarrollo de la sociedad que precisa de mayores niveles de seguridad, la necesidad de justificar el uso de los fondos públicos, la priorización en las medidas correctoras para que su aplicación sea positiva y no genere mayores consecuencias, el envejecimiento del parque actual de presas y la explotación de infraestructuras existentes, así como las dificultades actuales para la construcción de nuevas presas.(I.Escuder Bueno, González-Pérez, J. 2014)[10]

Son múltiples las ventajas de la incorporación del Análisis de Riesgos a la gestión de seguridad de presas y embalses. I.Escuder Bueno, González-Pérez, J. (2014)[10]. A continuación, se incluye una lista no exhaustiva de ellas:

- Integrar y poner en valor toda la información existente de la presa.
- Fomentar la participación de todos los actores involucrados en el diseño, construcción y operación de la presa.
- Promover una gestión continua en el tiempo (actualización) y mantener este proceso como un proceso vivo y continuado.
- Cuantificar el riesgo existente y analizar diferentes escenarios en función de las diferentes medidas de mitigación de riesgo posibles.
- Identificar y justificar medidas de mitigación de riesgo a corto, medio y largo plazo.
- Favorecer la consideración de principios de transparencia, eficiencia y equidad en la toma de decisiones.
- Evaluar la incertidumbre existente.
- Mejorar los procesos de comunicación del riesgo.

La gestión de seguridad de presas informada en riesgo permite la toma de decisiones, a titulares, gestores y operadores de presas, atendiendo a aspectos de eficiencia, equidad, sostenibilidad y transparencia, entre otros (Castillo-Rodríguez et al., 2015)[8]

Se entiende como riesgo la combinación de la probabilidad de que se presente un evento o amenaza y las consecuencias negativas que este genera. Las consecuencias negativas o vulnerabilidad que se integran en la definición de riesgo son las que afectan tanto a las vidas humanas, actividades económicas, medio ambiente o patrimonio cultural. La transposición al ordenamiento jurídico español de la Directiva 2007/60/CE se tradujo en el año 2010 en la aprobación del Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, en el que se define riesgo de inundación como “la combinación de la probabilidad de que se produzca una inundación y de sus posibles consecuencias negativas para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural, la actividad económica y las infraestructuras”. El objetivo del análisis del riesgo de inundación será determinar la naturaleza y magnitud del riesgo existente, analizando las amenazas potenciales y vulnerabilidades para evitar o reducir las consecuencias.

Debido a que los eventos extremos de avenidas o precipitaciones están relacionados con un periodo de retorno:

$$f = 1/T$$

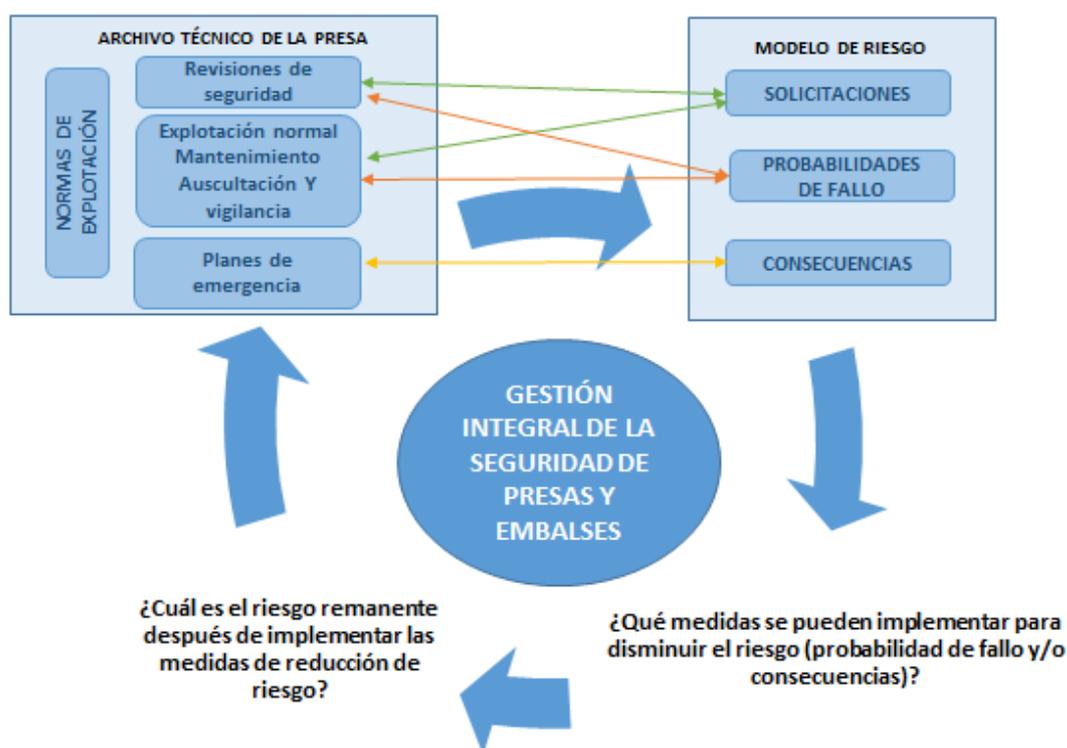
Dónde:  $f$  = es la frecuencia

$T$  = es el periodo de retorno

y que las probabilidades asociadas a la respuesta del sistema son valores de probabilidad condicional de ocurrencia son adimensionales, la probabilidad de amenaza tiene unidades de tiempo<sup>-1</sup>.

Se denomina riesgo social al riesgo asociado a las consecuencias expresadas en número de pérdida de vidas potencial. Este riesgo se define por tanto como la relación entre la frecuencia y la pérdida potencial de vidas. A su vez, se denomina riesgo económico cuando las consecuencias se expresan en unidades monetarias.

El análisis de riesgo incluye la elaboración de un modelo, representativo del sistema presa-embalse, que se basa en información generalmente contenida en los principales documentos de seguridad de la presa, tales como las Normas de Explotación, el Plan de Emergencia, las Revisiones de Seguridad, Informes de Comportamiento, etc. Todos aquellos documentos que conforman el Archivo Técnico de la presa.



Lustración 1: Adaptación del esquema de Gestión integral de la seguridad de presas y embalses y vínculos entre el modelo de riesgo y de los documentos del Archivo Técnico. Fuente: Adaptado de SPANCOLD (2012). [1]

Como se observa en el esquema de la Ilustración 1, en el modelo se diferencian tres bloques: las solicitudes, las probabilidades de fallo, y las consecuencias. Cada uno de estos bloques está vinculado a información contenida en uno o varios de los documentos que contiene el Archivo Técnico de la presa correspondiente.

Por tanto, la relación entre el modelo de riesgo y el Archivo Técnico es bidireccional. Por una parte, el Archivo Técnico es una fuente de información de la presa para el modelo, y por otra

parte la definición y desarrollo del modelo permite conocer el sistema e incorporar información al Archivo Técnico de la presa.

En los apartados 2.2.4 y 2.2.5 se describen las fases de definición de la arquitectura del modelo de riesgo y el proceso de estimación de los datos de entrada al mismo, respectivamente.

## **2.2 METODOLOGÍA EMPLEADA**

En este apartado se describen los pasos que se han seguido para la realización del análisis del riesgo de las presas objeto de estudio.

La metodología empleada es la descrita en la Guía Técnica N°8, Vol.I., con título “Análisis de Riesgos aplicado a la Seguridad de Presas y Embalses”, publicada por SPANCOLD en 2012 [1]. que describe los procesos que se muestran en la Ilustración 2.

El primer paso de la metodología es determinar los objetivos a los que se quiere llegar y el alcance del análisis, así como el nivel de detalle del mismo. Seguidamente se revisa el Archivo Técnico de la presa, cuyo objetivo es determinar si toda la información técnica de la que se dispone es suficiente para realizar el análisis del riesgo o si se deben realizar estudios adicionales que lo completen.

Una vez analizada la información técnica, se detalla la situación actual en la que se encuentra la presa, situación de la que se parte para posteriormente analizar otros escenarios y el impacto de medidas de reducción del riesgo. A partir del caso base, se define el modelo de riesgo que será clave para el análisis del mismo, y junto con la estimación de los datos de entrada de datos al modelo, se obtendrá el cálculo del riesgo del caso base. El riesgo obtenido se evalúa comparándolo con las recomendaciones internacionales de tolerabilidad propuestas por diferentes organismos, tales como ANCOLD y USACE que realizan ANCOLD[2] y USACE para presas existentes, y el USBR[6] 2011. Finalmente se plantean las medidas de reducción del riesgo, en este caso relativas a la reducción de la probabilidad de sobrevertido de la presa y su riesgo asociado, y se realiza una priorización de estas para definir una gestión eficiente y responsable.

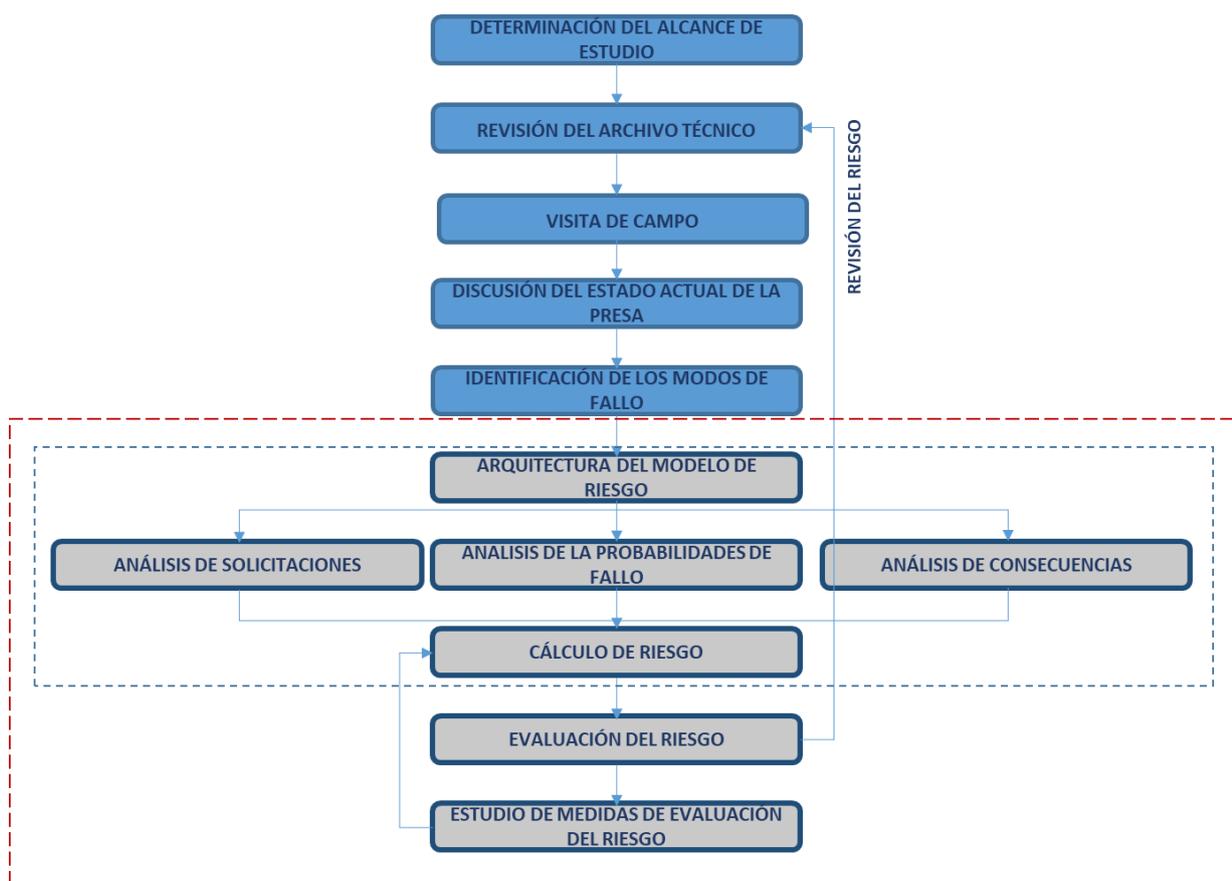


Ilustración 2 Adaptación del Esquema del proceso de Análisis de Riesgo, resaltando los procesos específicos de la arquitectura y cálculo del modelo de riesgo. FUENTE: SPANCOL[1]

En la Ilustración 2 se han marcado los procesos que se han realizado para la elaboración del análisis de riesgo de las presas. El primer paso ha sido la definición de la arquitectura del modelo de riesgo.

### 2.2.1 Definición del ámbito de estudio

En este apartado se establece el ámbito de estudio, es decir, el alcance del mismo, escala y objetivos del mismo. El grado de detalle del ámbito de estudio también se definirá para establecer la información necesaria, para conocer la información requerida para el cálculo del riesgo y se revisarán las diferentes fases de la metodología.

El nivel de detalle está relacionado además de con el tamaño del área de estudio con, el nivel y gestión de los recursos, así como la adquisición de datos.

El ámbito de estudio de este trabajo es la zona de afección aguas abajo de las presas que se plantean.

El modo de fallo que se estudia es el modo de fallo por sobrevertido, por esta razón no se incluye un apartado con la identificación de los modos de fallo.

El cálculo del riesgo se ha realizado con el programa iPresas HidSimp Versión 1.0.1 para posteriormente realizar la priorización de medidas a partir de los resultados obtenidos. iPresas Flood es una versión simplificada del software iPresas Calc, diseñada para realizar cálculos de riesgo de inundación en áreas urbanas e introducir estos resultados en un Análisis Coste-Beneficio.

### **2.2.2 Revisión de la información existente**

A continuación, se incluye un listado de los documentos y la información consultada para la realización del trabajo:

- Modelo Digital del Terreno.
- Estudios pluviométricos e hidrológicos, desarrollados en HEC-HMS del U.S. Army Corps of Engineers, que reproduce el comportamiento de una cuenca durante el tránsito de avenidas.
- Hidrogramas de avenidas del cauce para 2, 5, 10, 25, 50, 100, 500, 1.000, 5.000 y 10.000 años de período de retorno.
- Información de eventos de inundación anteriores.
- Características de cada presa, estudio de operatividad de compuertas, niveles previos, laminación, hidrogramas de rotura, etc
- Características de la presa y sus órganos de desagüe. Es necesario conocer la curva cota-volumen del embalse. Además hay que conocer la capacidad de cada uno de los órganos de desagüe de la presa en función del nivel de embalse. Igualmente, se debe disponer de la curva de vertido del aliviadero en lámina libre.
- Caudales pico de los hidrogramas de salida de la presa por laminación de avenidas y en caso de rotura de la presa.
- Modelo hidráulico del cauce.
- Mapas de inundación: caudales, calados y velocidades resultantes de la laminación y en casos de rotura.
- Mapas de usos del suelo, tipologías de edificación, número de viviendas y afecciones potenciales.
- Identificación de áreas vulnerables (zonas de acampada, hospitales, etc.).
- Plan de Emergencia de la Presa.
- 

### **2.2.3 Estado de la situación actual. Definición del caso base y otros escenarios analizados**

La definición del Caso Base (CB) busca evaluar la situación actual del sistema.

Además del caso base, se ha realizado el estudio de un escenario futuro en el año 2050 (EC2050), el cual aglutina cambios en términos climáticos y socioeconómicos con el objetivo de hacer una comparación entre el escenario actual y escenarios futuros.

A continuación, se definen de forma detallada los escenarios futuros considerados: Escenario Cambio Climático 2050 y Escenario Socioeconómico 2050.

#### ▪ **Escenario Cambio Climático 2050**

Para la definición de este escenario en principio se consultaron los datos publicados en AEMET. La Agencia Estatal de Meteorología dispone de las proyecciones climáticas para el siglo XXI, de los datos destaca la incertidumbre que presentan los mismos, debido a la disparidad de estos entre los diferentes modelos empleados en la obtención de las proyecciones climáticas.

El Quinto Informe (AR5) de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)[18] también afirma que los resultados obtenidos en los diferentes modelos tienen un nivel de confianza medio. Según la comparación que se realiza en *Garijo.C et al (2018)[16]*, en base a una serie de estadísticos cuyos resultados muestran que aunque el ajuste de los modelos utilizados en AEMET es bueno para valores medios anuales, los valores máximos anuales de precipitación no son adecuados, ya que los modelos simulan un clima con precipitaciones máximas anuales inferiores, menor variabilidad de los extremos y una gran incertidumbre en su caracterización. Además entre las conclusiones de este artículo se destaca:

- “que los modelos utilizados para los métodos de regionalización subestiman las precipitaciones extremas (precipitaciones máximas anuales) empeorando los resultados”.
- “la falta de ajuste en los máximos y la aleatoriedad de algunos de sus estadísticos indican que los métodos de regionalización utilizados por AEMET no son adecuados para caracterizar los extremos de precipitación, por lo que se deberían probar otros métodos de regionalización que quizás mejorasen el comportamiento extremal de las proyecciones de precipitación.”

En Mediero, L. et al (2018) [17] se evalúa la influencia de los cambios esperables en las precipitaciones máximas sobre los hidrogramas de avenida utilizados en el diseño y comprobación de la seguridad hidrológica de presas. De este artículo se ha extraído la información necesaria para cuantificar los incrementos de caudales pico que definen el Escenario Cambio Climático 2050 que se detalla a continuación.

Las proyecciones de los hidrogramas de avenida para el año 2050 suponen incrementos de caudales punta de avenida: para  $T < 500$  años los incrementos de caudales punta de avenida son de un 13%, para periodos de retorno comprendidos entre 500-1000 años se estima un incremento del 23% y para periodos de retorno superiores a 1000 años se consideran incrementos del 40%.

Por tanto, dichos incrementos de los caudales punta de avenida se han considerado en cada una de las presas para recalcular la laminación de avenidas y estimar las consecuencias económicas y pérdida de vidas potenciales que generaría, así como el análisis del riesgo de inundación tras la aplicación de medidas estructurales y no estructurales.

#### ▪ **Escenario Socioeconómico 2050**

Para la definición del Escenario Socioeconómico 2050 se tiene en cuenta tanto el crecimiento poblacional a través de los datos publicados por el INE (Instituto Nacional de Estadística)[12]

como los usos del suelo que se prevén a través de los Planes Generales de Ordenación Urbana. Cabe destacar que según los datos proporcionados por el INE para el escenario 2050 no se prevé un aumento de la población residente en las zonas donde se ubican las presas.

En cuanto a los usos del suelo la implementación de los PGOU de los municipios aguas abajo de cada presa en general supone:

- Ordenación de las zonas de desarrollo urbano existentes, resolviendo la articulación de las mismas con las zonas consolidadas.
- Definición de los desarrollos urbanos residenciales, favoreciendo una ocupación del territorio que responda a un modelo urbano más compacto y sostenible.
- Recuperación de las intensidades, usos y tipologías tradicionales en el suelo urbano histórico, y control de la puesta en uso de los nuevos suelos urbanos.
- Mejora del nivel de cobertura del equipamiento y de la calidad del existente.
- Preservación de la homogeneidad de la estructura urbana existente así como establecimiento de medidas de protección sobre el patrimonio de interés histórico, artístico, etnográfico y arquitectónico

Se pretende así mismo la potenciación de una oferta turística basada en los recursos eco-culturales del municipio: embalses, espacios protegidos y patrimonio histórico-artístico.

Este marco de desarrollo mejorará y, en su caso, aumentará las dotaciones de servicios con las que actualmente cuentan las zonas donde se ubican las presas, por tanto el estudio de las consecuencias económicas y pérdida de vidas será de especial importancia. Por tanto, para este escenario se ha considerado un aumento de la población estacional aguas abajo de las presas.

Una mayor población estacional se traduce en un aumento del riesgo social y económico. En el capítulo 3, se refleja a través de los resultados obtenidos en el estudio, qué supone en términos de riesgo dicho crecimiento en la población aguas abajo de la presa.

#### **2.2.4 Arquitectura del modelo de riesgo**

- **Modelo de riesgo:**

El software iPresas Calc, así como su versión simplificada iPresas HidSimp (utilizada en este trabajo)[11], permite calcular el riesgo mediante la utilización de un árbol de eventos y su diagrama de influencia, herramientas que permiten representar modelos de riesgo de sistemas complejos de forma sencilla y compacta

Los diagramas de influencia se componen de nodos (donde se introduce la información) y de conectores (donde se especifican las relaciones entre los nodos).

Para analizar el escenario hidrológico, los datos que deben ser introducidos en el modelo son:

- 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 combinación 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. En este trabajo, se ha considerado el modo de fallo por sobrevertido.
- 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.

Estos datos introducidos al modelo se detallan ampliamente en el punto 2.2.5.

Para los casos de estudio analizados se plantea el diagrama de influencia que se muestra en la ilustración 3.

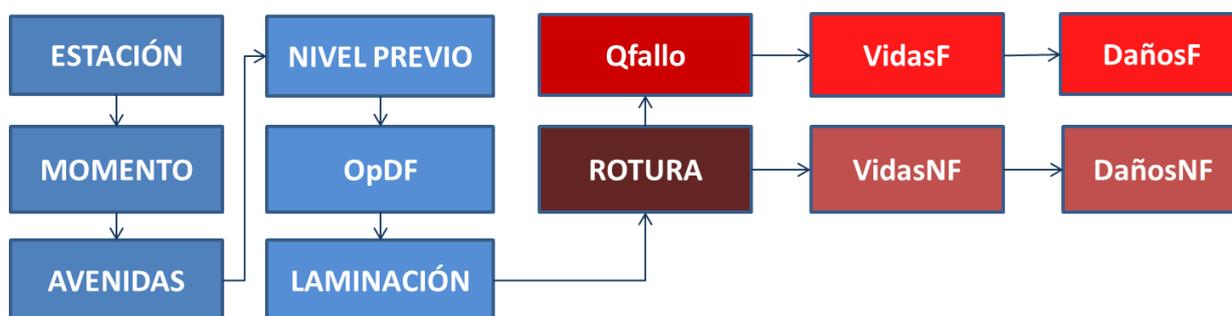


Ilustración 3 Diagrama de influencia empleado. Fuente: Adaptado de iPresas HidSimp[11]

### 2.2.5 Datos de entrada al modelo de riesgo.

En este apartado se procede a la descripción de los procesos seguidos para la obtención de los datos de entrada al modelo de análisis del riesgo siguiendo el esquema de la Ilustración 3.

#### 2.2.5.1 Cargas

Esta parte del modelo, que muestran los nodos en azul, tiene como objetivo definir el nivel de agua alcanzado en el embalse en función de la operatividad de los órganos de desagüe, el nivel de partida y la avenida entrante al embalse. Además, incluye otros nodos auxiliares para la definición de distintas categorías de tiempo para caracterizar las consecuencias asociadas a la inundación y que pueden variar en función de la estación o el momento del día. Por tanto, esta parte incluye los siguientes nodos:

▪ **Nodo Estación**

Define dos periodos de tiempo y sus probabilidades para la definición posterior de consecuencias de inundación. En general se usa para definir la probabilidad de verano/invierno en el caso de variación estacional de la población.

Las probabilidades asociadas a los periodos de tiempo deben sumar 1.

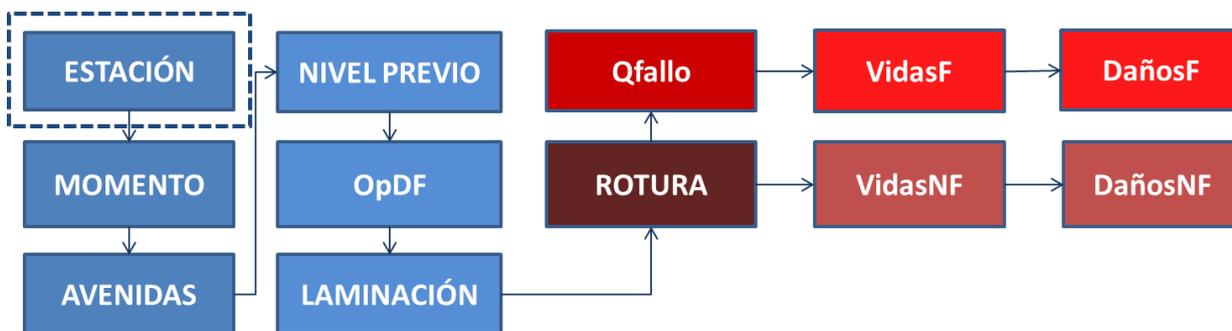


Ilustración 4 Indicación del Nodo Estación en el Diagrama de influencia empleado. Fuente: Manual de: iPresas HidSimp[11]

▪ **Nodo Momento**

Define dos periodos de tiempo durante el día y sus probabilidades (condicionales) para la definición posterior de consecuencias de inundación (por ejemplo, día/noche en el caso de variación diaria de la población y para el establecimiento de tiempos de aviso diferentes entre el día y la noche).

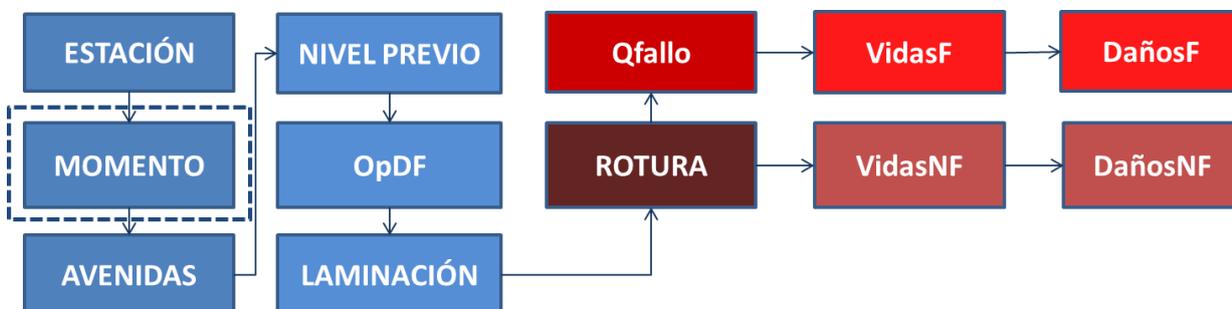


Ilustración 5 Indicación del Nodo Momento en el Diagrama de influencia empleado. Fuente: Manual de: iPresas HidSimp[11]

▪ **Nodo Avenidas**

Define el rango de los períodos de retorno de las avenidas que se van a considerar.

En este nodo se introducen los períodos de retorno mínimo y máximo de las avenidas que entran al embalse. A partir de la inversa de los valores del periodo de retorno, el programa estima la probabilidad anual de excedencia (PAE), que es la variable de salida de este nodo.

A partir de los valores de máximo y mínimo período de retorno introducidos, el software realiza una división del rango de períodos de retorno en intervalos. Por defecto, la división se realiza en diez ramas.

En el análisis del modo de fallo por sobrevertido es importante introducir avenidas de elevada magnitud y baja probabilidad de ocurrencia que produzca un sobrevertido en la presa.

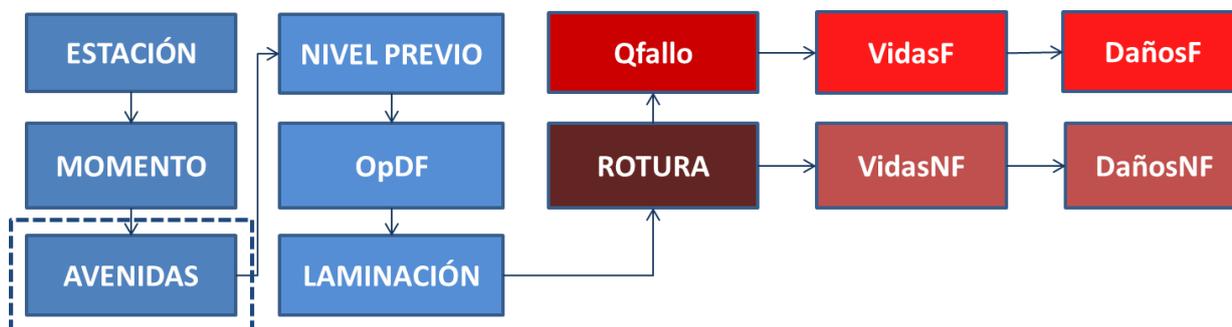


Ilustración 6 Indicación del Nodo Avenidas en el Diagrama de influencia empleado. Fuente: Manual de: iPresas HidSimp[11]

El cálculo de las avenidas entrantes al embalse es un paso previo y necesario para realizar el cálculo de la laminación.

El propósito del estudio hidrológico en el análisis de riesgo es la obtención de una serie de hidrogramas de avenida con un cierto periodo de retorno asociado. Esto significa que deben obtenerse los hidrogramas asociados al rango de todos los posibles eventos de avenida que puedan producirse.

No es objeto de este trabajo académico la elaboración de un estudio de máximas avenidas, el cual nos proporcione, para unos determinados periodos de retorno, los hidrogramas de entrada al embalse. Las avenidas entrantes al embalse son un dato disponible en los estudios hidrológicos realizados para cada presa y que constan en el Archivo Técnico.

#### ▪ **Nodo Nivel Previo**

Define los niveles de partida en el embalse cuando llega la avenida y su probabilidad.

La función de este nodo es introducir el nivel previo al que se encuentra el embalse en el momento en el que llega la avenida. Para ello, se introduce una hoja de cálculo donde se indica la probabilidad de diferentes niveles en el embalse. La probabilidad de todos los niveles introducidos debe sumar 1.

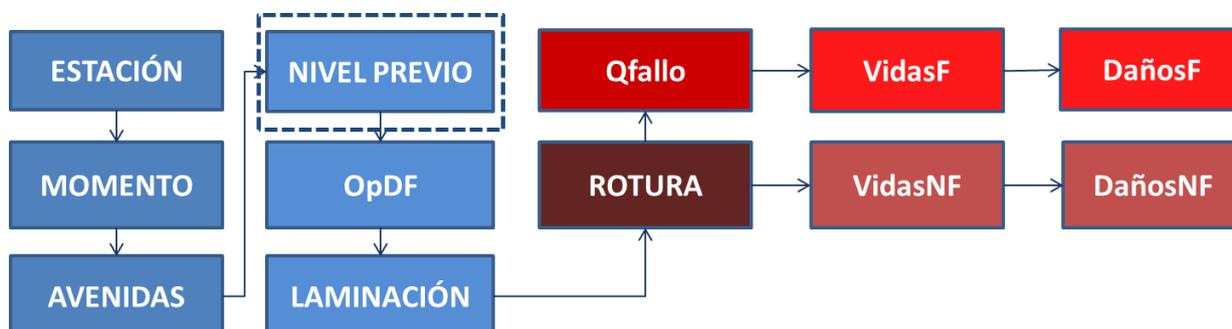


Ilustración 7 Indicación del Nodo Nivel Previo en el Diagrama de influencia empleado. Fuente: Manual de: iPresas HidSimp[11]

Por tanto, el estudio de los niveles previos tiene el objetivo de analizar la probabilidad de que el embalse se encuentre a un cierto nivel cuando llega la avenida, es decir, define la situación de partida del embalse.

Para obtener una relación entre probabilidad y niveles en el embalse se ha utilizado el registro de niveles históricos. Es necesario que el registro sea lo suficientemente largo y fiable para que sea representativo de la operación normal del sistema.

Para evitar introducir en la curva de probabilidad los datos que no son representativos de la situación normal del embalse, se eliminan del análisis los datos correspondientes a las situaciones de avenida (situaciones en las que el embalse se encuentra a un nivel por encima del Nivel Máximo Normal N.M.N)

La relación entre el nivel previo y su probabilidad de ocurrencia se suele incluir en el modelo de riesgo a partir de la obtención de una curva de probabilidad de excedencia de niveles en el embalse.

Para su elaboración se sigue la siguiente metodología:

- La serie histórica de niveles se ordena por niveles crecientes.
- Para cada nivel se calcula su probabilidad de excedencia.
- Se discretiza el rango de niveles posibles en x intervalos.
- Se calculan los niveles medios de cada intervalo resultante.
- Cada nivel medio tiene asociada como probabilidad la diferencia entre las probabilidades de excedencia correspondientes a los niveles extremos del intervalo en el que se encuentre.

De esta forma, la probabilidad de excedencia de cada nivel del embalse se obtiene con la siguiente fórmula:

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

Siendo:  $PE_n$  = Probabilidad de Excedencia de un nivel n.

$i_n$  = Número de orden del nivel n dentro de la serie de niveles ordenados de menor a mayor.

$N$  = Longitud de la serie de niveles.

Los datos de entrada necesarios para el modelo de riesgo incluyen la probabilidad de ocurrencia de un determinado nivel cuando llega la avenida correspondiente. Por tanto, el modelo no incluye la probabilidad de excedencia ( $PE_n$ ) sino la probabilidad de estar en un determinado intervalo de niveles previos, siendo representado dicho intervalo por el promedio de sus extremos, denominado nivel previo representativo.

Así, una vez ordenado de menor a mayor todo el registro de niveles previos y calculada la probabilidad de excedencia para cada nivel, se define una serie de intervalos para los que se calcula la probabilidad de ocurrencia y su valor representativo.

### ▪ **Nodo Op. O.D**

La función de este nodo es introducir la fiabilidad de cada uno de los órganos de desagüe de los que dispone la presa y que pueden ser utilizados para la laminación de una avenida.

La operatividad de un órgano de desagüe se define por el número de elementos de un órgano que funcionarían correctamente cuando es necesaria su utilización para laminar una avenida. Estos elementos pueden ser los vanos de un aliviadero superficial, o los conductos en el caso de un desagüe.

Los valores de probabilidad de la operatividad son estimados a partir de la fiabilidad individual de cada órgano de desagüe siguiendo una distribución binomial. A partir de los valores habituales de la fiabilidad de órganos de desagüe en presas, el software iPresas incorpora algunos valores estandarizados que varían en función del estado del órgano de desagüe. Los valores propuestos son:

- 95%: Cuando se trata de un órgano de desagüe nuevo o muy bien mantenido.
- 85%: Cuando es un órgano de desagüe bien mantenido pero que ha tenido algún problema menor.
- 75%: Cuando se trata de un órgano de desagüe con algún problema.
- 50%: Cuando el uso del órgano de desagüe para laminar avenidas es poco fiable.
- 0%: Cuando se trata de un órgano de desagüe nada fiable o que nunca ha sido utilizado.

Los órganos de desagüe con una fiabilidad del 100% (un aliviadero de labio fijo sin problemas de obstrucción) no se incluyen en este nodo.

Gracias a este nodo, se puede evaluar como un cambio en los órganos de desagüe, por ejemplo, por la mejora de las compuertas del aliviadero, modifica el riesgo de sobrevertido en la presa, y, por tanto, el riesgo de inundación aguas abajo.

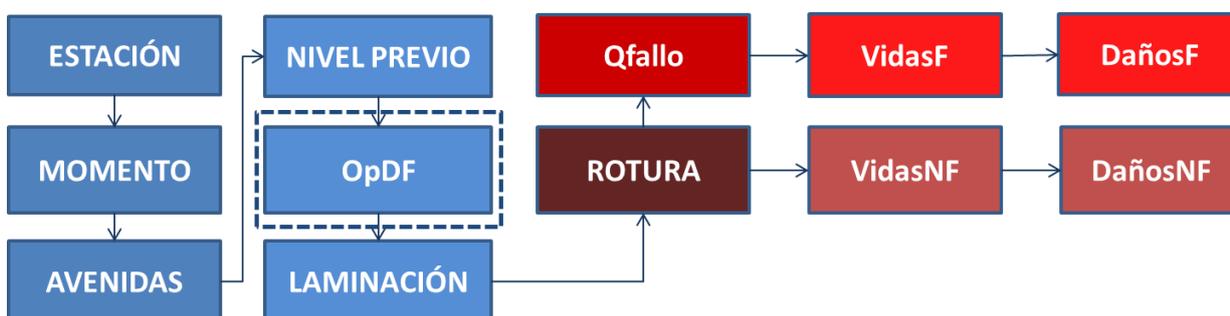


Ilustración 8 Indicación del Nodo Nivel Previo en el Diagrama de influencia empleado. Fuente: Manual de: iPresas HidSimp[11]

### ▪ **Nodo Laminación**

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

- Hidrograma de entrada al embalse.

- Histórico de Niveles previos.
- Curva característica del embalse.
- Curvas de gasto de los órganos de desagüe.
- Consignas de operación de compuertas de órganos de desagüe.

Con los datos de máximas avenidas entrantes al embalse para distintos periodos de retorno, se ha analizado la laminación de las mismas teniendo en cuenta las características del aliviadero de la presa, el desagüe de fondo y la curva característica del embalse.

En este nodo se introducen los resultados obtenidos al simular la laminación en el embalse para las avenidas consideradas en el estudio. Los resultados que se introducen en el modelo de riesgo son el nivel máximo alcanzado en el embalse al laminar las avenidas y el caudal laminado máximo.

Para introducir los datos en este nodo se extraen los cálculos de la laminación en el embalse para todas las avenidas consideradas y para todas las combinaciones de nivel previo y de funcionamiento de los órganos de desagüe utilizados para la laminación (para el caso base no se considera la operación del desagüe de fondo). Para cada una de estas combinaciones debe calcularse el nivel máximo alcanzado en el embalse (**MaxWL**) y el caudal laminado máximo (**QNo\_Fallo**).

Estos cálculos son introducidos en el programa mediante una hoja de cálculo tal y como se detallará en el capítulo 3. Dicha hoja de cálculo tiene la siguiente distribución:

<i>T</i>	<i>AEP</i>	<i>PrevWL</i>	<i>OpA</i>	<i>OpDF</i>	<i>MaxWL</i>	<i>QNo_Fallo</i>
<b>10000</b>	0.0001	572.5	1	0	580.75	41.63
<b>10000</b>	0.0001	572.5	1	1	580.74	41.82
<b>10000</b>	0.0001	572.5	1	2	580.75	41.41
<b>10000</b>	0.0001	573.5	1	0	580.81	43.64
<b>10000</b>	0.0001	573.5	1	1	580.81	43.82
<b>10000</b>	0.0001	573.5	1	2	580.86	43.42
<b>10000</b>	0.0001	574.5	1	0	580.872	45.78
<b>10000</b>	0.0001	574.5	1	1	580.87	45.96

Tabla 1 Ejemplo de parte de la hoja de cálculo introducida en el Nodo Laminación del modelo de riesgo del caso Presa 1.

Para el cálculo del Caso base se ha considerado que la operatividad de los desagües de fondo es nula, por tanto, en la columna *OpDF* no aparecerán los valores 1 y 2.

En esta hoja de cálculo, cada línea representa los resultados obtenidos al realizar un cálculo de laminación. A partir de estos datos, el software realiza una interpolación de las variables de salida en función del valor de AEP de la avenida entrante considerada en el modelo y definida en el nodo Avenidas

En la primera fila de esta hoja debe indicarse el nombre de las variables que participan en la laminación y que debe coincidir con los nombres introducidos en los diferentes nodos del modelo de riesgo (AEP, PrevWL y variables introducidas en el nodo O.D.). A continuación se describen las variables de la hoja de cálculo que incorpora los resultados del estudio de laminación de avenidas:

- AEP: Indica la probabilidad anual de excedencia de las avenidas consideradas. En el modelo de riesgo es conveniente introducir la laminación para el mayor número de avenidas posible, situadas entre los períodos de retorno fijados en el primer nodo. A partir de estas avenidas el programa realiza una interpolación de los resultados de laminación con las ramas calculadas en el primer nodo.
- PrevWL: Indica el nivel de partida en el embalse cuando llega la avenida.
- OpA, OpDF: Indica la operatividad de los órganos de desagüe (en este caso, hay dos). Debe haber una columna por cada órgano de desagüe introducido. El número de columnas de órganos de desagües y sus nombres deben coincidir con los datos introducidos en el nodo *Op. O.D.*
- MaxWL: En esta columna se introduce el nivel máximo obtenido en el embalse por la entrada de la avenida para cada laminación realizada.
- QNo\_Fallo: En esta columna se introduce el caudal máximo laminado. Este caudal es la suma del caudal laminado a través de todos los órganos de desagüe más el caudal de agua que pasa por encima de la presa en caso de sobrevertido, es decir, caudal de salida total aguas abajo de la presa.

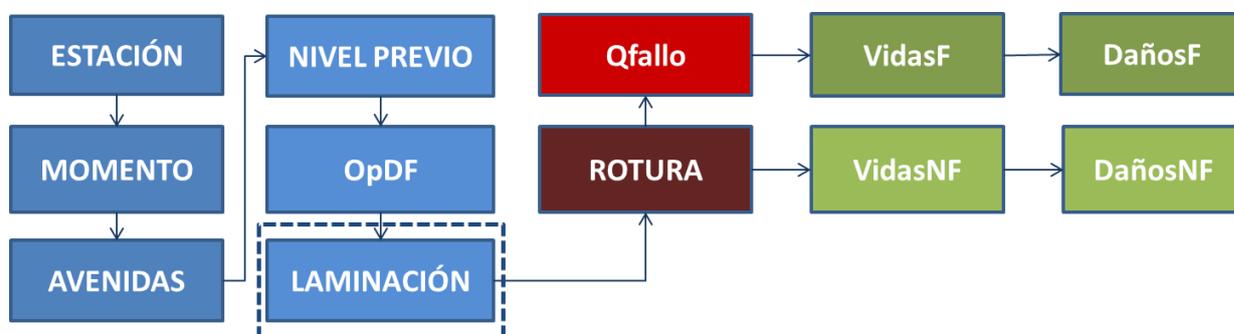


Ilustración 9 Indicación del Nodo Laminación en el Diagrama de influencia empleado .Fuente: Manual de: iPresas HidSimp[11]

### 2.2.5.2 Respuesta del sistema:

Los Nodos Rotura y Qfallo (señalados en rojo en 2.2.4) introducen la probabilidad de rotura de la presa por sobrevertido en función del nivel en el embalse y el caudal pico en caso de rotura, respectivamente. Para el cálculo de la probabilidad de fallo se utilizan curvas estandarizadas que relacionan la probabilidad de fallo con la altura de sobrevertido, por lo que en este nodo solo es necesario definir el tipo de presa y el nivel de coronación. Los nodos se describen a continuación.

#### ▪ Nodo Rotura

La función de este nodo es introducir la probabilidad de rotura de la presa por sobrevertido en función del nivel máximo alcanzado por el agua debido a la avenida. Por ello, en este nodo debe introducirse el nivel de coronación, a partir del cual se produce el sobrevertido.

Para realizar el cálculo de esta probabilidad se han utilizado curvas estandarizadas según el tipo de presa, basadas en bibliografía existente. Estas curvas estiman la probabilidad de fallo en función de la altura de sobrevertido. En la siguiente figura se muestran las curvas utilizadas según el tipo de presa.

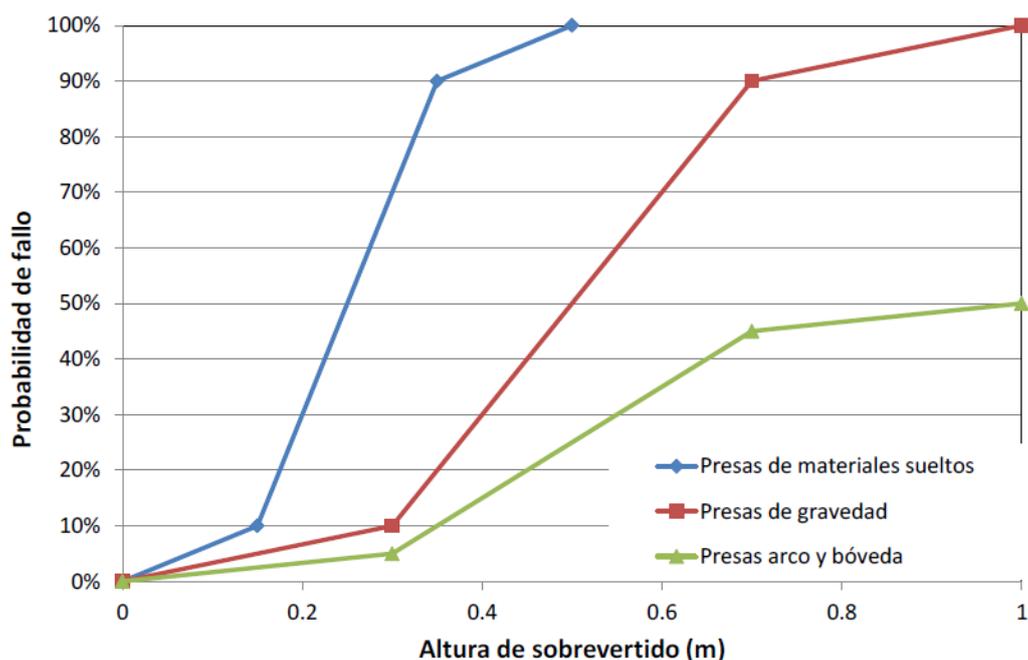


Ilustración 10 Curvas que relacionan la probabilidad de rotura con la altura de sobrevertido para cada tipo de presa. Fuente: SPANCOLD, 2012[1].

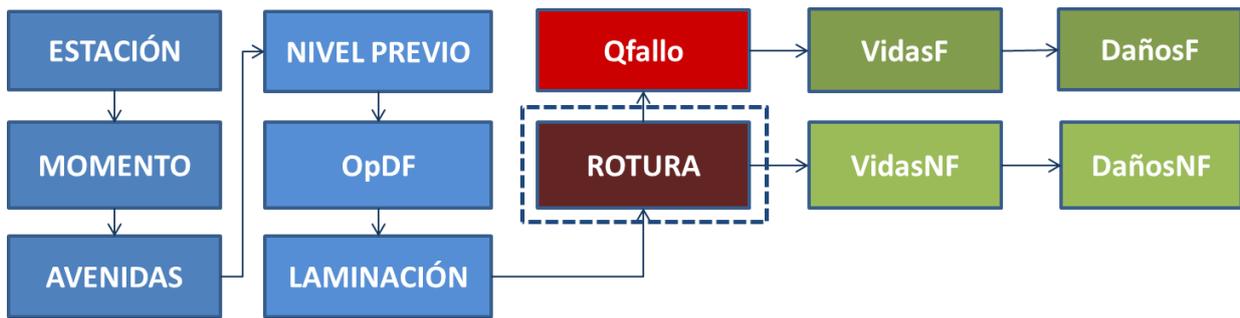


Ilustración 11 Indicación del Nodo Rotura en el Diagrama de influencia establecido para el cálculo simplificado del riesgo de inundación por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces (presa) .Fuente: Manual de: iPresas HidSimp[11]

#### ▪ **Nodo Q Fallo**

En este nodo, se estima el caudal pico del hidrograma de rotura producido cuando la presa rompe por sobrevertido a partir del nivel máximo alcanzado por el agua. Para ello se utiliza una adaptación de la fórmula de Froehlich que relaciona el nivel de agua (MaxWL) con el caudal pico (QFallo).

Para poder escalar esta curva correctamente es necesario introducir una relación “nivel en el embalse – caudal” conocida. Este par de valores puede encontrarse en algunos documentos del Archivo Técnico de la Presa, como el Plan de Emergencia, que en el escenario H2 calcula el caudal pico del hidrograma de rotura cuando el embalse se encuentra en el nivel de coronación.

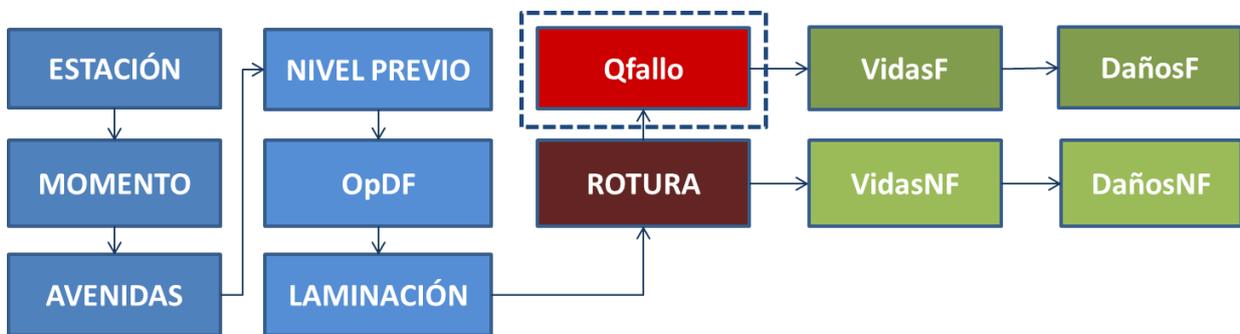


Ilustración 12 Indicación del Nodo QFallo en el Diagrama de influencia establecido para el cálculo simplificado del riesgo de inundación por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces (presa) .Fuente: Manual de: iPresas HidSimp”[11]

#### **2.2.5.3 Consecuencias.**

Estos nodos del modelo incorporan la información necesaria para calcular las consecuencias producidas por la inundación tanto en casos por rotura de la presa como por laminación de avenidas y están señalados en el esquema del modelo de riesgo en color verde.

Antes de especificar la información introducida en los nodos, se procede a explicar la metodología de obtención de consecuencias, tanto en pérdidas económicas como en pérdidas humanas.

El procedimiento para la estimación de consecuencias suele incluir la definición de los escenarios de rotura y no rotura, caracterización de la inundación, estimación de pérdida potencial de vidas y finalmente estimación de daños económicos.

Para la estimación de consecuencias, en general, la información necesaria es la que se obtiene de las características de la zona de afección. En esta zona existen afecciones de mayor relevancia que se encuentran aguas abajo de la presa. Las variables que intervienen en la estimación de consecuencias incluyen variables que caracterizan la inundación tales como el calado, velocidad... además de variables como la población situada aguas abajo de la presa, así como los usos del suelo, infraestructuras existentes y servicios.

El estudio de consecuencias se realiza para los escenarios de rotura H1 (hipótesis rotura sin avenida) y H2 (hipótesis rotura con avenida).

El primer paso del estudio de consecuencias es identificar las afecciones más relevantes de la zona de inundación para cada escenario, para seguidamente, a partir de las características de inundación (la velocidad de llegada, tiempo de llegada de la onda, tiempo de cota máxima caudal máximo y calado) estimar de forma cuantitativa las consecuencias de la inundación.

El presente trabajo ha contemplado la aplicación de dos metodologías para la estimación de pérdida de vidas potenciales y consecuencias económicas, la propuesta por el MAGRAMA (2013)[14] y el método propuesto en el proyecto SUFRI e incluido en la Guía Técnica Nº8, publicada por SPANCOLD en 2012[1] con el objeto de hacer una comparativa de los resultados obtenidos aplicando cada metodología.

Finalmente se calcularán las consecuencias económicas que generan las inundaciones. Además de los costes de inundación, se calculan los costes de reconstrucción, y los costes derivados del lucro cesante, con el objeto de estimar tanto los costes que supone la rotura de la presa como los de escenarios de no rotura.

#### ▪ **Consecuencias Sociales**

En general, la estimación de pérdida potencial de vidas se obtiene a partir de la población en riesgo y las tasas de mortalidad asociadas a la inundación, y tiene como base la consideración de factores que afectan a la estabilidad de las personas al flujo del agua.

A continuación, se procede a la descripción de los pasos seguidos para la aplicación de cada una de las metodologías empleadas.

#### **MÉTODO A: Propuesto por MAGRAMA.**

Esta metodología sienta sus bases en la desarrollada por el DEFRA (Department for Environment, Food and Rural Affairs), un organismo dependiente del gobierno británico responsable de la política y regulaciones relacionadas con el medio ambiente. Finalmente, se consultó la documentación de esta segunda fuente, y específicamente el documento “FD2321/TR1 The Flood Risks to People Methodology” al ser más completo.

El esquema que sigue esta metodología es el siguiente:

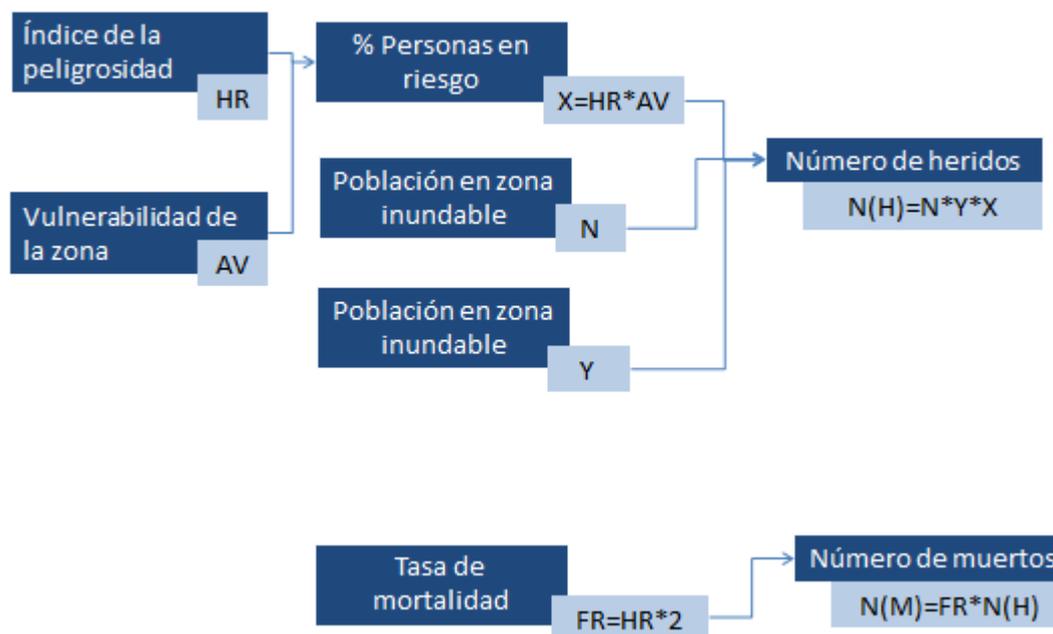


Ilustración 13 Adaptación del esquema de la metodología empleada para estimación número de heridos y muertos .Fuente: MAGRAMA (2013) [14]

Seguidamente, se detallan los pasos seguidos para la obtención de los parámetros que componen el esquema anterior.

- **HR (Índice de Peligrosidad).**

El cálculo del índice de peligrosidad tiene en cuenta el calado, la velocidad y un factor de debris.

$$HR = d(v + 0.5) + DF$$

Donde: v: Velocidad (m/s)

d: Calado: (m)

DF (Debris Flow, flujo de escombros): dependiendo de la probabilidad de que su presencia suponga una amenaza importante adicional a la propia inundación. Los valores se encuentran dentro del rango 0-1 en función del calado y del tipo de suelo de la zona afectada.

<b>Calado</b>	<b>Cultivos</b>	<b>Bosques</b>	<b>Urbano</b>
<b>0-0.25 m</b>	0	0	0
<b>0.25-0.75 m</b>	0	0.5	1
<b>d&gt;0.75 y/o v&gt;2</b>	0.5	1	1

Tabla 2 Asignación del coeficiente del flujo de escombros en función del calado y los usos del suelo. Fuente: MAGRAMA (2013)[14]

El grado de peligrosidad de la zona inundable se puede obtener a partir de la obtención del índice HR como se puede observar en la siguiente tabla:

<b>HR</b>	<b>Descripción</b>	<b>Tipo de Peligrosidad</b>
<b>0</b>	Seguridad	Ninguno
<b>0-0.75</b>	Precaución	Bajo
<b>0.75-1.5</b>	Peligroso para algunos (niños)	Moderado
<b>1.5-2.5</b>	Peligroso para la mayoría de la gente	Significativo
<b>&gt;2.5</b>	Peligroso para todos	Extremo

Tabla 3 Valor de HR con la descripción correspondiente y el tipo de peligrosidad. Fuente: MAGRAMA (2013)[14]

- **AV (Área vulnerable).**

La metodología propone el cálculo de este factor a través de la suma de tres parámetros que dependen de la Alerta de inundación, Velocidad de inicio del episodio y las Características de la zona. Según las características de estos tres parámetros se obtendrá un nivel de vulnerabilidad del área.

A continuación, se muestra la tabla empleada para la estimación de este índice

<b>Parámetro</b>	<b>1.- Área de riesgo bajo</b>	<b>2.- Área de riesgo medio</b>	<b>3.- Área de riesgo alto</b>
<i>Alerta de inundaciones</i>	<i>Probada con éxito y planes de emergencia aviso de inundaciones comprobados</i>	<i>Sistema de aviso presente pero limitado</i>	<i>Sin sistema de aviso de inundaciones</i>
<i>Velocidad de inicio del episodio (Tc)</i>	<i>Velocidad de aparición muy gradual (varias h)</i>	<i>Velocidad de inundación gradual (alrededor 1 h)</i>	<i>Inundación rápida</i>
<i>Características de la zona</i>	<i>Edificios de varios pisos</i>	<i>Típica área residencial (casas de dos pisos), zonas comerciales e industriales</i>	<i>Bungalós, caravanas, carreteras muy transitadas, parques, escuelas de un solo piso campings, etc.</i>

Tabla 4 Cálculo del valor del área vulnerable. Fuente: MAGRAMA (2013)[14]

La metodología del MAGRAMA propone una adaptación del cálculo del valor del área vulnerable propuesto por el DEFRA a las condiciones españolas, esta adaptación depende de la Alerta de inundación, Tiempo de Concentración de la cuenca vertiente (Tc) y las Características de la zona.

<b>Parámetro</b>	<b>1.- Área riesgo bajo</b>	<b>2.- Área riesgo medio</b>	<b>3.- Área riesgo alto</b>
<i>Alerta de inundaciones</i>	<i>Existencia de SAIH/SAD/ Preaviso</i>	<i>Sistema de aviso presente pero limitado</i>	<i>Sin sistema de preaviso meteorológico ni SAIH</i>
<i>Tiempo de Concentración de la cuenca vertiente(Tc)</i>	<i>Tc &gt; 6h</i>	<i>2h ≤ Tc ≤ 6h</i>	<i>T ≤ 2h</i>
<i>Características de la zona</i>	<i>Edificios de varios pisos</i>	<i>Área residencial (casas de dos pisos), comerciales e industriales</i>	<i>Bungalós, caravanas carreteras muy transitadas, parques, escuelas de un solo piso, campings, etc.</i>

Tabla 5 Adaptación del cálculo del valor del área vulnerable de la DEFRA a las condiciones españolas. Fuente: MAGRAMA (2013) [14]

#### - **Porcentaje de población en riesgo**

A partir del índice de peligrosidad y el área vulnerable se obtiene el porcentaje de la población en riesgo.

$$\% \text{ Población en riesgo} = HR \cdot AV$$

- ***N (Población en zona inundable).***

En este estudio se ha estimado una población residente igual a 2 personas por vivienda en periodo invernal y 4 en periodo estival. Se considera periodo estival el comprendido de junio a septiembre (4 meses del año) y periodo invernal el resto del año (8 meses del año). A las infraestructuras no se les asigna población y a aquellas zonas como campings, merenderos...se les asigna la ocupación para las que fueron proyectadas en función de su capacidad

- ***Y (Población vulnerable).***

Es el resultado de la suma de los porcentajes de población mayor de 75 años y del sector de población con algún tipo de discapacidad o enfermedad que los haga más vulnerables frente a una posible inundación.

- ***N (H) (Cálculo del número de heridos)***

El número de heridos depende de la población en la zona inundable, el índice de peligrosidad, el área de vulnerabilidad y la vulnerabilidad de la población.

$$N(H) = N * Y * X$$

- ***N (M) (Cálculo de la tasa de mortalidad y el número de muertos).***

La tasa de mortalidad se calcula a partir del Índice de Peligrosidad, y el número de muertos a partir de la tasa de mortalidad y el número de heridos.

$$N(M) = N(H) \cdot FR$$

$$FR = 2 \cdot HR$$

**MÉTODO B: Aplicando el método SUFRI incluido en la Guía Técnica N°8 de SPANCOLD.**

El proyecto europeo SUFRI (Sustainable Strategies of Urban Flood Risk Management with non-structural measures to cope with the residual risk), permite caracterizar el riesgo y estudiar la importancia de la implantación de medidas no estructurales que ayudan a reducir el mismo [10]

Esta metodología describe cómo obtener los valores de probabilidad asociados a los eventos de inundación considerados y las consecuencias potenciales. Además, permite comparar diferentes escenarios de estudio para una misma población y evaluar la efectividad de medidas de reducción del riesgo, caracterizándolo de forma completa y cuantitativa.

A continuación, se definen los parámetros que determinan el número de pérdidas de vidas potencial para esta metodología

- ***Población en riesgo.***

Se define como población en riesgo aquella que se encuentra en el área inundada cuando se produce el fallo de la presa, análogamente al caso anterior. DV (Severidad de la inundación).

Se define como Severidad de la inundación el grado de destrucción de las edificaciones y el peligro que supone para las personas. El método propuesta por Graham en 1998 [3] clasifica la severidad en tres categorías:

- Severidad Baja. En casos en los que no se prevean daños estructurales en edificios ni en cimentación.
- Severidad Media. En casos en los que pueden producirse importantes daños estructurales, pero no se espera una destrucción total del área.
- Severidad Alta. Zonas devastadas por la inundación en los instantes posteriores al fallo de una infraestructura de defensa, o áreas que resultan totalmente destruidas por la inundación.

La severidad se asocia a las características de la inundación, y se expresa con la siguiente ecuación:

$$DV = \frac{Q_f - Q_{2.33}}{W_{df}}$$

Donde:  $Q_f$ : caudal máximo alcanzado por la avenida en el lugar de estudio

$Q_{2.33}$ : caudal medio anual en el río

$W_{df}$ : el ancho alcanzado por la inundación

La severidad en función del resultado se clasifica como:

Alta: Destrucción total aguas abajo de la presa.

Media:  $DV > 4.6 \text{ m}^2/\text{s}$

Baja:  $DV < 4.6 \text{ m}^2/\text{s}$

- **Tiempo de aviso.**

El tiempo de aviso es el tiempo transcurrido entre que se produce el primer aviso a la población y el tiempo que tarda en alcanzar la afección. También se define como el tiempo del que la población dispone para poder refugiarse o ser evacuados.

El tiempo de aviso se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$WT = Tv + TB - FMF - FPE$$

Donde:  $Tv$  = tiempo de llegada de la onda (h).

FMF: Factor Modo Fallo (h). Factor que incorpora el tipo de fallo.

TB: Tiempo de formación de la brecha (h)..

FPE: Existencia de Plan de Emergencia de la Presa (factor FPE).

A continuación se muestran los valores a considerar para el cálculo del tiempo de aviso:

- Factor de modo de fallo (horas).
-

<b>FMF (h)</b>	
<b>Día</b>	<b>Noche</b>
<b>0.00</b>	<b>0.25</b>

Tabla 6: Factor de modo de fallo (horas). Fuente: Escuder Bueno, I et al, (2013). [8]

- Factor de Plan de Emergencia (horas).

<b>FPE (h)</b>	
<b>No existe plan</b>	<b>Plan implantado</b>
<b>0.5</b>	<b>0.25</b>

Tabla 7 - Factor de Plan de Emergencia (horas). Fuente: Escuder Bueno, I et al, (2013). [8]

En los casos en los que el tiempo de aviso tiene como resultado un valor negativo se toma como tiempo de aviso  $TA=0$  h.

- **FR (Tasa de mortalidad)**

La estimación de la tasa de mortalidad depende de una serie de tasas de mortalidad de referencia. El método SUFRI propone una clasificación de diez categorías para la población de estudio, atendiendo a la existencia de sistema de alerta, coordinación entre servicios de emergencia y autoridades locales, formación de la población, etc. Estas categorías están relacionadas con la severidad de la inundación y el tiempo de aviso existente, como resultado de los estudios realizados por Graham en 1999 y diversas fuentes existentes en la literatura.

En este trabajo se han considerado las categorías C3, C4 y C10. Estas categorías están relacionadas con los escenarios que se han planteado en el apartado 2.2.3:

- Para el Caso Base, se utiliza la Categoría 3, para el cálculo de pérdida de vidas potencial dado que corresponde con la situación actual de los casos de estudio.
- La Categoría 4 se aplicará a los tres escenarios (ECC, ECSE, CB) al considerar implantación de un Plan de Emergencia de Presa.
- La Categoría 10 también se aplicará a los tres escenarios definidos al implantar una mejora al PEP, en este estudio se introduce un Plan de Formación Continua (PFC).

A continuación, se detallan las Categorías que aparecen en la metodología SUFRISPANCOLD (2012): Análisis de Riesgos aplicado a la Seguridad de Presas y Embalses. Guía Técnica de Explotación de Presas y Embalses, N.8, Vol. I.:

### **Categoría 3**

- No existe formación a la población.
- Existe PEP, pero no se ha implantado.
- Existe coordinación entre servicios de emergencia y autoridades (no existen protocolos).
- No existen medios de comunicación a la población.

### **Categoría 4**

- No existe formación a la población.

- PEP implantado con sistemas de aviso correspondientes.
- Existe coordinación entre servicios de emergencia y autoridades, protocolos de comunicación.
- No existen medios de comunicación a la población.

### **Categoría 10**

- Planes de formación continua a la población.
- PEP implantado. Simulacros o PEP empleado previos.
- Alta coordinación entre servicios de emergencia y autoridades.
- Medios de comunicación a la población implantados.

<b>Categoría</b>	<b>TA (h)</b>	<b>Severidad</b>		
		<b>Alta</b>	<b>Media</b>	<b>Baja</b>
<b>C.3</b>	0	0.9	0.3	0.02
	0.25	0.85	0.2	0.015
	0.625	0.6	0.07	0.012
	1	0	0.05	0.0005
	1.5	0	0.0002	0.0002
	24	0	0.0002	0.0001
	<b>C.4</b>	0	0.9	0.3
0.25		0.75	0.15	0.01
0.625		0.5	0.04	0.007
1		0	0.03	0.0003
1.5		0	0.0002	0.0002
24		0	0.0002	0.0001
<b>C.5</b>		0	0.9	0.3
	0.25	0.5	0.03	0.005
	0.625	0.3	0.005	0.001
	1	0	0.002	0.0001
	1.5	0	0.0002	0.0001
	24	0	0.0002	0.0001

Tabla 8 Adaptación Tabla de Tasa mortalidad para las categorías 3,4 y 10 .Fuente: MAGRAMA (2013) [14]

▪ **Nodo Vidas F**

En este nodo se introducen los resultados de la estimación de consecuencias, incluyendo diferentes relaciones entre la pérdida de vidas potencial y el caudal pico de rotura.

Esta relación “caudal-consecuencias” se ha obtenido con los procedimientos detallados anteriormente. Este nodo permite incorporar los resultados de diferentes escenarios de inundación.

Los resultados de la estimación de consecuencias se introducen en el modelo de riesgo en formato tabla. .

A modo de ejemplo, a continuación, se muestra la tabla para el nodo VidasF asociada al caso base de la presa 2.

<i>Estación</i>	<i>Momento</i>	<i>QFallo</i>	<i>Pérdida de VidasF</i>
<i>Verano</i>	<i>Día</i>	<i>33.00</i>	<i>0.00</i>
<i>Verano</i>	<i>Día</i>	<i>997.20</i>	<i>36.41</i>
<i>Verano</i>	<i>Día</i>	<i>1931.49</i>	<i>41.64</i>
<i>Verano</i>	<i>Noche</i>	<i>33.00</i>	<i>0.00</i>
<i>Verano</i>	<i>Noche</i>	<i>997.20</i>	<i>0.17</i>
<i>Verano</i>	<i>Noche</i>	<i>1931.49</i>	<i>2.45</i>
<i>Invierno</i>	<i>Día</i>	<i>33.00</i>	<i>0.00</i>
<i>Invierno</i>	<i>Día</i>	<i>997.20</i>	<i>18.20</i>
<i>Invierno</i>	<i>Día</i>	<i>1931.49</i>	<i>20.82</i>
<i>Invierno</i>	<i>Noche</i>	<i>33.00</i>	<i>0.00</i>
<i>Invierno</i>	<i>Noche</i>	<i>997.20</i>	<i>0.09</i>
<i>Invierno</i>	<i>Noche</i>	<i>1931.49</i>	<i>1.22</i>

Tabla 9: Tabla introducida en el nodo Vidas F en el modelo de riesgo. Fuente: Elaboración propia

En la primera fila de esta hoja debe incluirse el nombre de las variables de entrada y salida y deben coincidir con los nombres mostrados en la figura anterior. Las columnas que debe tener esta hoja de cálculo son:

- Estación: Indica los valores que puede tomar la variable Estación (Verano y Invierno) para definir las consecuencias asociadas a cada categoría de tiempo.
- Momento: Indica los valores que puede tomar la variable Moment (Día y Noche) para definir las consecuencias asociadas a cada categoría de tiempo.

- QRotura: Indica los valores de caudal pico de rotura para los que se ha obtenido la pérdida de vidas por inundación.
- Pérdida de VidasRotura: Indica la pérdida potencial de vidas asociada a los diferentes caudales QRotura.

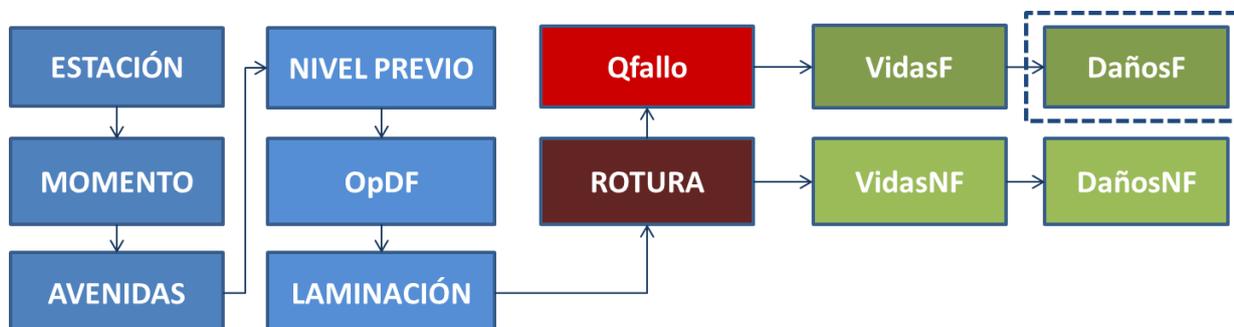


Ilustración 14 Indicación del Nodo Vidas Fallo en el Diagrama de influencia empleado. Fuente: Manual de: iPresas HidSimp[11]

#### ▪ **Nodo Vidas NF**

En el nodo VidasNF se definen los datos de entrada de consecuencias de inundación asociadas a casos de no rotura, es decir, aquellas inundaciones que puedan derivarse de los caudales laminados por la presa (QNo\_F).

A modo de ejemplo, a continuación se muestra la tabla para el nodo VidasNF asociada al caso base de la presa 2.

<i>Estación</i>	<i>Momento</i>	<i>QNoFallo</i>	<i>Pérdida de VidasNF</i>
<i>Verano</i>	<i>Día</i>	<i>33.00</i>	<i>0.00</i>
<i>Verano</i>	<i>Día</i>	<i>997.20</i>	<i>36.41</i>
<i>Verano</i>	<i>Día</i>	<i>1931.49</i>	<i>41.64</i>
<i>Verano</i>	<i>Noche</i>	<i>33.00</i>	<i>0.00</i>
<i>Verano</i>	<i>Noche</i>	<i>997.20</i>	<i>0.17</i>
<i>Verano</i>	<i>Noche</i>	<i>1931.49</i>	<i>2.45</i>
<i>Invierno</i>	<i>Día</i>	<i>33.00</i>	<i>0.00</i>
<i>Invierno</i>	<i>Día</i>	<i>997.20</i>	<i>18.20</i>
<i>Invierno</i>	<i>Día</i>	<i>1931.49</i>	<i>20.82</i>
<i>Invierno</i>	<i>Noche</i>	<i>33.00</i>	<i>0.00</i>
<i>Invierno</i>	<i>Noche</i>	<i>997.20</i>	<i>0.09</i>
<i>Invierno</i>	<i>Noche</i>	<i>1931.49</i>	<i>1.22</i>

Tabla 10 Tabla introducida en el nodo Vidas NF en el modelo de riesgo. Fuente: Elaboración propia

La estructura de los cuadros de nodo y las variables intervinientes son análogas al nodo VidasF a excepción de que en este caso la variable de entrada es el caudal laminado (QNo\_Fallo) en lugar del caudal pico en caso de rotura (QFallo).

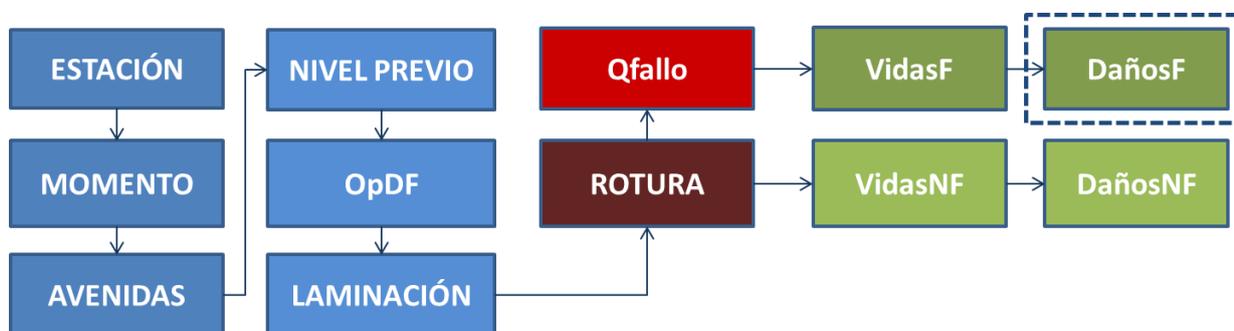


Ilustración 15 Indicación del Nodo Vidas No Fallo en el Diagrama de influencia establecido para el cálculo simplificado del riesgo de inundación por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces (presa). Fuente: Manual de: iPresas HidSimp[11]

#### ▪ Consecuencias Económicas

En este apartado se procede al cálculo de las consecuencias económicas producidas por riesgo de inundación para los diferentes escenarios antes mencionados. Se obtendrán las consecuencias económicas en caso de rotura y las consecuencias económicas en caso de no rotura.

Las consecuencias económicas en caso de rotura serán la suma de Costes de reconstrucción, Coste por lucro cesante cesante y Coste de inundación.

#### - Costes de Inundación

La metodología para la estimación de Costes de inundación que se sigue es la planteada por el MAGRAMA (2013)[14]. Esta metodología parte de una curva de daños definida a partir de la altura del agua que llega a cada afección, asignando un porcentaje de daños a los costes de referencia del uso del suelo.

<b>Altura del agua [m]</b>	<b>Coficiente</b>
0-3	20%
0.3-0.7	60%
0.7-2	90%
>2	100%

Tabla 11 Coeficientes asignados en función del tramo de altura establecido. Fuente: MAGRAMA (2013)[14]

En el estudio de consecuencias económicas realizado en el presente trabajo se ha considerado la curva calado-daños que se muestra en la figura siguiente.

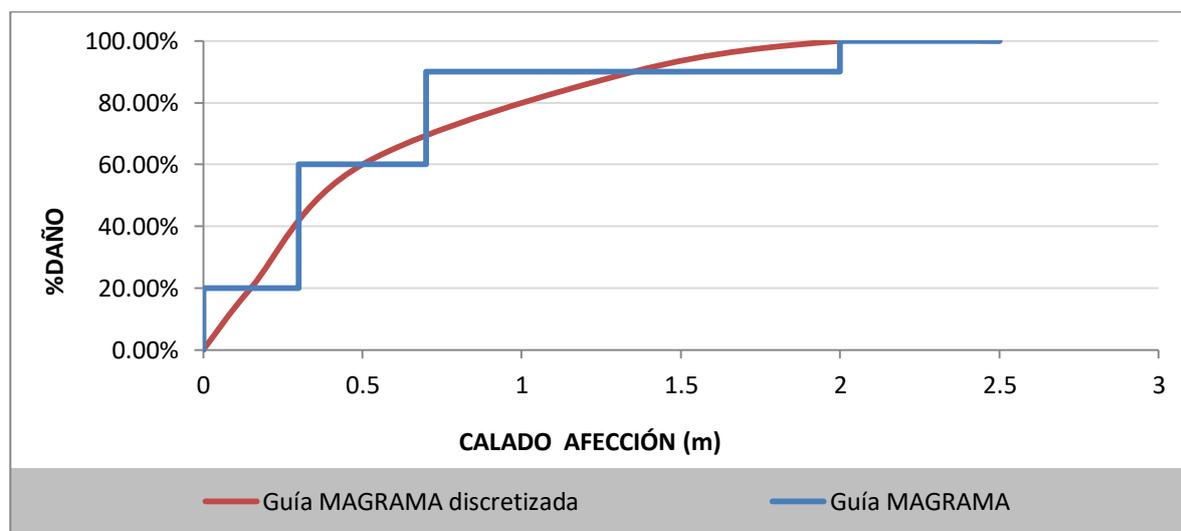


Ilustración 16 Coeficientes asignados en función del tramo de altura establecido.

Una vez conocido el porcentaje de daños en función del calado de inundación, se procede a la obtención del valor del coste económico de la inundación. Para ello, la metodología propuesta por el MAGRAMA (2013)[14] se describe la estimación de los costes directos y a partir de estos el cálculo de los costes indirectos.

### **Costes directos.**

Los costes directos se calculan a partir del área inundada, el porcentaje de daños para cada afección y el coste económico de referencia en caso de destrucción total de la afección. El MAGRAMA (2013) [14] Propuesta de Mínimos para la metodología de realización de los Mapas de Riesgo de Inundación calibra en €/m<sup>2</sup> los precios unitarios en función del uso del suelo que predomine en la afección estudiada (Urbano concentrado, Urbano disperso, Agrícola, Terciario, Industrial, Infraestructuras, etc.)

$$CD = CR * Af * PD$$

Donde: CR: Valor referencia (€/m<sup>2</sup>)

A<sub>f</sub>: Área inundada (m<sup>2</sup>)

PD: Porcentaje Daños (%)

El Área Inundada total se calcula a partir del área de cada afección que queda inundada.

El Coste del riesgo económico en función del uso del suelo se obtiene de la tabla *Tabla 1.- Valor del riesgo (€/m<sup>2</sup>) por uso del suelo del MAGRAMA (2013)[14]*

El porcentaje de daño se estima a partir del calado máximo de la inundación para ese escenario, en este estudio se ha obtenido de la Tabla 11.

### **Costes indirectos**

Los costes indirectos se han calculado como un 15% de los costes directos.

### **Costes de reconstrucción**

El coste de reconstrucción de la presa se ha obtenido aplicándole el incremento del IPC (Índice de Precios de Consumo) para el periodo comprendido entre el año de construcción de la presa y el presente, al coste que supuso en su momento la construcción de ésta.

### **Coste por lucro cesante.**

Para obtener el coste del lucro cesante por vaciado del embalse se ha recurrido al Instituto Nacional de Estadística para obtener referencias del consumo medio de agua por litro/habitante/día. En la zona de estudio el consumo medio de agua es de 130 litros/habitante/día. Por tanto, obteniendo el número de habitantes de las poblaciones a las que abastece cada presa se obtiene el caudal medio de abastecimiento.

El coste total unitario de recurso alternativo que se supone en este estudio es de 0.615 €/m<sup>3</sup>

Con estos datos se obtiene el coste por vaciado durante 4 años, que es lo que se ha supuesto en este estudio hasta la reconstrucción de la presa.

Una vez calculados todos los datos asociados a las consecuencias, se procede a la introducción de ellos en los nodos de consecuencias:

#### ▪ **Nodo Daños F**

En este nodo, se estiman las consecuencias económicas de rotura de la presa a partir del caudal de rotura calculado en el nodo anterior.

Tras haber calculado la relación existente entre el caudal pico de rotura y las consecuencias económicas los resultados se integran en el modelo de riesgo.

A modo de ejemplo, a continuación se muestra la tabla para el nodo DañosF asociada al caso base de la presa 2.

<b><i>QFallo</i></b>	<b><i>DañosF(M€)</i></b>
<i>33.00</i>	<i>5060832</i>
<i>997.20</i>	<i>5945990</i>
<i>1931.49</i>	<i>6184664</i>

*Tabla 12 Tabla introducida en el nodo Daños F en el modelo de riesgo.*

En la primera fila de esta hoja debe estar el nombre de las variables de entrada y salida y debe coincidir con los nombres introducidos en los diferentes nodos del modelo de riesgo. Las columnas que debe tener esta hoja de cálculo son:

- QFallo: Indica los valores de caudal pico de rotura.
- DañosF: Indica las consecuencias económicas asociadas a los diferentes caudales picos de rotura.

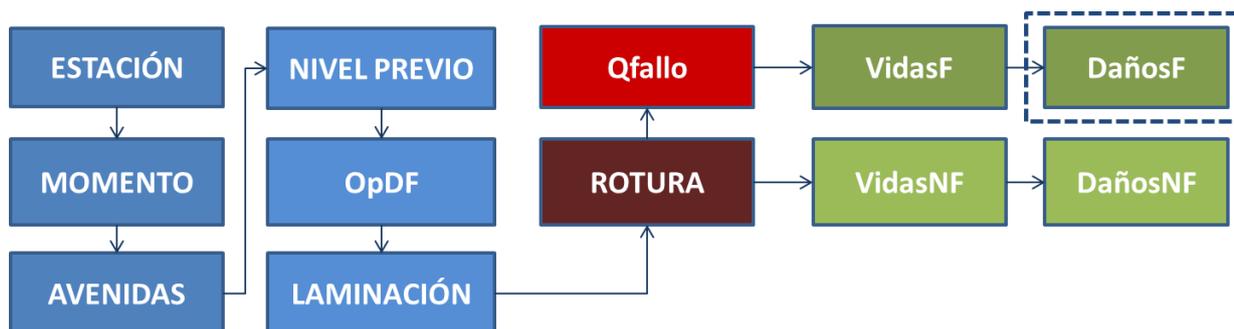


Ilustración 17 Indicación del Nodo Daños Fallo en el Diagrama de influencia establecido para el cálculo simplificado del riesgo de inundación por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces (presa) .Fuente: Manual de: iPresas HidSimp[11]

▪ **Nodo Daños NF**

En el nodo DañosNF se definen los datos de entrada de consecuencias de inundación asociadas a casos de no rotura, es decir, aquellas inundaciones que puedan derivarse de los caudales laminados por la presa (QNo\_Fallo).

<b>QNo_Fallo</b>	<b>DañosNF(M€)</b>
33.00	0
997.20	885157
1931.49	1123831

Tabla 13 Tabla introducida en el nodo Vidas NF en el modelo de riesgo.

La estructura de los cuadros de nodo y las variables intervinientes son análogas al nodo DañosF a excepción de que en este caso la variable de entrada es el caudal laminado (QNo\_Fallo) en lugar del caudal pico en rotura (QFallo).

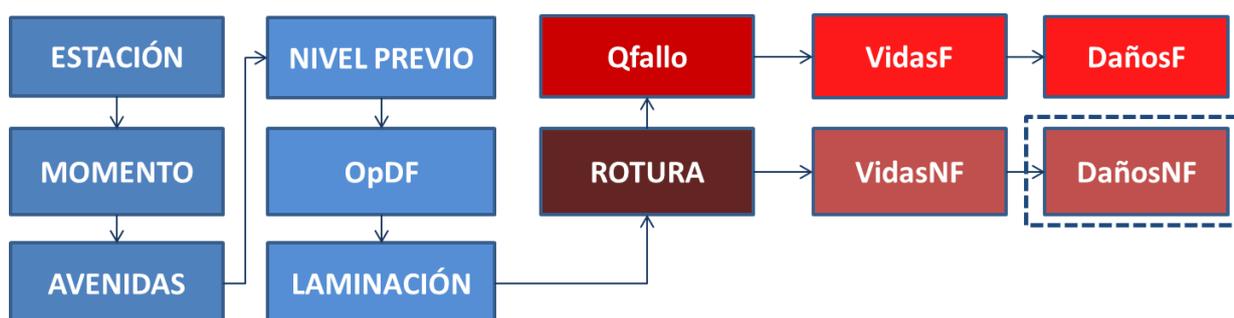


Ilustración 18 Indicación del Nodo Daños Fallo en el Diagrama de influencia establecido para el cálculo simplificado del riesgo de inundación por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces (presa) .Fuente: Manual de: iPresas HidSimp[11]

## 2.2.6 Cálculo del riesgo

Una vez se tienen todas las entradas al modelo de riesgo, se debe llevar a cabo el cálculo del riesgo.

El riesgo se define como la combinación de la probabilidad de que se presenten unas determinadas cargas, la probabilidad de que se produzca un determinado evento de inundación dadas estas cargas y las consecuencias de la inundación. Es por ello, que el cálculo del riesgo consta de tres partes:

- **Análisis de solicitaciones:**

Define la probabilidad de que se presenten unas cargas sobre la infraestructura de defensa. Dichas cargas pueden ser desde un determinado evento de precipitación, una avenida (que produce un determinado nivel de agua en el embalse) hasta un sismo.

- **Análisis de la respuesta del sistema:**

Define la probabilidad condicionada de que el sistema de protección falle (en el caso de estudio: una presa) dadas las cargas mencionadas en el punto anterior (subida del nivel de agua del embalse). En este trabajo se considera un único modo de fallo para el análisis del riesgo de inundación por rotura de presa (modo de fallo por sobrevertido: El sobrevertido en sí mismo no es un modo de fallo. El fallo por sobrevertido incluye de forma simplificada todos los posibles modos de fallo que se pueden dar por este motivo.)

- **Análisis de las consecuencias:**

A partir de la estimación de consecuencias por inundación se incorporan al modelo los resultados de estimación de las consecuencias económicas y en pérdida de vidas asociadas a la respuesta del sistema dadas las cargas definidas en el modelo.

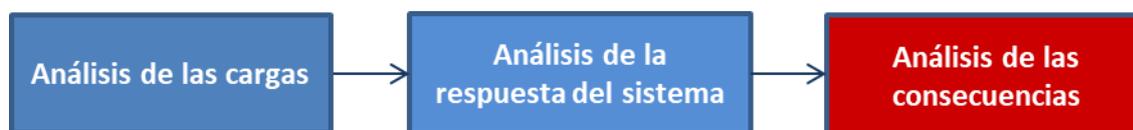


Ilustración 19 Esquema del proceso de cálculo de riesgo. Fuente: Manual de: iPresas HidSimp[11]

De esta forma, basándonos en el esquema descrito en la Ilustración 3 Diagrama de influencia empleado. Fuente: Adaptado de iPresas HidSimp[11], se describe el proceso seguido en este trabajo para el cálculo del riesgo:

En primer lugar, se ha realizado un cálculo para la situación actual (Caso Base). Con este cálculo se procede a realizar la evaluación de riesgo de dicha situación actual.

A continuación, se modifica el modelo de riesgo para reflejar el impacto de las distintas medidas de reducción de riesgo que se van a evaluar y se vuelve a realizar el cálculo para cada una de ellas. La diferencia entre la situación con medida y la situación del caso base reflejará el impacto en riesgo de cada medida.

En cuanto al cálculo en sí, el procedimiento es en principio conceptualmente sencillo. La probabilidad de cada rama del árbol de eventos se obtiene como la multiplicación de todas las probabilidades condicionales de las subramas que la forman. El riesgo de cada rama es la multiplicación de su probabilidad por el valor de la variable que represente las consecuencias. La probabilidad de fallo y el riesgo total se pueden obtener sumando los resultados de todas las ramas.

Los resultados obtenidos del modelo incluyen la probabilidad anual de fallo, así como el riesgo social y económico en términos incrementales y totales. En la siguiente tabla se muestra un ejemplo de estos resultados para el modelo de riesgo con la presa 2.

<i><b>Resultado del Riesgo</b></i>	<i><b>Resultado del Riesgo</b></i>
<i>Riesgo Económico Total [€/año]</i>	<i>7.30E-02</i>
<i>Riesgo Social Total [Vidas/año]</i>	<i>1.49E+00</i>
<i>Probabilidad de Fallo [1/año]</i>	<i>1.51E-06</i>
<i>Riesgo Económico de Fallo [€/año]</i>	<i>2.62E-05</i>
<i>Riesgo Social de Fallo [Vidas/año]</i>	<i>4.49E-04</i>
<i>Riesgo Económico de No Fallo [Vidas/año]</i>	<i>7.30E-02</i>
<i>Riesgo Social de No Fallo [Vidas/año]</i>	<i>1.49E+00</i>
<i>Riesgo Económico Incremental [€/año]</i>	<i>2.27E-05</i>
<i>Riesgo Social Incremental [Vidas/año]</i>	<i>3.76E-04</i>

*Tabla 14 Tabla de Resultados de probabilidad y riesgo obtenidos mediante el modelo de riesgo con presa 2. Fuente: Elaboración propia*

Los resultados obtenidos son:

- Riesgo económico total:

Este riesgo es el riesgo económico asociado a la inundación aguas abajo, que resulta de la multiplicación de la probabilidad de inundación por las consecuencias económicas que produce. Este riesgo se expresa en unidades monetarias/año, siendo estas unidades monetarias las introducidas en los nodos de consecuencias económicas. Además, también se obtiene el riesgo económico producido por los casos de rotura, de no rotura y el riesgo incremental al restar las consecuencias de rotura y de no rotura en cada rama.

- Riesgo social total:

Este riesgo es el riesgo de pérdida de vidas por inundación aguas abajo, que resulta de la multiplicación de la probabilidad de inundación por la pérdida de vidas que esta inundación produce. Tiene unidades de vidas/año. Además, también se obtiene el riesgo social producido por los casos de rotura, de no rotura y el riesgo incremental al restar las consecuencias de rotura y de no rotura en cada rama.

Estos resultados tienen unidades anualizadas y pueden utilizarse para calcular varios indicadores (por ejemplo, ACSLS o ratios beneficio/coste) de las medidas propuestas para reducir el riesgo de inundación.

- Probabilidad anual de fallo:

En seguridad de presas, el riesgo individual suele asociarse al valor de la probabilidad anual de fallo de la presa (equivalente a asociar a una tasa de mortalidad del 100% dada la inundación resultante de la rotura de la presa y sin posibilidad de evacuación).

### 2.2.7 Representación del Riesgo

La representación del riesgo en este trabajo se realiza con herramientas completas y cuantitativas mediante la representación de tres tipos de gráficos: Curva FN, curva FD y gráfico fN.

- **Curvas F-N:**

Estas curvas representan la relación entre la pérdida de vidas y la probabilidad anual de excedencia de dicho número de pérdida de vidas. El área total situada bajo esta curva es el riesgo social obtenido.

- **Curvas F-D:**

- **Las curvas F-D representan la relación entre las consecuencias económicas y la probabilidad anual de excedencia de las mismas. Gráfico f-N:**

Los gráficos f-N permiten representar la probabilidad anual de fallo frente a las consecuencias promedio, ratio obtenido a partir de la división del riesgo y la probabilidad de fallo de la presa. Cuando se representan consecuencias económicas se denominan fD.

La representación de curvas F-N y F-D, así como gráficos fN o FD, permite analizar el riesgo social y económico de forma sencilla y completa, siendo de gran utilidad para la evaluación del riesgo existente y el análisis de alternativas. Estas curvas permiten la comparación de la situación actual con criterios de tolerabilidad.

### 2.2.8 Evaluación del riesgo

En este punto, los resultados de riesgo obtenidos son comparados con estándares internacionales de tolerabilidad de riesgo. Esta fase es el proceso por el cual se evalúa la importancia del riesgo existente derivado de la rotura de la presa y la justificación de plantear medidas que reduzcan el mismo.

En general, la evaluación del riesgo se basa en los siguientes conceptos:

- **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. En general, estas recomendaciones se aplican a los resultados de riesgo incremental.

Aunque existen más recomendaciones, se van a mencionar aquí las más empleadas actualmente, que son las propuestas por:

- USBR (United States Bureau of Reclamation)
- ANCOLD (Australian Committee on Large Dams)
- USACE (United States Corps of Engineers)

- **USBR (Bureau of Reclamation, Estados Unidos)**

El USBR es un organismo que ya cuenta con una larga trayectoria aplicando la metodología de Análisis de Riesgo. Ya en 2003 contaba con un documento con recomendaciones para evaluar la tolerabilidad del riesgo en sus presas. En el año 2011, estas recomendaciones se actualizaron y se comentan a continuación.

Básicamente, el USBR establece sus recomendaciones de tolerabilidad en base a:

- La probabilidad anual de rotura (que a efectos prácticos se considera equivalente al riesgo individual).
- Valor esperado de pérdida de vidas humanas (riesgo anual).

Sus recomendaciones se pueden resumir en un gráfico f-N, tal y como se muestra a continuación.

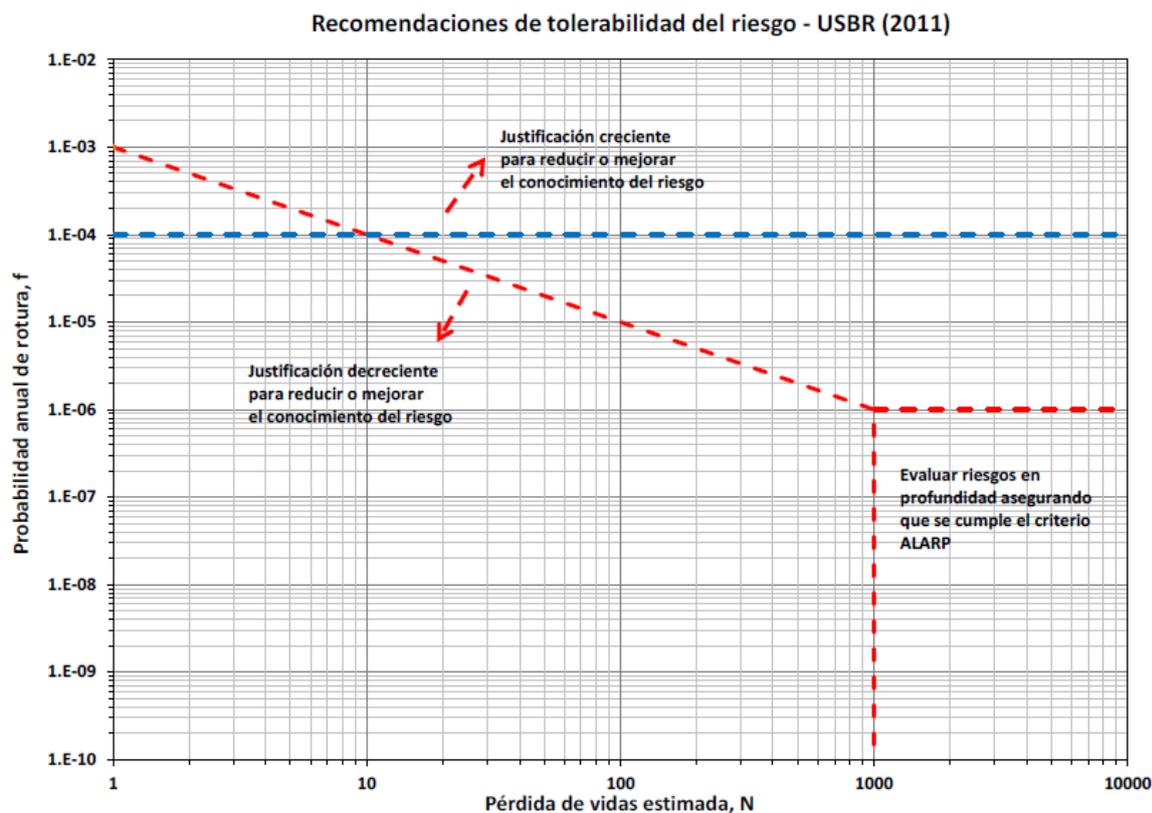


Ilustración 20 Recomendaciones de tolerabilidad de riesgo propuestas por el USBR en el año 2011. Fuente: Morales, Adrián, 2012[5]

#### ▪ Comité Australiano de Grandes Presas (ANCOLD)

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 las 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 restrictivas que para presas ya construidas.

Este tipo de recomendaciones de tolerabilidad se representan 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 Ilustración 20 se muestran las recomendaciones de tolerabilidad propuestas por este organismo en un gráfico FN.

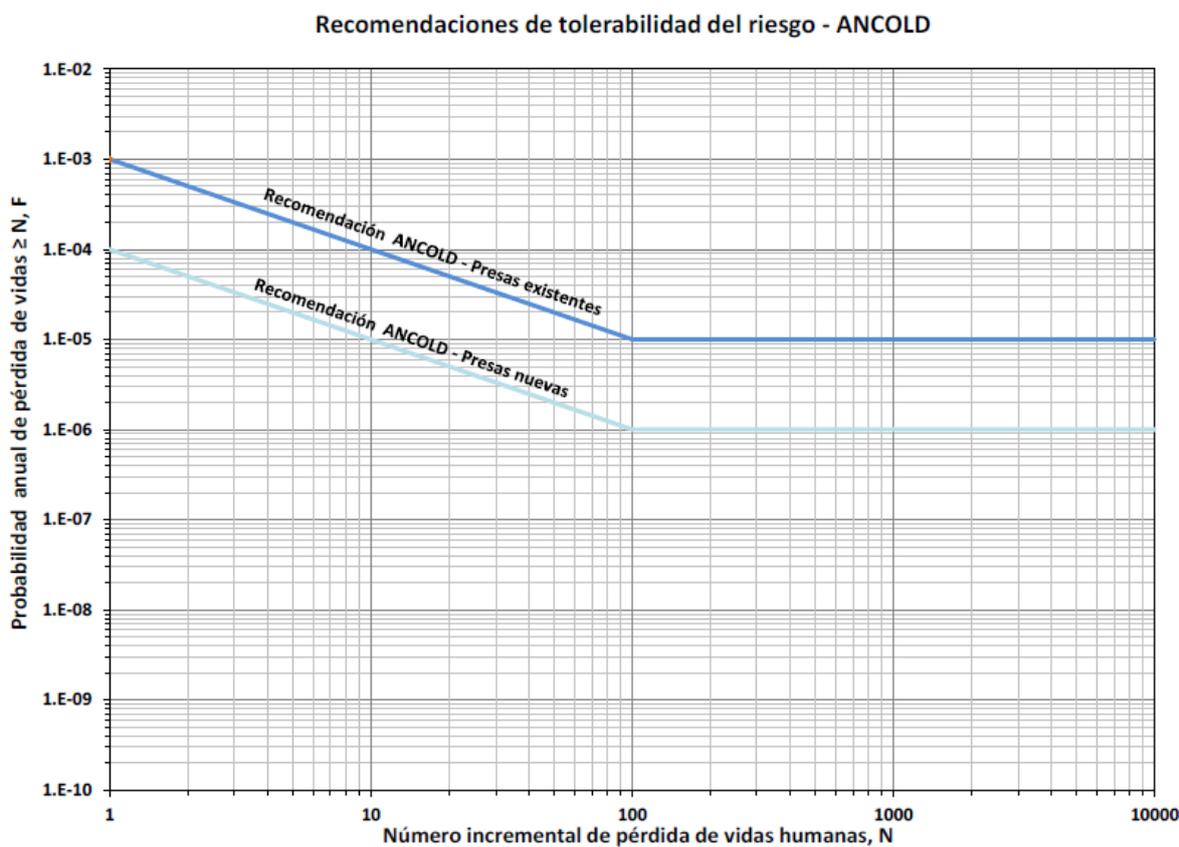


Ilustración 21 Recomendaciones de tolerabilidad de riesgo propuestas por el ANCOLD. Fuente: Morales, Adrián, 2012[5]

▪ **Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE):**

El Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos propone una recomendación de tolerabilidad de riesgo basada en los criterios del USBR y el ANCOLD aportando una limitación adicional a las máximas consecuencias tolerables. Esta limitación se muestra en el gráfico FN de la Ilustración 21.

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 *Gráfica 4*.

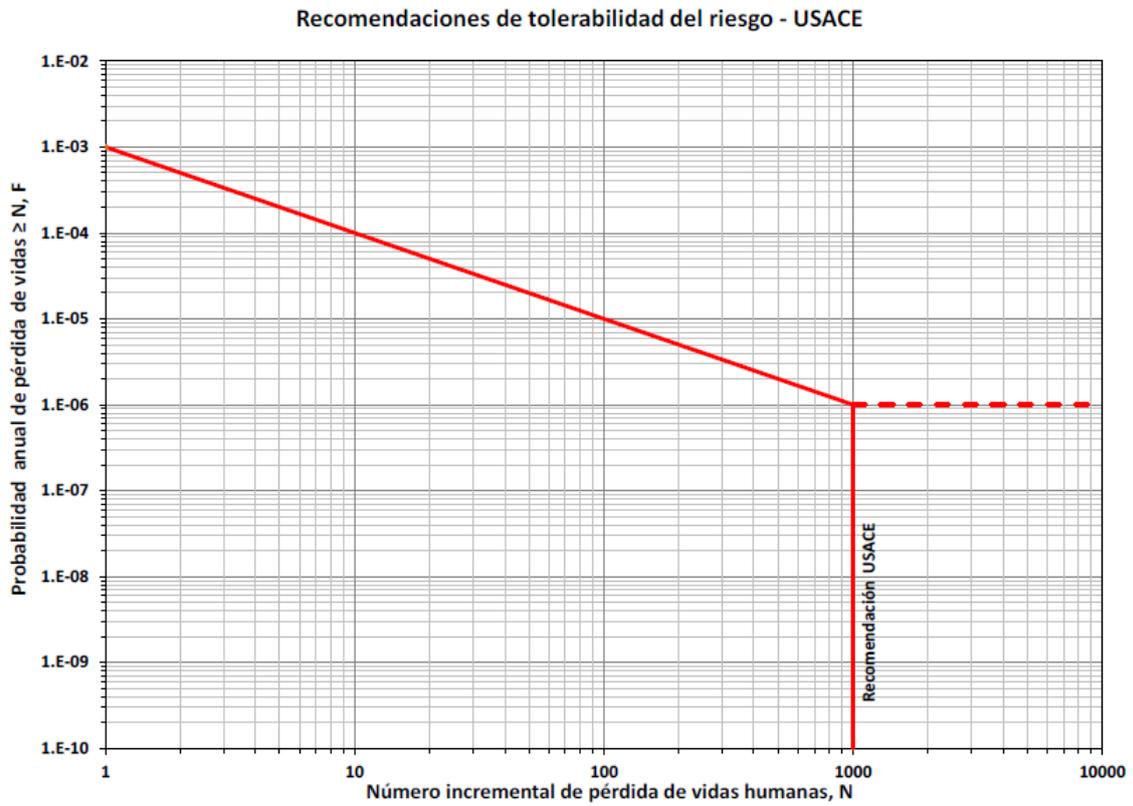


Ilustración 22 Recomendaciones de tolerabilidad de riesgo propuestas por el ANCOLD. Fuente: Morales, Adrián, 2012[5]

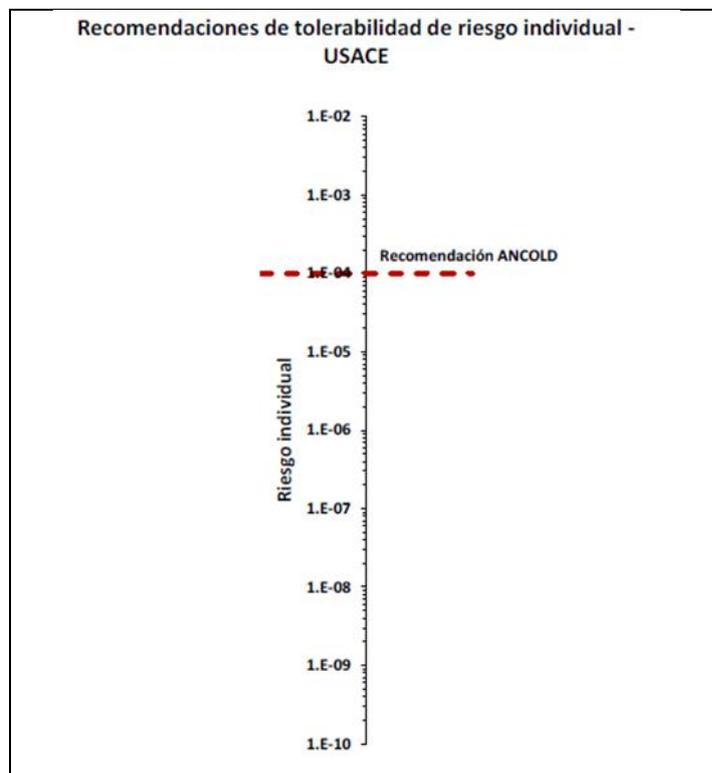


Ilustración 23 Recomendaciones de tolerabilidad de riesgo individual propuesta por el USACE Fuente: Morales, Adrián, 2012[5]

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.

### 2.2.9 Planteamiento de medidas de reducción del 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.

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 tabla siguiente se muestra, a modo de ejemplo, algunas de las medidas de reducción de riesgo más empleadas.

<b>Medidas de Reducción el Riesgo</b>	
<b>Estructurales</b>	<b>No Estructurales</b>
<i>Aumento de la cota de coronación (pretil)</i>	<i>Implantación de Resguardos</i>
<i>Mejora de la fiabilidad de los Org de Desagüe</i>	<i>Optimización de las Reglas de Operación</i>
<i>Aumento de la capacidad de desagüe</i>	<i>Mejora en la auscultación</i>
<i>Instalación de Compuertas</i>	<i>Implantación Plan de Emergencia</i>
<i>Mejora de cimentación</i>	
<i>Reparación de fisuras</i>	<i>Formación de la Población Aguas Abajo</i>
<i>Mejora eficiencia de los drenes</i>	

Tabla 15 Resumen de algunas de las medidas de reducción de riesgo para presas más empleadas. Fuente: MAGRAMA (2016)[15]

### 2.2.10 Gestión de medidas de reducción del riesgo

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.

Como se ha comentado antes, una vez obtenido el riesgo para la situación actual, se plantea el análisis de diferentes medias con el fin de obtener la secuencia de priorización óptima para la reducción del riesgo. Para ello se emplean indicadores.

Los indicadores de eficiencia tienen un doble propósito en la evaluación del riesgo: Por un lado, actúan como guía cuantitativa para materializar distintos criterios (ALARP...) y por otro, servir como variables de optimización para priorizar entre diferentes alternativas de reducción de riesgo.

*A continuación se describen algunos de los indicadores empleados:*

- **Ratio Beneficio-Coste:**

División entre el valor presente de los beneficios de un proyecto (incluyendo los beneficios por reducción del riesgo de inundación) y el valor presente de los costes. Valores mayores que 1 indican que el proyecto es recomendable.

- **Disminución promedio del riesgo social:**

Reducción promedio del riesgo social producida por la inversión analizada en todos los años del período de análisis.

- **Beneficio medio por reducción del riesgo:**

Valor Anual Equivalente de la reducción del riesgo económico en todo el período de análisis producida por la inversión analizada.

- **CSLS (Cost per Statistical Life Saved):**

Conocido como el COSTE POR VIDA ESTADÍSTICA SALVADA, se obtiene como la división entre el Valor Anual Equivalente de los costes y beneficios de la inversión (sin incluir los beneficios por reducción del riesgo) y la disminución promedio del riesgo social. Tiene unidades económicas y muestra cuánto cuesta evitar cada pérdida de vida al aplicar cada inversión. Cuanto más bajo es el valor de este indicador más eficiente es la inversión. Su valor se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$CSLS = \frac{C_A}{R(v)_{cb} - R(v)_A}$$

Dónde:

$C_A$ :	Coste anualizado de la medida de reducción [€/año]
$R(v)_{cb}$ :	Riesgo social en el caso base [vidas/año]
$R(v)_A$ :	Riesgo social tras implantar la medida [vidas/año]

Para determinar el coste anualizado se utiliza la siguiente expresión:

$$C_A = \frac{C_M + (C_I * (T_{DESC} * (1 + T_{DESC})^{V_{\acute{u}til}}))}{(1 + T_{DESC}) * (1 + T_{DESC})^{V_{\acute{u}til}} - 1}$$

Dónde:  $C_M$ : Coste de Mantenimiento [€]  
 $C_I$ : Coste de Implantación [€]  
 $T_{DESC}$ : Tasa de Descuento = 0.05  
 $V_{\acute{u}til}$ : Vida Útil [años]

El CSLS representa costes respecto a la 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 está vinculado al principio de eficiencia social.

▪ **ACSLS (Adjusted Cost per Statistical Life Saved)**

Conocido como COSTE AJUSTADO POR VIDA ESTADÍSTICA SALVADA se obtiene como la división entre el Valor Anual Equivalente de los costes y beneficios de la inversión (incluyendo los beneficios por reducción del riesgo económico) y la disminución promedio del riesgo social. También tiene unidades económicas y muestra cuánto cuesta evitar cada pérdida de vida al aplicar cada inversión. Cuando más bajo es el valor de este indicador más eficiente es la inversión.

$$ACSLS = \frac{C_A - (O_{cb} - O_A) - (R(EUR)_{cb} - R(EUR)_A)}{R(v)_{cb} - R(v)_A}$$

Dónde:  $C_A$ : Coste anualizado de la medida de reducción [€/año]  
 $O_{cb}$ : Coste de explotación existente [€/año]  
 $O_A$ : Coste de explotación tras la medida [€/año]  
 $R(v)_{cb}$ : Riesgo Anual en vidas humanas en el caso base [vidas/año]  
 $R(v)_A$ : Riesgo Anual en vidas humanas tras implantar la medida [vidas/año]  
 $R(EUR)_{cb}$ : Riesgo Anual Económico en el caso base [€/año]  
 $R(EUR)_A$ : Riesgo Anual Económico tras implantar la medida [€/año]

Como en el caso anterior, representa el principio de eficiencia, pero tiene en cuenta tanto la eficiencia social como la económica. Tanto este indicador como el CSLS son utilizados por diversos organismos para la priorización de medidas de reducción de riesgo.

El ACSLS también es utilizado para aplicar el criterio ALARP, 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.

ANCOLD 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 M\$ la medida se encuentra muy fuertemente justificada.
- Entre 5 y 20 M\$ la medida se encuentra fuertemente justificada.
- Entre 20 y 100 M\$ la medida se encuentra moderadamente justificada.
- Más de 100 M\$ 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, obteniendo los siguientes valores de referencia para el CSLS:

- Entre 0 y 6.1 M€: la medida se encuentra muy fuertemente justificada.
- Entre 6.1 y 24.2 M€: la medida se encuentra fuertemente justificada.
- Entre 24.2 y 121.2 M€: la medida se encuentra moderadamente justificada.
- Más de 121.2 M€: la medida está pobremente justificada.

En algunos casos, puede ocurrir que el coste anualizado de la medida 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.

#### ▪ **EWACSLs (Equity Weighted Cost per Statistical Life Saved)**

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:

$$EWACSLs = \frac{ACSLs}{\left(\frac{\max(p_f(CB), 10^{-4})}{\max(p_f(M), 10^{-4})}\right)^n}$$

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 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.

### 2.2.11 Priorización de medidas

El proceso de toma de decisiones en la priorización de medidas está basado en los principios de reducción del riesgo y en los indicadores de riesgo.

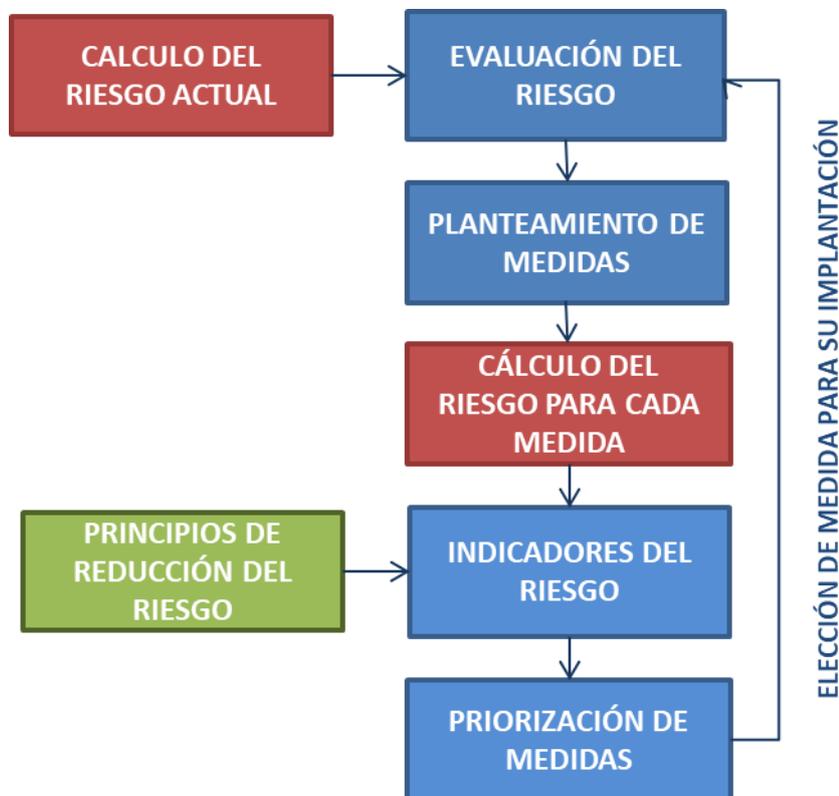


Ilustración 24 Proceso de toma de decisiones a partir de los resultados de riesgo. Fuente: Morales, Adrián (2012) [5]

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. 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. Este proceso se repite hasta que la presa cumple las recomendaciones de tolerabilidad y el criterio ALARP.

El proceso anterior puede ser extrapolado 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, o bien cuando se alcanza el nivel de riesgo residual objetivo. En el capítulo 04 de este documento se desarrolla la priorización conjunta de las dos presas estudiadas.

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 (condicionantes técnicos, financieros, normativos, medioambientales, organizativos, etc.).

- **Principios de Priorización de Medidas**

Como se explica en el apartado anterior, cada principio de priorización está ligado al cálculo de diferentes indicadores de riesgo. 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.

- **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 trabajo, se consideran dos tipos de eficiencia:

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.

- **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 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.

En este trabajo, el principio de equidad no se ha tenido en cuenta, pues únicamente se ha tenido en cuenta el indicador ACSLS para la priorización.

### **2.2.12 Procedimiento de Priorización de Medidas**

El proceso seguido para la obtener la secuencia de implementación de medidas para un escenario determinado se muestra a continuación.

En un primer paso, se obtienen del modelo de riesgo los valores de probabilidad y riesgo asociados al escenario elegido (Caso Base) y todas las medidas planteadas sobre él.

- Probabilidad de Fallo [años<sup>-1</sup>]
- Riesgo Social Incremental [vidas/año]
- Riesgo Económico Incremental [€/año]

Por otra parte, cada medida es caracterizada por los siguientes valores:

- Coste de Implantación [€]
- Coste de Mantenimiento [€/año]
- Vida Útil [años]

Con estos últimos tres valores se calcula el Coste anualizado de la medida ( $C_a$ ), necesario para el cálculo del indicador ACSLS.

Para operar con valores con unidades económicas, se suele utilizar Millones de Euros como orden de magnitud, aunque también se pueden utilizar Euros. Lo importante es que todas las unidades económicas coincidan en magnitud.

Una vez obtenidos todos los costes anualizados, se obtiene un valor de indicador para cada medida. Se elegirá la medida con un valor más bajo de este indicador.

A modo de ejemplo, se muestra en la siguiente ilustración, los valores obtenidos para la Presa 2 en el caso base:

<i>Alternativa</i>	<i>Coste Anualizado "Ca"</i> [M€/año]	<i>Riesgo Económico Incremental</i> [M€/año]	<i>Riesgo Social Incremental</i> [Vidas/año]	<i>Probabilidad de Fallo</i> [1/año]	<i>ACSLs</i> [M€/Vida]
<i>Escenario Actual: Caso Base</i>		2.27E-05	3.76E-04	1.51E-06	
<i>Plan de Emergencia</i>	7.50E-03	2.27E-05	6.85E-05	1.51E-06	24.36
<i>Plan Formación Continua</i>	3,250E-03	2.27E-05	2.03E-05	1.51E-06	9.13
<i>Mejora Operatividad Órganos de Desagüe</i>	7,50E-03	1.22E-06	2.03E-05	8.11E-08	17.49
<i>Pretil</i>	5,58E-02	0	0	0	3.00
<i>Rebaje del Aliviadero 0.5 m</i>	5,58E-02	0	0	0	135.98
<i>Rebaje del Aliviadero 1 m</i>	9.93E-02	0	0	0	272.03

Tabla 16 Valores obtenidos para el cálculo del indicador ACSLS de la presa 2

El siguiente paso de la secuencia consiste en estimar el indicador para todas las medidas que aún no han sido elegidas, sabiendo que la situación de partida incluye la medida ya elegidas como primer paso de 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.

En la siguiente ilustración se muestra de forma gráfica un ejemplo de aplicación del procedimiento de priorización para dos presas.

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 utilizan como situación base los resultados para la medida 3 y como situación con medida el escenario que incluye tanto la medida 3 con cada medida analizada. En el segundo paso, la medida con un menor valor del indicador es la medida 1 de la presa B.

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 siguiente ilustración.

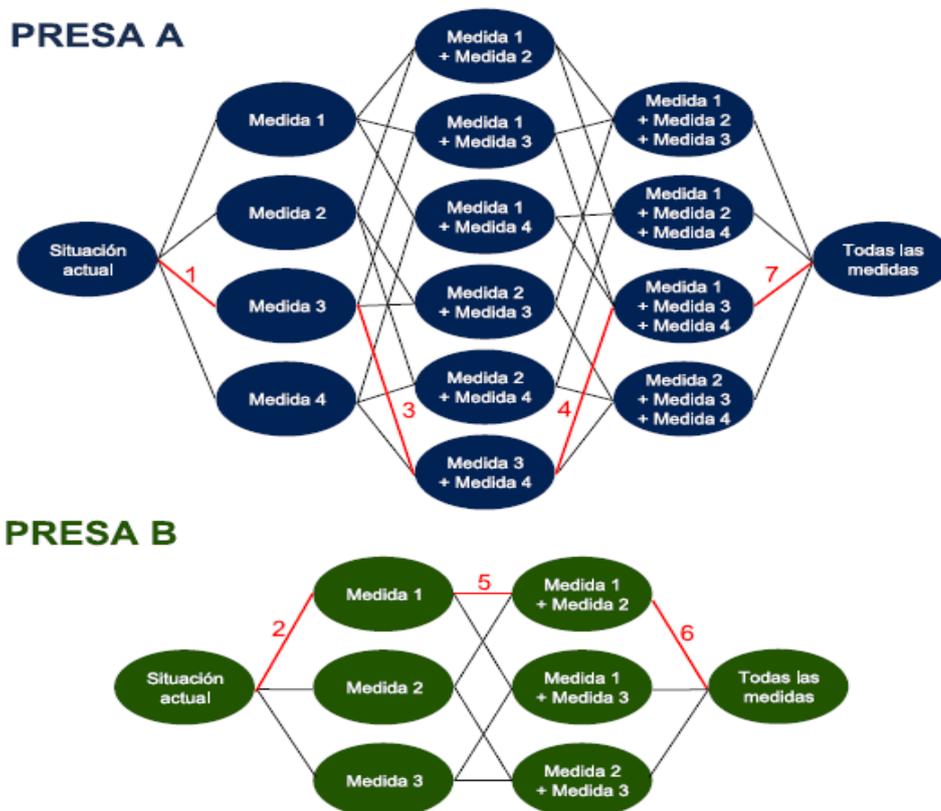


Ilustración 25 Ejemplo de aplicación del procedimiento de priorización de medidas en dos presas. Fuente: Morales, Adrián (2012) [5]

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.

#### ▪ 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 consideradas incluyen (Morales-Torres, 2012):

##### ▪ Restricción de orden:

Permite forzar a que una medida deba ser implementada antes que otra. 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. 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.

- 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.

- Restricción de posición global:

Permite definir el paso de la secuencia de priorización en el que se implementa una medida en concreto. Restricción de posición relativa:

Esta restricción es utilizada para definir la posición de una medida respecto a las otras medidas de la misma presa. Restricción exclusiva:

Permite eliminar una medida del análisis para que no aparezca en la secuencia de implementación de medidas.

Las restricciones utilizadas en cada una de las presas se muestran en los capítulos 03 y 04.



## **CAPITULO 03. CASOS DE ESTUDIO**



### 3.1 CASO DE ESTUDIO 1: PRESA DE MATERIALES SUELTOS

A continuación, se realiza el estudio del Análisis de riesgo para la Presa 1. El estudio parte de una descripción de las principales características de la presa, para contextualizar el caso. Seguidamente, se desarrollan los apartados descritos en el Capítulo 2, desde la entrada de datos al modelo de riesgo, hasta la propuesta de medidas estructurales y no estructurales para la reducción del riesgo de la presa. El último paso de este apartado es la obtención de la secuencia de aplicación de las medidas planteadas.

#### 3.1.1 Descripción Física de la Presa 1

##### ▪ **Cuerpo de Presa:**

La Presa 1, es una presa de materiales sueltos cuya función es abastecer a las poblaciones aguas abajo. La planta de la presa es recta, encontrándose provista, según la documentación consultada, de núcleo de arcilla, como elemento de impermeabilización. El eje de la presa se orienta prácticamente perpendicular al cauce, situándose su coronación a la cota 581,07 m.s.n.m. El ancho de coronación de la presa, superficie de rodadura sin asfaltar, es de 5 m. La sección tipo del cuerpo de presa presenta un núcleo grueso central impermeable de pizarra, centrado, cimentado en torno a la cota 562,84 y coronado a la cota 580,07 de 3 m de espesor en su zona superior, flanqueado por sendas capas filtro con función drenante y separación granulométrica, de 2 m de espesor. La longitud total del cuerpo de presa asciende a 234 m. La altura máxima de la presa sobre el cauce es de 17,37 m, estimada a partir de la cota de cauce de 563,7 m.s.n.m.

##### ▪ **Sistemas de Desagüe**

###### - Aliviadero:

El aliviadero está situado en la margen derecha de la presa, con vertedero frontal de labio fijo de eje prácticamente perpendicular al eje de presa, con una longitud de más de 36 m.

Su desagüe, se produce a través de un canal de descarga, constituido por dos tramos hormigonados de pendiente diferente, que finaliza en una vaguada natural. El camino de coronación no presenta continuidad sobre el canal de descarga, dado que carece de puente de paso. El vertedero está dispuesto en un solo vano de 9,0 m de longitud neta, con su umbral de vertido situado a la cota 578,94 m.s.n.m.

A la curva del umbral del vertedero le sigue una transición circular de 0,7 m de radio a su paramento de aguas abajo, de talud 1,4:1. El canal de descarga discurre, a partir de aquí, con cajeros verticales y doble pendiente de solera: 10,8H / 1V en el primer tramo, y 4,6H / 1V en el segundo final. El aliviadero es capaz de evacuar un caudal de 39,1 m<sup>3</sup>/s, con una longitud útil de vertido de 8,47 m, alcanzando el Nivel de Avenida de Proyecto, situado a la cota 580,7 m.s.n.m. Con la máxima avenida que puede soportar la presa, el aliviadero es capaz de evacuar 53,9 m<sup>3</sup>/s, con una longitud útil de vertido de 8,33 m, alcanzando el Nivel de Avenida Extrema, situado a la cota 581,16 m.s.n.m.

###### - Desagües de fondo:

El cuerpo de presa es atravesado perpendicularmente por los conductos de desagüe de fondo que son, a la vez, la toma del embalse en uno de sus conductos, constituido por dos tubos circulares, de 300 mm de diámetro, embebidos en un dado de hormigón del que se cree tiene de dimensiones 1,2 m x 0,8 m. El desagüe de fondo tiene 83 m de longitud.

En el inicio, el eje de los conductos de desagüe de fondo se sitúa a la cota 566,34 m.s.n.m, mientras que la desembocadura, a la altura de la arqueta de registro exterior a la cámara de válvulas, se encuentra a la cota 564,84 m.s.n.m. Sus válvulas de regulación y control se ubican en la casa de válvulas de toma y desagüe, situada en el pie de presa, aguas abajo de la misma. Un único colector existente hacia los grupos de bombeo, parte del tramo del conducto derecho del desagüe de fondo, entre las dos válvulas, de regulación y de control, en el interior de la propia casa de válvulas. Así, el tubo derecho del desagüe de fondo queda inutilizado en condiciones normales como desagüe, pudiendo ser usado para estos fines en caso de emergencias.

El desagüe de fondo es capaz de evacuar 0,714 m<sup>3</sup>/s, con la lámina de agua en el embalse situada en la cota 578,94 m.s.n.m. correspondiente al nivel de explotación.

La función de la presa es abastecer a las poblaciones aguas abajo de esta, la toma de agua para el abastecimiento se realiza a través de una toma flotante conectada a la embocadura del tubo derecho del desagüe de fondo; la cual, toma el agua a una profundidad de 1 ó 2 m de la superficie del embalse.

La presa carece de galerías de inspección y no dispone de más elementos de impermeabilización y drenaje salvo las pizarras que constituyen el cuerpo de presa.

En la siguiente tabla, se muestra a modo de resumen, las características físicas de la presa y su embalse.

A continuación se resumen las características más relevantes de la presa en una tabla.

<b>Características Presa 1</b>		
<b>Cuerpo de Presa</b>		
<i>Tipo Presa</i>	<i>Materiales sueltos</i>	
<i>Longitud/Anchura Coronación</i>	<i>234 m</i>	<i>5.00 m</i>
<i>Cota/Altura Coronación</i>	<i>581.07 m.s.n.m</i>	<i>17.37m</i>
<i>Cota/Altura Cimientos</i>	<i>562.84 m.s.n.m</i>	<i>17.23 m</i>
<b>Aliviadero</b>		
<i>Tipo Aliviadero</i>	<i>Labio Fijo Rectangular</i>	
<i>Longitud/Altura Aliviadero</i>	<i>36.00 m</i>	<i>1.76 m</i>
<i>Cota/Altura Umbral Aliviadero</i>	<i>578.94 m.s.n.m</i>	<i>16.10 m</i>
<i>Caudal Diseño Aliviadero</i>	<i>39.1 m<sup>3</sup>/s</i>	
<b>Desagües de Fondo</b>		
<i>Número de Conductos</i>	<i>2</i>	
<i>Cota/Altura Conductos</i>	<i>566.34 m.s.n.m</i>	<i>3.50 m</i>
<i>Diámetro por Conducto</i>	<i>300 mm</i>	
<i>Capacidad Desagüe a N.M.N</i>	<i>0.714 m<sup>3</sup>/s</i>	
<b>Embalse</b>		
<i>Nivel Máximo Normal N.M.N</i>	<i>578.94 m.s.n.m</i>	<i>16.10 m</i>
<i>Nivel para la Avenida de Proyecto N.A.P</i>	<i>580.70 m.s.n.m</i>	<i>17.86 m</i>
<i>Nivel para la Avenida Extrema N.A.E</i>	<i>581.16 m.s.n.m</i>	<i>18.32 m</i>
<i>Volumen Embalse N.M.N</i>	<i>0.811 Hm<sup>3</sup></i>	

Tabla 17: Resumen Características Físicas de la Presa 1.

### 3.1.2 Arquitectura del modelo de riesgo

La arquitectura del modelo de riesgo planteada posee las características que se muestran en la siguiente ilustración.

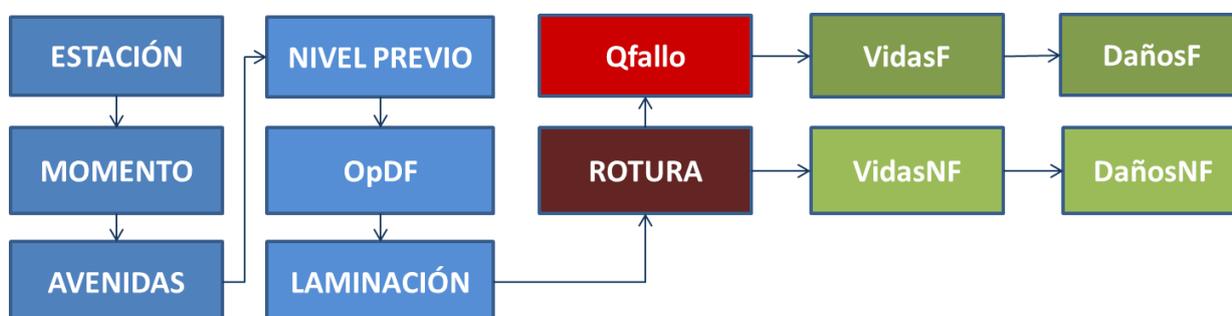


Ilustración 26 Diagrama de influencia establecido para el cálculo simplificado del riesgo de inundación por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces para la Presa 1. Fuente: Manual de: iPresas HidSimp[11]

### 3.1.3 Datos de entrada al modelo.

A continuación, se describen los datos de entrada al modelo de riesgo para los 2 escenarios considerados en este documento. Junto con ello, se expondrán todos los resultados asociados al proceso de cálculo realizado a fin de justificar la procedencia de los datos introducidos

- Escenario Actual: Caso Base
- Escenario Futuro: Cambio Climático + Cambio Socioeconómico

#### 3.1.3.1 Escenario Actual: Caso Base

- **Cargas**

- **Nodo Estación**

Para este estudio se ha asumido un periodo de tiempo de 4 meses para verano y 8 meses para invierno. Así, las probabilidades asociadas resultan ser:

Probabilidad Verano: 4 meses / 12 meses = 0.333

Probabilidad Invierno: 8 meses / 12 meses = 0.667

<b>Nodo Estación</b>	
<i>Nombre</i>	<i>Estación</i>
<i>Prob.Verano</i>	<i>0.333</i>
<i>Prob.Invierno</i>	<i>0.667</i>

Tabla 18 Datos de entrada del Nodo Estación del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 1.

- **Nodo Momento**

En el nodo estación se ha asumido que la duración del día y la noche es idéntica en cualquier momento del año, en lo referente a la efectividad de los procedimientos de gestión de emergencias. De esta manera las probabilidades asociadas serán siempre del 50%. El nodo Momento se introduce de la siguiente forma:

<b>Nodo Momento</b>		
<i>Estación</i>	<i>Verano</i>	<i>Invierno</i>
<i>Probabilidad Día</i>	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>
<i>Probabilidad Noche</i>	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>

Tabla 19 Datos de entrada del Nodo Momento del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 1.

- **Nodo Avenidas**

A partir de las características físicas de la cuenca se calcula el tiempo de concentración (Tc) asociado a ella. Ello se realiza con la fórmula de Témez que se describe a continuación.

Características físicas de la cuenca (Tiempo de concentración):

Superficie: 8.6 km<sup>2</sup>  
 Longitud cauce principal: 4.7 Km  
 Cota máxima: 840 m.s.n.m  
 Cota mínima: 568 m.s.n.m

Pendiente media: 5.79 %

$$T_c = 0.3 \left( \frac{4.7}{0.0579^{1/4}} \right)^{0.76} = 1.67 \text{ horas}$$

El tiempo de concentración será utilizado para calcular las consecuencias más adelante.

La presa 1 objeto de estudio está clasificada como presa de categoría A (Guía Técnica “Clasificación de presas en función del riesgo potencial”), por lo tanto, según expresa la Guía Técnica de Seguridad de Presas Nº4 “Avenidas de Proyecto”, se recomienda que las avenidas a considerar tengan los siguientes periodos de retorno:

**Avenida de Proyecto:** Máxima avenida que debe tenerse en cuenta para el dimensionamiento del aliviadero, los órganos de desagüe y las estructuras de disipación de energía de forma que funcionen correctamente. Para presas de Categoría A se recomienda utilizar la avenida de 1.000 años de periodo de retorno.

**Avenida Extrema:** La mayor avenida que la presa puede soportar. Supone un escenario límite al cual puede estar sometida la presa sin que se produzca su rotura, si bien admitiendo márgenes de seguridad más reducidos. Para la presa 1 al ser de materiales sueltos la avenida extrema es de 10.000 años

Aunque éstas sean las avenidas recomendadas por la Guía Técnica, el estudio de laminación se realiza también para los siguientes periodos de retorno: 2.33, 5, 10, 25, 50, 100, 500 y 10.000 años.

En la siguiente tabla se representa el caudal pico entrante al embalse y el volumen que representa, asociado a cada periodo de retorno.

<b>Periodo de Retorno [años]</b>	<b>Caudal Pico [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Volumen [m<sup>3</sup>]</b>
2.33	2.0	30000
5	7.1	100000
10	12.7	170000
25	22.1	280000
50	30.2	380000
100	39.6	500000
500	65.0	810000
1000	77.9	970000
5000	111.1	1380000
10000	126.5	126500000

Tabla 20 Avenidas entrantes al embalse de la Presa 1.

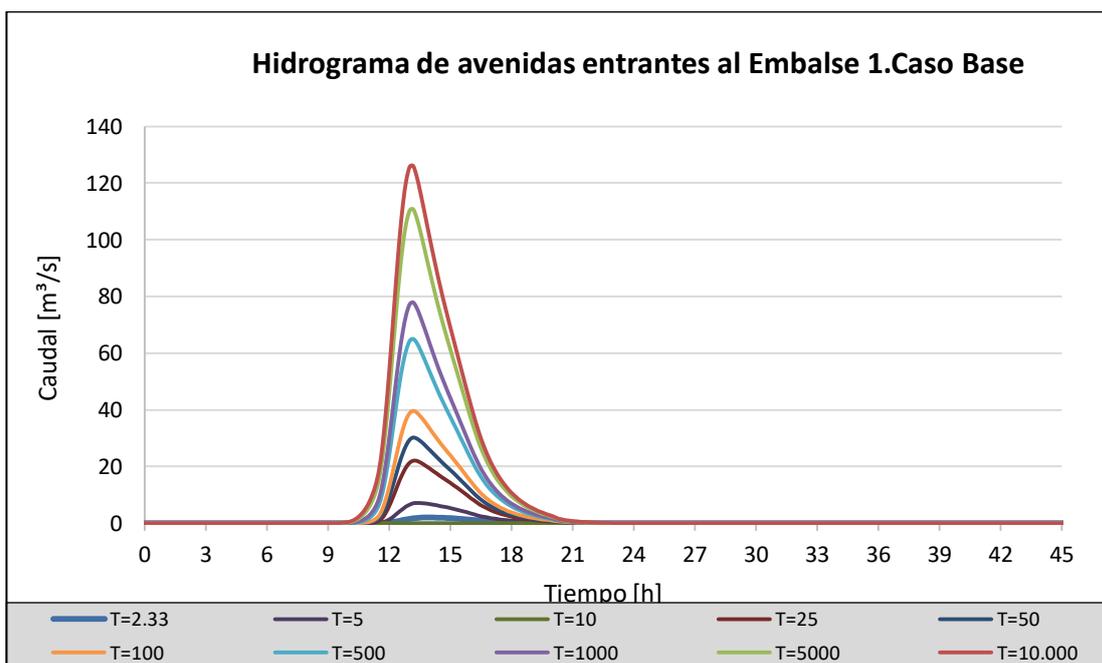


Ilustración 27 Avenidas entrantes al embalse de la Presa 1.

Como se ha detallado anteriormente la laminación del embalse se realiza para las avenidas asociadas a los periodos de retorno comprendidos entre 2.33 y 10000 años. Sin embargo, para introducir las avenidas en el nodo es necesaria la creación de una avenida ficticia de 1 año de periodo de retorno. Dicha avenida ficticia no genera afección sobre el embalse. El nivel asociado a la avenida coincide con los valores de nivel previo y no produce caudal saliente.

Con la aclaración del párrafo anterior, la laminación se calculará para un  $T_{min} = 1$  y  $T_{máx} = 10.000$ .

<b>Nodo Avenidas</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Avenidas</b>
<b><i>Tmin.</i></b>	<b><i>1</i></b>
<b><i>Tmax.</i></b>	<b><i>10000</i></b>

Tabla 21 Datos de entrada del Nodo Avenidas del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 1

▪ **Nodo Nivel Previo**

El registro histórico utilizado para obtener la relación entre probabilidad y niveles en el embalse es suficientemente largo (se poseen 803 valores medidos desde la fecha de construcción de la presa hasta la actualidad) y por tanto representativos de su explotación.

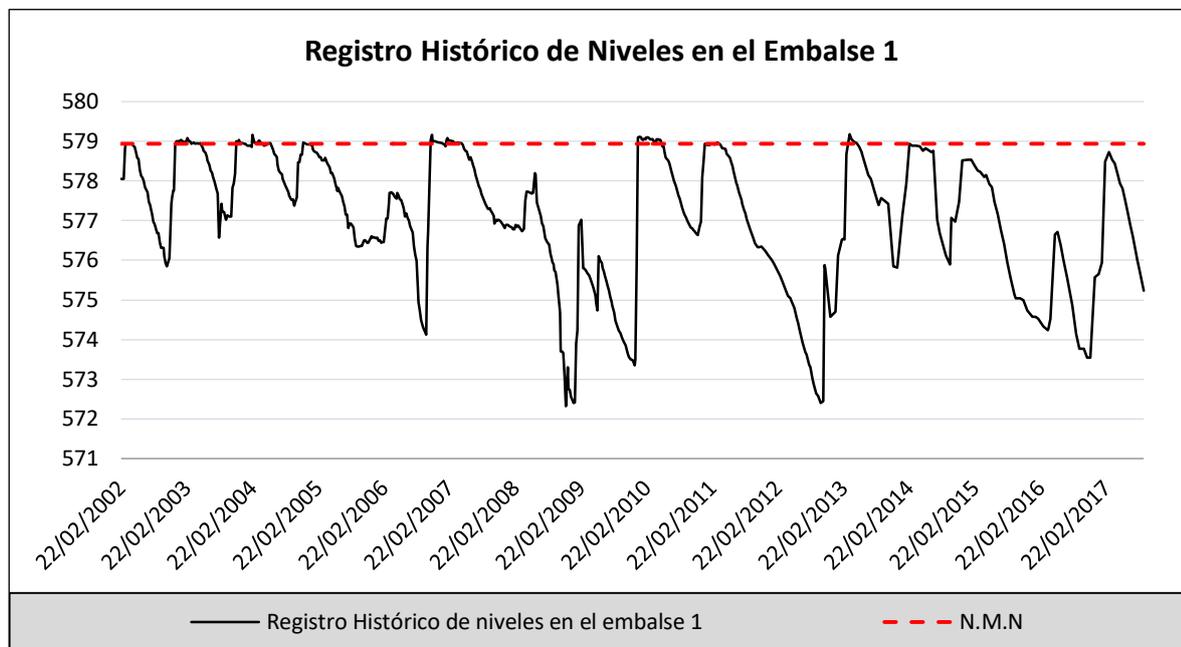


Ilustración 28 Registro Histórico de Niveles en el Embalse 1

Para evitar introducir en la curva de probabilidad los datos que no son representativos de la situación normal del embalse, se eliminan del análisis los datos correspondientes a las situaciones de avenida (situaciones en las que el embalse se encuentra a un nivel por encima del Nivel Máximo Normal N.M.N como se puede observar en la Ilustración 28

Como se puede apreciar en la Ilustración 28, existen registros que superan el N.M.N del embalse, fijado en 478.94 m.s.n.m. Estos registros corresponderían a situación de avenida, ya que en situación normal el nivel en el embalse no superará el N.M.N gracias al aliviadero de labio fijo. Por este motivo, como una aproximación razonable se ha truncado la serie de datos para dicho valor de N.M.N

Cuando se representan gráficamente los niveles en el embalse y su probabilidad de excedencia se obtiene una curva como la que se muestra en la siguiente figura:

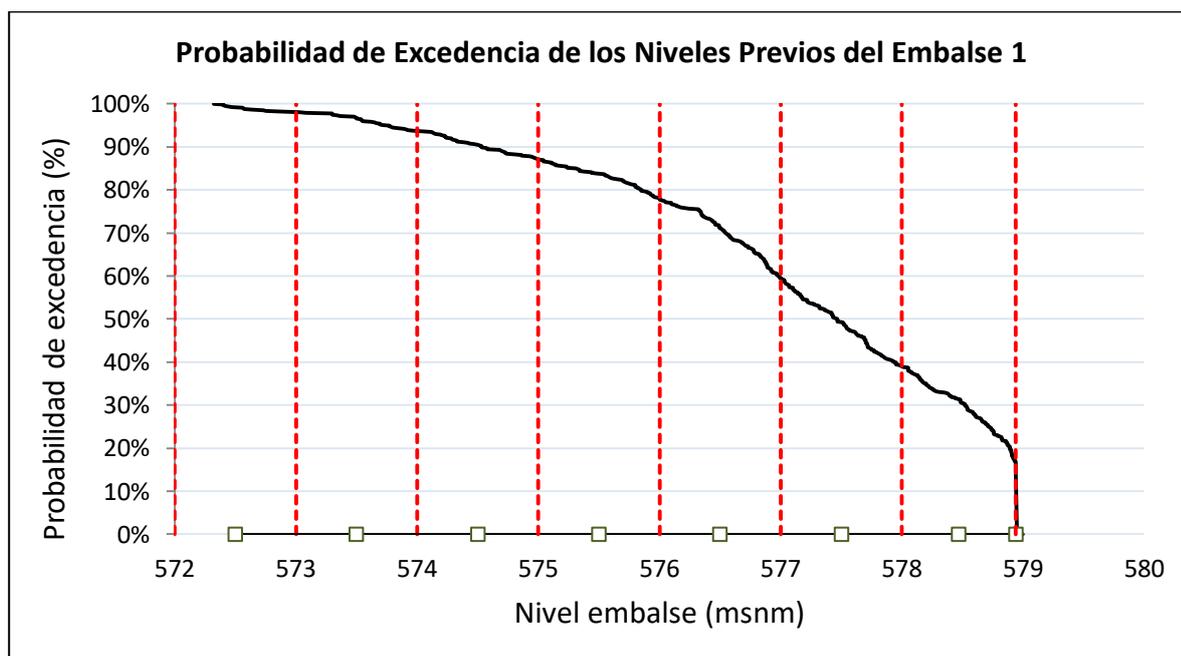


Ilustración 29 Curva de Probabilidad de excedencia de los niveles previos del embalse 1

La Ilustración 29 representa las probabilidades de excedencia de niveles previos del embalse 1. Se representan también los intervalos en los que se ha discretizado (trazos rojos) y los niveles medios de cada intervalo que sirven de entrada en el nodo de Laminación del modelo de riesgo (puntos situados en el eje horizontal).

Los datos de entrada necesarios para el modelo de riesgo incluyen la probabilidad de ocurrencia de un determinado nivel cuando llega la avenida correspondiente. Por tanto, el modelo no incluye la probabilidad de excedencia ( $PE_n$ ) sino la probabilidad de estar en un determinado intervalo de niveles previos, siendo representado dicho intervalo por el promedio de sus extremos, denominado nivel previo representativo.

Así, una vez ordenado de menor a mayor todo el registro de niveles previos y calculada la probabilidad de excedencia para cada nivel, se define una serie de intervalos para los que se calcula la probabilidad de ocurrencia y su valor representativo.

<b>Nivel Previo Inicial [m.s.n.m]</b>	<b>PE<sub>n</sub></b>	<b>Intervalo</b>	<b>Nivel Previo Representativo [m.s.n.m]</b>	<b>Probabilidad de ocurrencia de estar en dicho intervalo [%]</b>
572	1.00	572 - 573	572.5	1.95%
573	0.97	573 - 574	573.5	4.39%
574	0.93	574 - 575	574.5	6.55%
575	0.86	575 - 576	575.5	9.42%
576	0.75	576 - 577	576.5	18.35%
577	0.56	577 - 578	577.5	20.33%
578	0.34	578-578.94	578.47	24.13%
578.94	0.08			

Tabla 22: Probabilidad de ocurrencia de estar en un intervalo determinado de niveles previos.

La hoja de cálculo que se adjunta al nodo Nivel Previo tiene la estructura de la siguiente tabla:

<b>PrevWL</b>	<b>Prob</b>
572.5	0.02
573.5	0.04
574.5	0.07
575.5	0.09
576.5	0.18
577.5	0.20
578.47	0.07
578.94	0.09

Tabla 23: Estructura de la hoja de cálculo para el nodo Nivel Previo

#### ▪ **Nodo Op. O.D**

Para el caso base, los desagües de fondo se mantendrán en todo momento cerrados de manera que el único órgano de desagüe en funcionamiento será el aliviadero de labio fijo.

De esta manera, la probabilidad de operatividad asociada a ellos será nula, introduciendo el nodo en el modelo de la siguiente forma:

<b>Nodo Op.OD</b>	
Número de O.D	0
Porcentaje de Operatividad de O.D [%]	0

Tabla 24: Datos de entrada en el nodo Op.OD

#### ▪ **Nodo Laminación**

##### **Curva característica del embalse 1**

Con los datos de máximas avenidas entrantes al embalse para distintos periodos de retorno, se ha analizado la laminación teniendo en cuenta las características del aliviadero de la presa, el desagüe de fondo y la curva característica del embalse.

La curva característica del embalse 1 relaciona el volumen embalsado con el nivel. Se muestra a continuación:

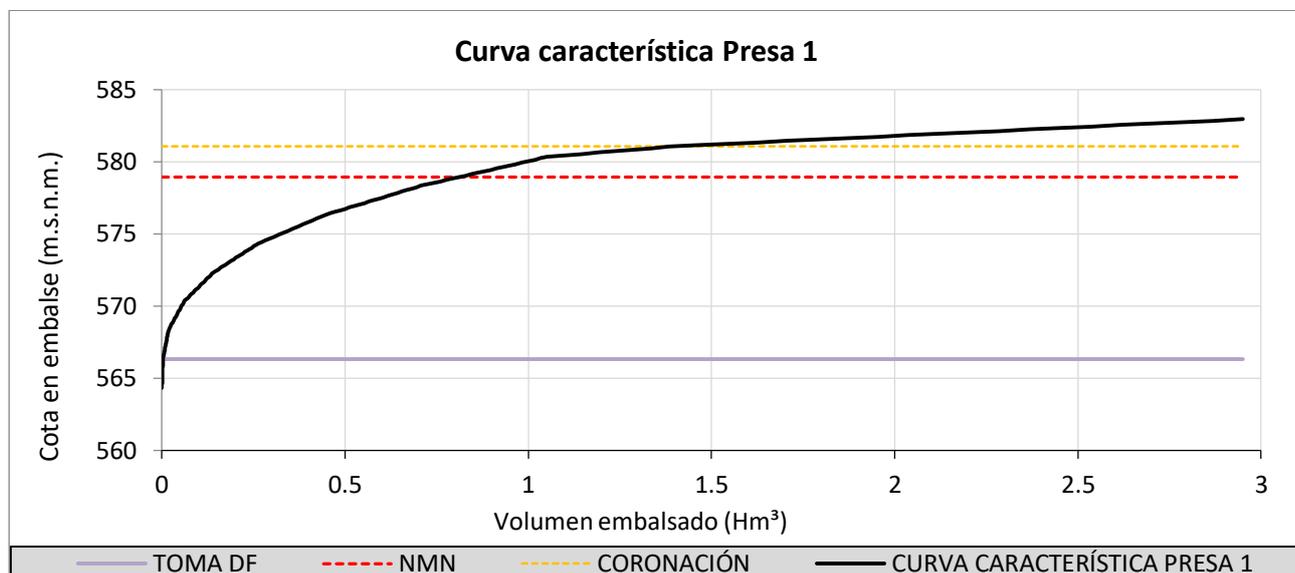


Ilustración 30 : Curva característica del embalse 1.

### **Curvas de Gasto de los Órganos de Desagüe:**

#### **Ley de desagüe del aliviadero**

Para calcular la relación cota del embalse con el caudal de salida se ha utilizado la siguiente fórmula:

$$Q = C \times L \times H_e^{1.5}$$

- Siendo:
- Q = Caudal desaguado [m<sup>3</sup>/s]
  - L = Longitud del labio de vertido [m]
  - H<sub>e</sub> = Altura de energía sobre el umbral del labio [m]
  - C = Coeficiente de desagüe

El coeficiente de desagüe es función de la altura total de energía sobre la cresta, de la altura en dicha cresta sobre el fondo y de la inclinación de su paramento de aguas arriba. En los cálculos realizados se ha tomado C = 2, que es un valor medio y se ha considerado constante respecto a la altura de energía sobre la cresta. También se ha considerado que no hay reducción del coeficiente de desagüe por sumergencia. La longitud útil de vertido del aliviadero se calcula mediante la siguiente expresión:

$$L = L' - 2(NK_p + K_a) \times H_e$$

- Siendo:
- L = Longitud útil de vertido [m]

- $L'$  = Longitud neta de vertido [m]
- $N$  = Numero de pilas
- $K_a$  = Coeficiente de contracción en estribos
- $K_p$  = Coeficiente de contracción en pilas
- $H_e$  = Altura de energía sobre el umbral del labio [m]

En el caso del aliviadero de la Presa 1 se tiene que la longitud neta de vertido es de 9,00 metros, no tiene pilas y el coeficiente de contracción en estribos es de 0,10 (correspondiente a estribos redondos) en el estribo izquierdo y 0,20 en el derecho (correspondiente a estribos rectangulares).

Con estos datos anteriores se obtiene la ley de desagüe del aliviadero de la presa 1, la cual se muestra a continuación en forma de gráfica:

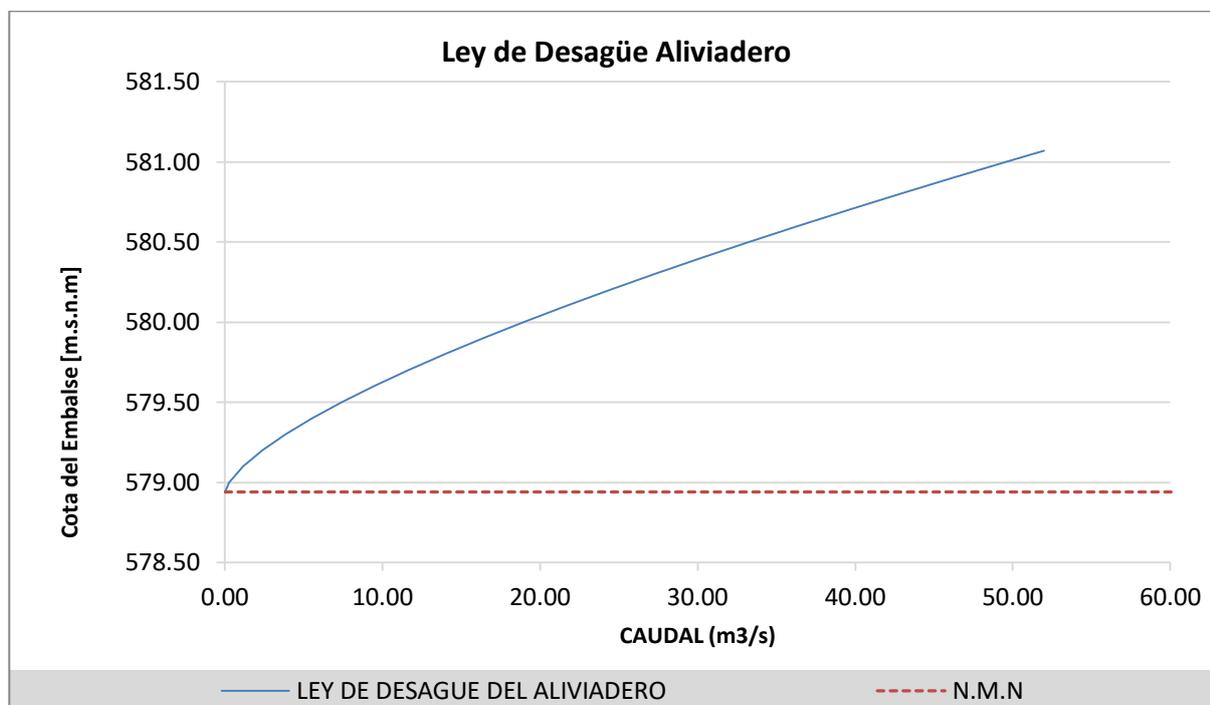


Ilustración 31 Ley de desagüe del aliviadero de la presa 1

Cuando el nivel del embalse sobrepase el nivel de coronación del cuerpo de presa (581.07 m.s.n.m), se suma al caudal vertido por aliviadero el caudal sobrevertido.

El caudal sobrevertido se parametriza a partir de:

$$Q = 1.9 \times L \times H_e^{1.5}$$

- Siendo:
- $Q$  = Caudal saliente por encima del cuerpo de presa [ $m^3/s$ ]
  - $L$  = Longitud de coronación
  - $H_e$  = Altura de energía sobre el umbral del labio [m]

### **Ley de desagüe del desagüe de fondo**

Para el caso base, el desagüe de fondo se considera siempre cerrado, permaneciendo así del lado de la seguridad. Aun así, se han estudiado los tres posibles casos, para contar con resultados de la laminación para futuras medidas que contemplen el uso del desagüe de fondo en la laminación:

- Desagüe de fondo cerrado.
- Desagüe de fondo con un conducto abierto.
- Desagüe de fondo con los dos conductos abiertos.

Los datos de partida básicos para el cálculo de la curva de gasto de los desagües de fondo son, en este caso, los siguientes:

Diámetro de los conductos: 300 mm.

Cota del eje en la embocadura: 566,34 m.s.n.m.

Cota del eje en la salida: 564,84 m.s.n.m.

Longitud total de los conductos: 83 m.

Cota de Nivel Máximo Normal: 578,94 m.s.n.m.

Material de los conductos: Acero / fundición.

Tipo de entrada: Abocinada circular.

Nº de válvulas de control: 2

Tipo de válvulas de control, por conducto: De compuerta.

Curva horizontal: ángulo 90º y radio 0,5 m.

Contra curva horizontal: ángulo 45º y radio 0,75 m.

La curva de gasto del desagüe de fondo en función del número de conductos abiertos se muestra a continuación:

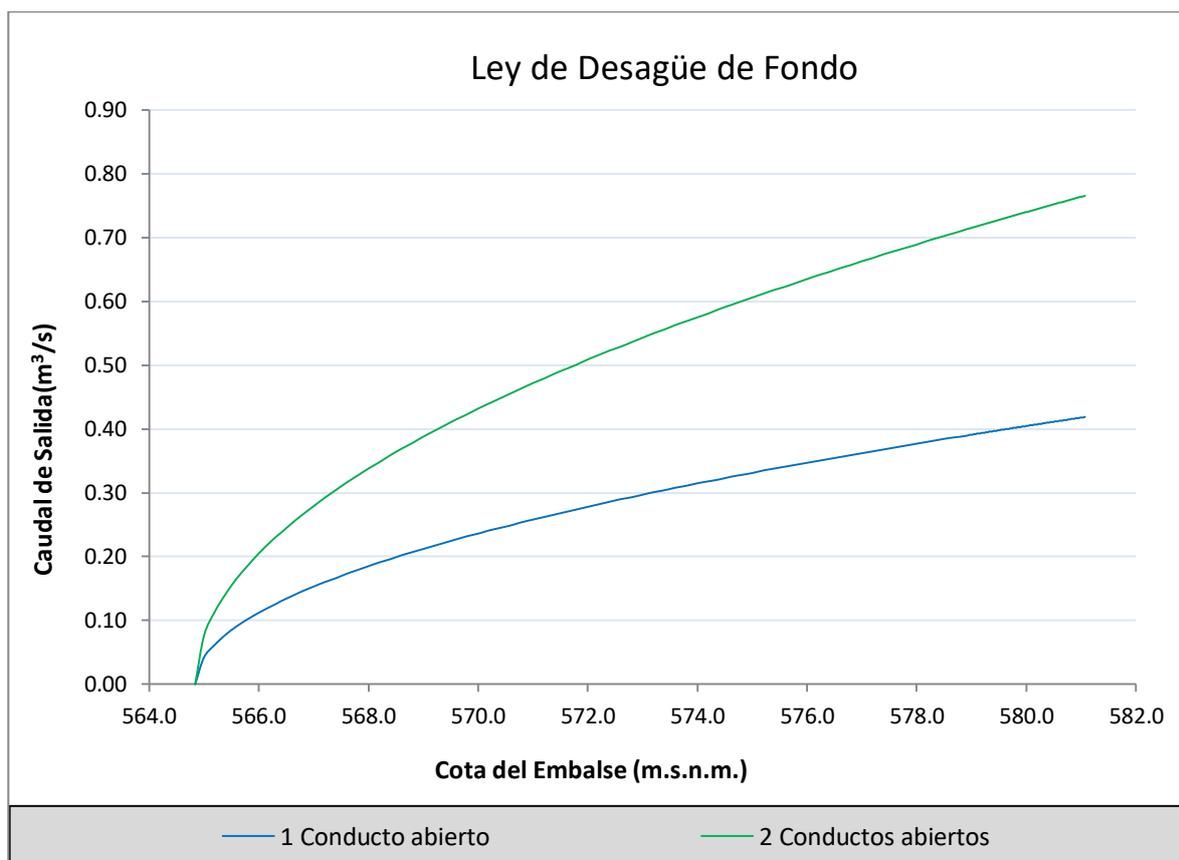


Ilustración 32 : Ley de desagüe del desagüe de fondo dela presa 1

Una vez obtenidos todos los datos, se simula la laminación y se extrae de ella una hoja de cálculo para todas las combinaciones, obteniéndose para todas, el nivel máximo alcanzado en el embalse (MaxWL) y el caudal laminado máximo (QNo\_Fallo).

La hoja de cálculo obtenida para el caso base se muestra a continuación para T10000

<b>T</b>	<b>AEP</b>	<b>PrevWL</b>	<b>OpA</b>	<b>OpDF</b>	<b>MaxWL</b>	<b>QNo_Fallo</b>
10000.00	0.00	572.50	1.00	0.00	580.76	41.41
10000.00	0.00	573.50	1.00	0.00	580.82	43.42
10000.00	0.00	574.50	1.00	0.00	580.88	45.57
10000.00	0.00	575.50	1.00	0.00	580.97	48.59
10000.00	0.00	576.50	1.00	0.00	581.06	51.52
10000.00	0.00	577.50	1.00	0.00	581.12	59.59
10000.00	0.00	578.47	1.00	0.00	581.17	68.80
10000.00	0.00	578.94	1.00	0.00	581.19	73.46

Tabla 25: Estructura del fichero de Microsoft Excel utilizado para introducir los datos de la laminación al modelo.

A continuación se muestran de forma gráfica los resultados obtenidos en la laminación.

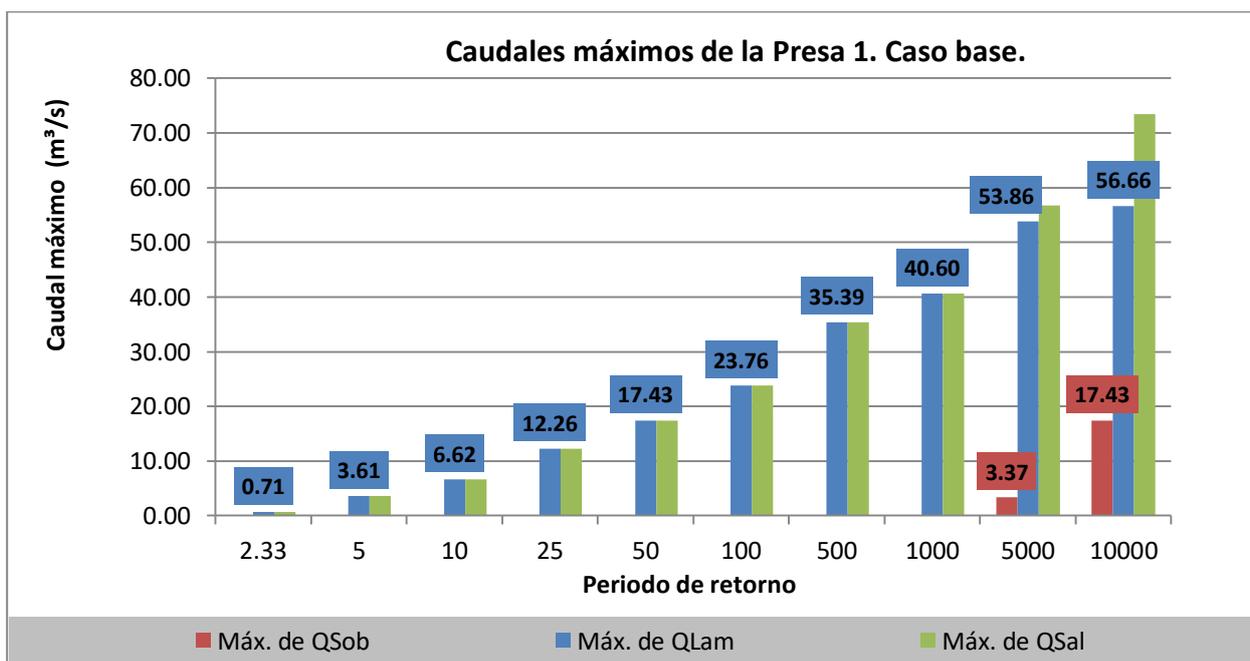


Ilustración 33 Representación de los caudales máximos asociados a cada periodo de retorno de la Presa1 para el Caso base.

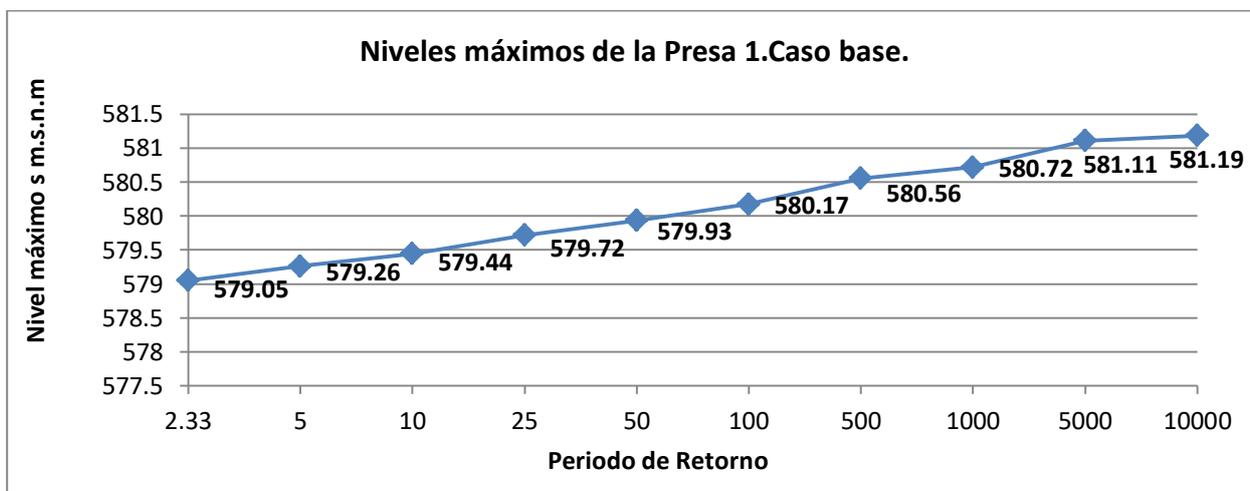


Ilustración 34 Representación de los niveles máximos alcanzados asociados cada periodo de retorno de la Presa1 para el caso base. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar, para la avenida con periodo de retorno 5000 y 10.000 años la presa alcanza niveles superiores a 581.07 m.s.n.m, luego sobrevierte.

- **Respuesta del Sistema**

▪ **Nodo Rotura**

La información introducida en el nodo Rotura del modelo se presenta a continuación:

<b>Nodo Rotura</b>	
<i>Nivel de coronación</i>	481.07
<i>Tipo de presa</i>	Materiales sueltos

*Tabla 26 Datos de entrada del Nodo Rotura del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 1*

▪ **Nodo Q Fallo**

Los datos de entrada al nodo se muestran a continuación.

<b>Nodo QFallo</b>	
<i>Nivel cimienta</i>	562.84 m.s.n.m
<i>Nivel de referencia</i>	581.07 m.s.n.m
<i>Q referencia</i>	2005 m <sup>3</sup> /s

*Tabla 27 Datos de entrada del Nodo QFallo del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 1*

- **Consecuencias**

El cálculo de la pérdida de vidas potencial y de las consecuencias económicas se basa en la identificación de las afecciones resultantes de la inundación aguas abajo.

- Características de la zona de afección.

Se describe la zona de afección aguas abajo de la presa para los dos tipos de escenarios considerados.

- H1: Rotura de la presa sin Avenida, con el embalse a la cota N.M.N
- H2: Rotura de la presa en situación de avenida, con el embalse a la cota N.A.P

**Consecuencias Sociales**

Se han calculado las consecuencias sociales en términos de pérdida de vidas en base a la metodología SUFRI explicada en el capítulo 2.2.5.3 para cada una de las afecciones presentes aguas abajo de la presa. Aunque se han estimado las consecuencias para las dos metodologías descritas en el Capítulo 2, se opta por emplear la segunda pues está basada en ratios de escenarios de rotura reales y las tasas de mortalidad de referencia son ampliamente empleadas en el ámbito de seguridad de presas.

El sumatorio de todas las afecciones, en términos de pérdidas de vidas, se introduce en el modelo de riesgo.

Para el cálculo de las consecuencias sociales se introduce la variabilidad estacional y diaria para caracterizar la población presente en los elementos de afección. Por ejemplo, una piscina o lugar recreativo no tendrá asociada la misma población en verano que en invierno y tampoco para el día o la noche.

Las consecuencias sociales, calculadas para H1 y H2 se muestran en la siguiente tabla:

SUFRI_ Categoría C3	Q <sub>max</sub> [m <sup>3</sup> /s]	NÚMERO DE VÍCTIMAS INVIERNO-DIA	NÚMERO DE VÍCTIMAS VERANO-DIA	NÚMERO DE VÍCTIMAS INVIERNO-NOCHE	NÚMERO DE VÍCTIMAS VERANO -NOCHE
H0	1.3	0	0	0	0
H1	1431	73	145	91	182
H2	2005	262	524	273	545

Tabla 28 Cálculo de pérdida de vidas. Metodología SUFRI de la presa 1

### Consecuencias Económicas

Las consecuencias económicas en caso de rotura serán la suma de Costes de reconstrucción, Coste por lucro cesante y Coste de inundación.

#### Coste de inundación

Para el escenario H1:

COSTES DE INUNDACIÓN PRESA H1					
	ÁREA INUNDADA	COSTE UNITARIO	DAÑO	COSTES DIRECTOS	COSTES INDIRECTOS
	(m <sup>2</sup> )	(€/m <sup>2</sup> )	%	(€)	(€)
PUENTE CARRETERA COMARCAI	38.4	250	100%	9,600.00 €	1,440.00 €
CASA	32.17	260	100%	8,364.20 €	1,254.63 €
PUENTE DE CARRETERA	38.4	250	100%	9,600.00 €	1,440.00 €
CASAS DE PUEBLO	37.78	260	100%	9,822.80 €	1,473.42 €
LINEA ALTA TENSIÓN	33.41	500	100%	16,705.00 €	2,505.75 €
MUNICIPIO	125000	260	100%	32,500,000.00 €	4,875,000.00 €
			Totales	32,601,045.40€	4,890,156.81 €
			<b>TOTAL</b>		<b>37,491,202.21 €</b>

Tabla 29 Costes de Inundación de la Presa 1 para el escenario H1

Para el escenario H2:

<b>COSTES DE INUNDACIÓN PRESA 2 H2</b>					
	ÁREA INUNDADA	COSTE UNITARIO	DAÑO	COSTES DIRECTOS	COSTES INDIRECTOS
	(m2)	(€/m2)	%	(€)	(€)
PUENTE CARRETERA COMARCAL	38.4	250	100%	9,600.00 €	1,440.00 €
CASA AGRÍCOLA	180.59	260	100%	46,953.40 €	7,043.01 €
CASA	32.17	260	100%	8,364.20 €	1,254.63 €
CASA VIVIENDA	13.93	260	26%	941.67 €	141.25 €
PUENTE DE CARRETERA	38.4	250	100%	9,600.00 €	1,440.00 €
CASAS DE PUEBLO	37.78	260	100%	9,822.80 €	1,473.42 €
LINEA ALTA TENSIÓN	33.41	500	100%	16,705.00 €	2,505.75 €
PUENTE CARRETERA COMARCAL	37.4	250	39%	3,646.50 €	546.98 €
MUNICIPIO	125000	260	100%	32,500,000.00 €	4,875,000.00 €
PUENTE CARRETERA COMARCAL	37.4	250	39%	3,646.50 €	546.98 €
				32,605,633.57 €	4,890,845.04 €
			<b>TOTAL</b>		<b>37,496,478.60 €</b>

Tabla 30 Costes de Inundación de la Presa 1 para el escenario H2

### Coste de reconstrucción

<b>COSTE DE RECONSTRUCCIÓN DE LA PRESA</b>	
Coste de Reconstrucción	<b>23,923,746.59 €</b>

Tabla 31 Coste de Reconstrucción Presa 1

### Coste por lucro cesante

<b>COSTE POR VACIADO DURANTE 4 AÑOS HASTA RECONSTRUCCIÓN</b>					
POBLACIÓN ABASTECIDA	CONSUMO ANUAL		COSTE UNITARIO RECURSO ALTERNATIVO	COSTE ANUAL ABASTECIMIENTO EN CASO DE NO PRESA	TOTAL
(Habitantes)	(litros/h ab/día)	(m3/año)	(€/m3)	(€/Año)	
Periodo Estival	3141				
Resto del Año	1047	130	198720.60	0.615	122,213.17 €
<b>Total</b>	<b>4188</b>				<b>488,852.68 €</b>

Tabla 32 Coste por lucro cesante Presa 1

El resumen de los resultados asociados a las consecuencias económicas para la Presa 1 se detallan en la siguiente tabla:

<b>Costes caso rotura (M€)</b>	<b>H.0</b>	<b>H.1</b>	<b>H.2</b>
	M€	M€	M€
COSTE DE INUNDACIÓN	0.00	37.51	37.52
COSTE ABASTECIMIENTO DURANTE 4 AÑOS DE RECONSTRUCCIÓN EN CASO DE ROTURA (M€)	0.49	0.49	0.49
COSTE RECONSTRUCCIÓN (M€)	23.92	23.92	23.92

Tabla 33 Coste en caso de rotura desglosado de la presa 1

Para introducir los datos al modelo los resultados se aglutinan en dos grupos:

- Costes asociados a la no rotura de la presa
- Costes asociados a la rotura de la presa:

<b>Caso</b>	<b>Q max (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Costes No rotura (M€)</b>	<b>Costes Rotura (M€)</b>
H0	1.3	0.00	24.78
H1	1431	37.50	62.27
H2	2005	37.49	62.28

Tabla 34 Tabla Resumen de Consecuencias Económicas de la presa 1

#### ▪ **Nodo Consecuencias**

La información incluida en los nodos referentes a consecuencias, tanto sociales como económicas se muestran a continuación:

#### ▪ **Nodo Vidas F**

<b>Estación</b>	<b>Momento</b>	<b>QFallo</b>	<b>Pérdida de VidasF</b>
Verano	Día	1.30	0
Verano	Día	1431.00	145
Verano	Día	2005.00	524
Verano	Noche	1.30	0.00
Verano	Noche	1431.00	182
Verano	Noche	2005.00	545
Invierno	Día	1.30	0
Invierno	Día	1431.00	73
Invierno	Día	2005.00	262
Invierno	Noche	1.30	0
Invierno	Noche	1431.00	91
Invierno	Noche	2005.00	273

Tabla 35: Datos de entrada del Nodo Vidas F del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 1

▪ **Nodo Vidas NF**

<i>Estación</i>	<i>Momento</i>	<i>QFallo</i>	<i>Pérdida de VidasF</i>
<i>Verano</i>	<i>Día</i>	<i>1.30</i>	<i>0</i>
<i>Verano</i>	<i>Día</i>	<i>1431.00</i>	<i>145</i>
<i>Verano</i>	<i>Día</i>	<i>2005.00</i>	<i>524</i>
<i>Verano</i>	<i>Noche</i>	<i>1.30</i>	<i>0</i>
<i>Verano</i>	<i>Noche</i>	<i>1431.00</i>	<i>182</i>
<i>Verano</i>	<i>Noche</i>	<i>2005.00</i>	<i>545</i>
<i>Invierno</i>	<i>Día</i>	<i>1.30</i>	<i>0</i>
<i>Invierno</i>	<i>Día</i>	<i>1431.00</i>	<i>73</i>
<i>Invierno</i>	<i>Día</i>	<i>2005.00</i>	<i>262</i>
<i>Invierno</i>	<i>Noche</i>	<i>1.30</i>	<i>0</i>
<i>Invierno</i>	<i>Noche</i>	<i>1431.00</i>	<i>91</i>
<i>Invierno</i>	<i>Noche</i>	<i>2005.00</i>	<i>273</i>

Tabla 36 Datos de entrada del Nodo Vidas NF del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 1

▪ **Nodo Daños F**

<i>QFallo</i>	<i>DañosF</i>
<i>1.30</i>	<i>24.78</i>
<i>1431</i>	<i>61.90</i>
<i>2005</i>	<i>61.91</i>

Tabla 37: Datos de entrada del Nodo Daños F del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 1

▪ **Nodo Daños NF**

<i>QNo_Fallo</i>	<i>DañosNF</i>
<i>1.30</i>	<i>0.00</i>
<i>1431</i>	<i>37.50</i>
<i>2005</i>	<i>37.49</i>

Tabla 38: Datos de entrada del Nodo Daños NF del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 1

### 3.1.3.2 Escenario2050: CAMBIO CLIMÁTICO + CAMBIO SOCIOECONÓMICO

La variación que presenta el escenario futuro sobre el escenario actual viene asociada a:

- Aumento de la magnitud de las avenidas entrantes al embalse.
- Aumento de la población aguas abajo del embalse.

. Por ello, los cambios introducidos en el modelo de riesgo recaerán en el nodo:

- Nodo Laminación
- Nodo VidasF
- Nodo VidaNF

Se asume, en base a la información redactada en el punto 2.2.5, la hipótesis de un aumento de la población de manera que:

- Se triplica la población en núcleos urbanos y viviendas aisladas durante el verano.
- Aumento de un 25% de la población en instalaciones para uso público durante el día (piscinas, merenderos, campings, etc...)

- **Cargas**

- **Nodo Avenidas**

La información introducida en el Nodo Avenidas no varía para ninguna variación realizada sobre el Caso Base. Siempre se introducirá de la siguiente forma:

<b>Nodo Avenidas</b>	
<i>Nombre</i>	<i>Avenidas</i>
<i>Tmin.</i>	<i>1</i>
<i>Tmax.</i>	<i>10000</i>

Tabla 39: Datos de entrada del Nodo Avenidas del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 1.

Las proyecciones de los hidrogramas de avenida para el año 2050 suponen incrementos de caudales punta de avenida.

- Para periodo de retorno  $T < 500$  años los incrementos de caudales punta de avenida son de un 13%.
- Para periodos de retorno comprendidos entre 500-1000 años un incremento del 23%.
- Para periodos de retorno  $T > 1000$  incrementos del 40% en los caudales punta de avenida.

<b>Periodo de Retorno [años]</b>	<b>Caudal Pico [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Volumen [m<sup>3</sup>]</b>
2.33	2.26	33900
5	8.023	113000
10	14.351	192100
25	24.973	316400
50	34.126	429400
100	44.748	565000
500	79.95	996300
1000	95.817	1193100
5000	155.54	1932000
10000	177.1	177100000

Tabla 40 Avenidas entrantes al embalse 1 para el escenario CAMBIO CLIMÁTICO

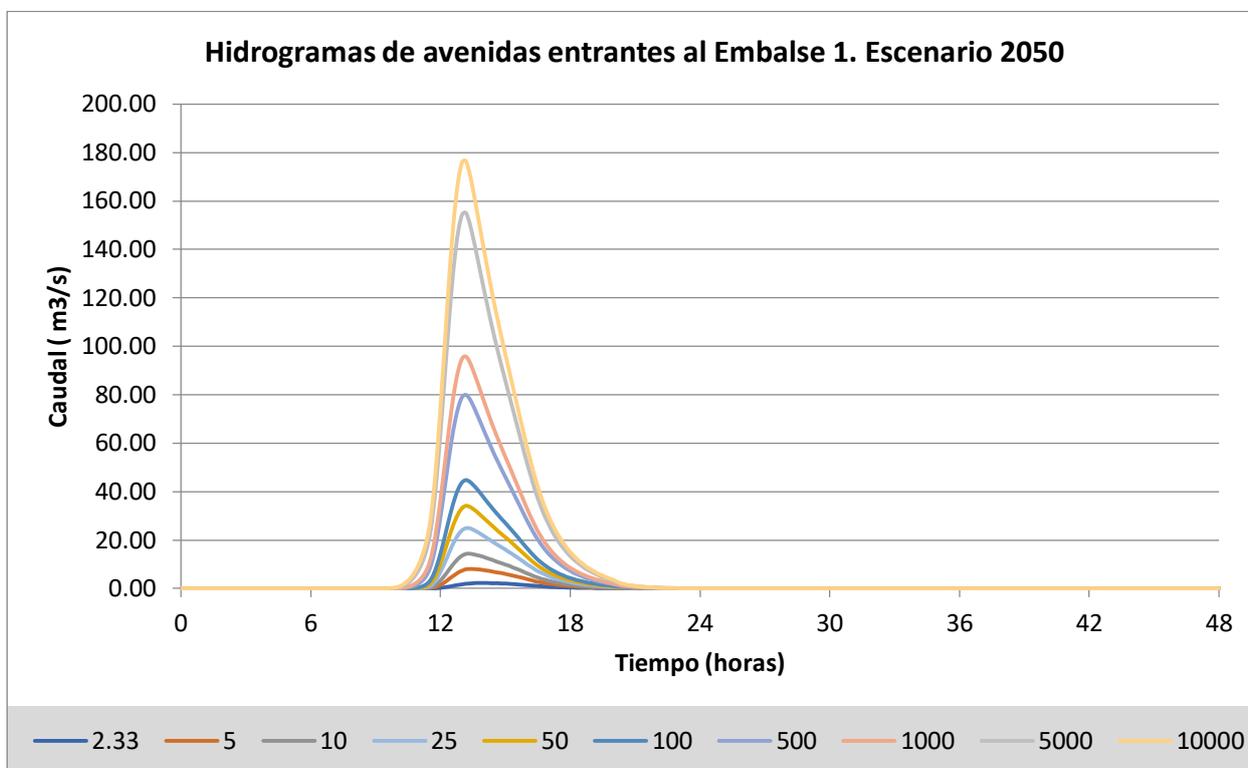


Ilustración 35: Hidrogramas de Avenidas entrantes al Embalse 1 para el escenario 2050.

#### ▪ **Nodo Laminación**

Una vez obtenidos todos los datos, se simula la laminación con las nuevas avenidas incrementadas y se extrae de ella una hoja de cálculo para todas las combinaciones, obteniéndose para todas, el nivel máximo alcanzado en el embalse (MaxWL) y el caudal laminado máximo (QNo\_Fallo).

La hoja de cálculo que se adjunta en el nodo laminación tiene la estructura de la siguiente tabla para T10000.

<b>T</b>	<b>AEP</b>	<b>PrevWL</b>	<b>OpA</b>	<b>OpDF</b>	<b>MaxWL</b>	<b>QNo_Fallo</b>
10000.00	0.00	572.50	1.00	0.00	581.22	81.76
10000.00	0.00	573.50	1.00	0.00	581.23	86.66
10000.00	0.00	574.50	1.00	0.00	581.25	91.75
10000.00	0.00	575.50	1.00	0.00	581.27	98.90
10000.00	0.00	576.50	1.00	0.00	581.29	106.21
10000.00	0.00	577.50	1.00	0.00	581.32	115.26
10000.00	0.00	578.47	1.00	0.00	581.34	123.73
10000.00	0.00	578.94	1.00	0.00	581.35	128.33

Tabla 41 Estructura del fichero de Microsoft Excel utilizado para introducir los datos de la laminación al modelo. Escenario 2050

A continuación se representan gráficamente los resultados obtenidos para el escenario 2050.

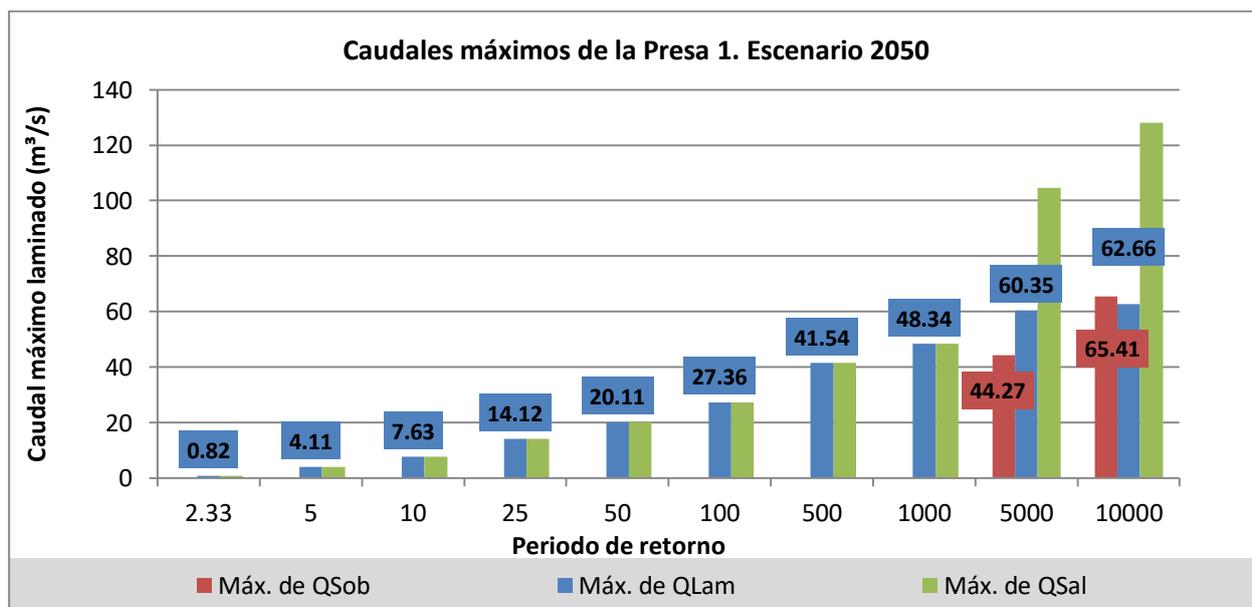


Ilustración 36 Representación de los caudales máximos para cada periodo de retorno asociado de la presa 1 para Escenario 2050. Fuente: Elaboración propia.

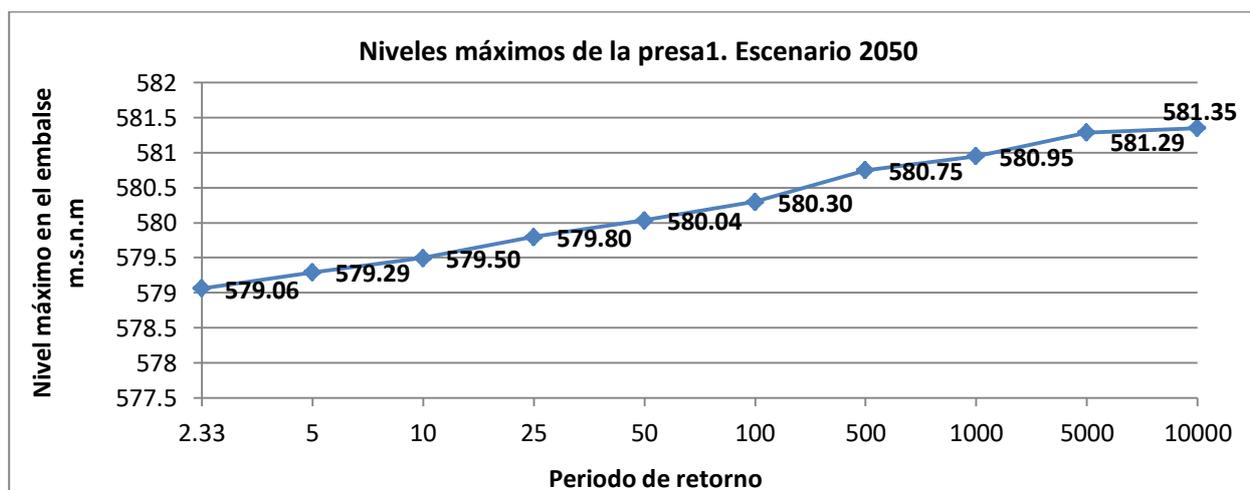


Ilustración 37 Representación de los niveles máximos alcanzados asociados cada periodo de retorno de la Presa1 para el Escenario 2050. Fuente: Elaboración propia

Si se comparan las tablas de los resultados de la laminación para el Caso Base y para el Escenario 2050 se observa que la altura máxima de sobrevertido pasa de 11 cm a alcanzar los 28 cm para la avenida de periodo de retorno igual a 10000 años.

- **Respuesta del Sistema**

En los nodos asociados a este bloque del modelo de riesgo se han seguido las mismas hipótesis que para el Caso Base.

- **Consecuencias:**

El estudio de las consecuencias realizado en el escenario 2050 se ha realizado directamente con la metodología SUFRI[1], considerando un aumento de la población estacional.

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos de las pérdidas de vidas potenciales asociadas a la Presa 1 en el Escenario 2050.

SUFRI_ Categoría C.3	Qmax (m3/s)	NÚMERO DE VÍCTIMAS INVIERNO-DIA	NÚMERO DE VÍCTIMAS VERANO-DIA	NÚMERO DE VÍCTIMAS INVIERNO-NOCHE	NÚMERO DE VÍCTIMAS VERANO -NOCHE
H0	1.30	0.00	0.00	0.00	0.00
H1	1431.00	72.35	434.08	90.81	544.86
H2	2005.00	261.86	1571.18	272.44	1634.64

Tabla 42 Cálculo de pérdida de vidas. Metodología SUFRI de la presa 1 para el escenario CAMBIO CLIMÁTICO

Si comparamos los resultados respecto al del caso base se extrae que:

- El aumento de las consecuencias coincide con los periodos en los cuales se produce aumento de población aguas abajo de la presa (verano y día para para instalaciones públicas, y verano y noche para viviendas).
- En las condiciones donde se producen víctimas, el incremento de ellas respecto del Caso Base suele ser del orden del 33.35 %.

Una vez calculados los resultados ya se dispone de la información necesaria para introducir en los nodos Vidas F y Vidas NF.

▪ **Nodo Vidas F**

<i>Estación</i>	<i>Momento</i>	<i>QFallo</i>	<i>Pérdida de Vidas F</i>
<i>Verano</i>	<i>Dia</i>	<i>1.30</i>	<i>0</i>
<i>Verano</i>	<i>Dia</i>	<i>1431.00</i>	<i>435</i>
<i>Verano</i>	<i>Dia</i>	<i>2005.00</i>	<i>1572</i>
<i>Verano</i>	<i>Noche</i>	<i>1.30</i>	<i>0</i>
<i>Verano</i>	<i>Noche</i>	<i>1431.00</i>	<i>545</i>
<i>Verano</i>	<i>Noche</i>	<i>2005.00</i>	<i>1635</i>
<i>Invierno</i>	<i>Dia</i>	<i>1.30</i>	<i>0.00</i>
<i>Invierno</i>	<i>Dia</i>	<i>1431.00</i>	<i>73</i>
<i>Invierno</i>	<i>Dia</i>	<i>2005.00</i>	<i>262</i>
<i>Invierno</i>	<i>Noche</i>	<i>1.30</i>	<i>0</i>
<i>Invierno</i>	<i>Noche</i>	<i>1431.00</i>	<i>91</i>
<i>Invierno</i>	<i>Noche</i>	<i>2005.00</i>	<i>273</i>

Tabla 43: Datos de entrada del Nodo Vidas F del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 1 para el escenario 2050

▪ **Nodo Vidas NF**

<i>Estación</i>	<i>Momento</i>	<i>QFallo</i>	<i>Pérdida de Vidas F</i>
<i>Verano</i>	<i>Dia</i>	<i>1.30</i>	<i>0.00</i>
<i>Verano</i>	<i>Dia</i>	<i>1431.00</i>	<i>434.08</i>
<i>Verano</i>	<i>Dia</i>	<i>2005.00</i>	<i>1571.18</i>
<i>Verano</i>	<i>Noche</i>	<i>1.30</i>	<i>0.00</i>
<i>Verano</i>	<i>Noche</i>	<i>1431.00</i>	<i>544.86</i>
<i>Verano</i>	<i>Noche</i>	<i>2005.00</i>	<i>1634.64</i>
<i>Invierno</i>	<i>Dia</i>	<i>1.30</i>	<i>0.00</i>
<i>Invierno</i>	<i>Dia</i>	<i>1431.00</i>	<i>72.35</i>
<i>Invierno</i>	<i>Dia</i>	<i>2005.00</i>	<i>261.86</i>
<i>Invierno</i>	<i>Noche</i>	<i>1.30</i>	<i>0.00</i>
<i>Invierno</i>	<i>Noche</i>	<i>1431.00</i>	<i>90.81</i>
<i>Invierno</i>	<i>Noche</i>	<i>2005.00</i>	<i>272.44</i>

Tabla 44 Datos de entrada del Nodo Vidas NF del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 1 para el escenario 2050

### **Consecuencias Económicas**

Al variar la población en el nuevo escenario, los costes directos e indirectos correspondientes al coste de inundación se incrementarán debido al aumento del coste asociado al lucro cesante por abastecimiento alternativo.

- **Nodo Daños F**

<b>QFallo</b>	<b>DañosF</b>
1.30	24.41
1431	62.27
2005	62.28

*Tabla 45: Datos de entrada del Nodo Daños F del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 1*

- **Nodo Daños NF**

<b>QNo_Fallo</b>	<b>DañosNF</b>
1.30	0.00
1431	37.51
2005	37.52

*Tabla 46: Datos de entrada del Nodo Daños NF del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 1*

### 3.1.4 Calculo del Riesgo

#### 3.1.4.1 Escenario actual: CASO BASE

En el escenario correspondiente al Caso Base, lo que se busca es evaluar la situación actual del sistema y a partir de ahí estudiar la interacción que ejercen sobre él, la aplicación de una serie de medidas orientadas a reducir el riesgo.

De todos los resultados en términos de riesgo y probabilidad que proporciona el programa, se prestará especial atención a los sombreados en la siguiente tabla:

- Probabilidad de Fallo: Utilizado para calcular el coste incremental.
- El riesgo incremental social y económico: Utilizados para calcular el indicador ACSLS (Capítulo 2.2.10)

<i>Resultado del Riesgo</i>	<i>Resultado del Riesgo</i>
<i>Riesgo Económico Total [M€/año]</i>	<i>3.45E-04</i>
<i>Riesgo Social Total [Vidas/año]</i>	<i>5.00E-02</i>
<i>Probabilidad de Fallo [1/año]</i>	<i>5.10E-06</i>
<i>Riesgo Económico de Fallo [M€/año]</i>	<i>1.25E-04</i>
<i>Riesgo Social de Fallo [Vidas/año]</i>	<i>1.82E-03</i>
<i>Riesgo Económico de No Fallo [Vidas/año]</i>	<i>2.19E-04</i>
<i>Riesgo Social de No Fallo [Vidas/año]</i>	<i>4.82E-02</i>
<i>Riesgo Económico Incremental [M€/año]</i>	<i>1.25E-04</i>
<i>Riesgo Social Incremental [Vidas/año]</i>	<i>1.79E-03</i>

Tabla 47 Probabilidades y Riesgos asociados al escenario Caso Base de la Presa 1

### 3.1.4.2 Escenario futuro: CAMBIO CLIMÁTICO + CAMBIO SOCIOECONÓMICO

<i>Resultado del Riesgo</i>	<i>Resultado del Riesgo</i>
<i>Riesgo Económico Total [M€/año]</i>	2.91E-03
<i>Riesgo Social Total [Vidas/año]</i>	1.97E-01
<i>Probabilidad de Fallo [1/año]</i>	1.00E-04
<i>Riesgo Económico de Fallo [M€/año]</i>	2.58E-03
<i>Riesgo Social de Fallo [Vidas/año]</i>	2.58E-03
<i>Riesgo Económico de No Fallo [Vidas/año]</i>	3.27E-04
<i>Riesgo Social de No Fallo [Vidas/año]</i>	1.26E-01
<i>Riesgo Económico Incremental [M€/año]</i>	2.57E-03
<i>Riesgo Social Incremental [Vidas/año]</i>	6.97E-02

Tabla 48 Probabilidades y Riesgos asociados al escenario Futuro de la Presa 1

Se puede apreciar, observando las dos tablas anteriores, el incremento de riesgo que se produce en el escenario futuro.

### 3.1.5 Representación y Evaluación del Riesgo para los escenarios

En este trabajo, la representación y evaluación del riesgo se ha realizado en términos de riesgo incremental. Sólo cuando este valor presenta valores nulos se ha realizado la evaluación términos de riesgo total.

Por la definición de riesgo incremental:

$$Riesgo Incremental = Prob. Fallo * (Consecuencias Rotura - Consecuencias No Rotura)$$

Puede pasar, que en determinadas situaciones el riesgo incremental sea nulo, esto se atribuye, en este trabajo, a que la probabilidad de fallo asociada sea nula. Esto no significa que el riesgo asociado al escenario en cuestión sea nulo: En este caso el riesgo en términos de riesgo incremental puede ser nulo pero no así en términos de riesgo de inundación.

A continuación, se detallan y comparan la gráfica fN y la curva FN para los dos escenarios estudiados: Escenario actual y Escenario 2050:

▪ **Gráfico fN:**

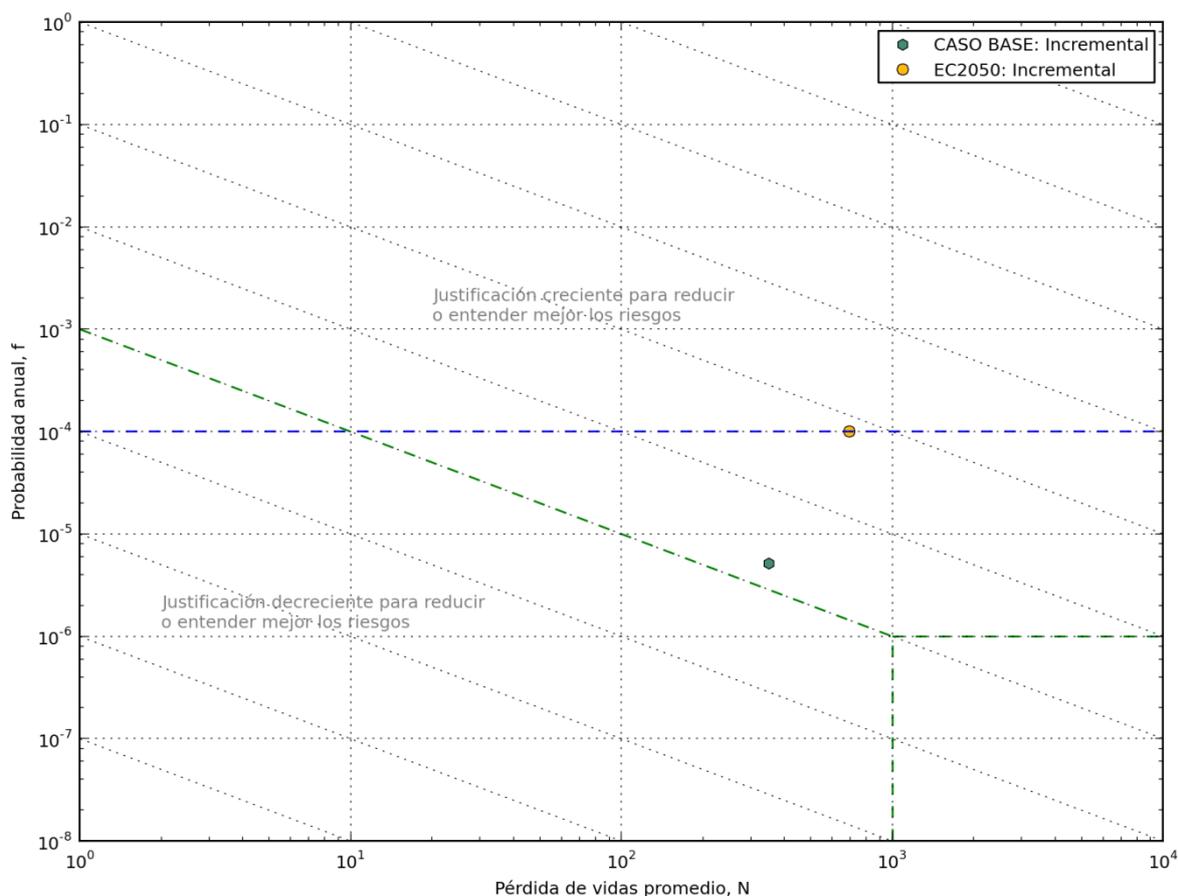


Ilustración 38 Gráfico fN para el Caso Base y Escenario Futuro basándose en las recomendaciones de tolerabilidad de riesgo propuestas por el USBR en el año 2011

A partir del gráfico fN asociado a los dos escenarios podemos deducir:

- El riesgo para el escenario futuro está ubicado en la parte superior y desplazado hacia la derecha respecto de la representación del riesgo del escenario del caso base. Superior porque al aumentar las avenidas entrantes al embalse la presa alcanza un valor de nivel más alto produciendo un aumento de la probabilidad de fallo, y desplazado hacia la derecha porque al aumentar el número de población expuesta al riesgo aumentan sus consecuencias sociales.
- El escenario actual está alineado con las recomendaciones de tolerabilidad USBR en términos de probabilidad de fallo propuestas por el USBR pero no en términos de riesgo social por lo que es recomendable aplicar medidas para la reducción del riesgo en el caso base. En cambio, el escenario futuro muestra un resultado que radica justo en la línea de la recomendación de riesgo individual.

▪ Curva FN

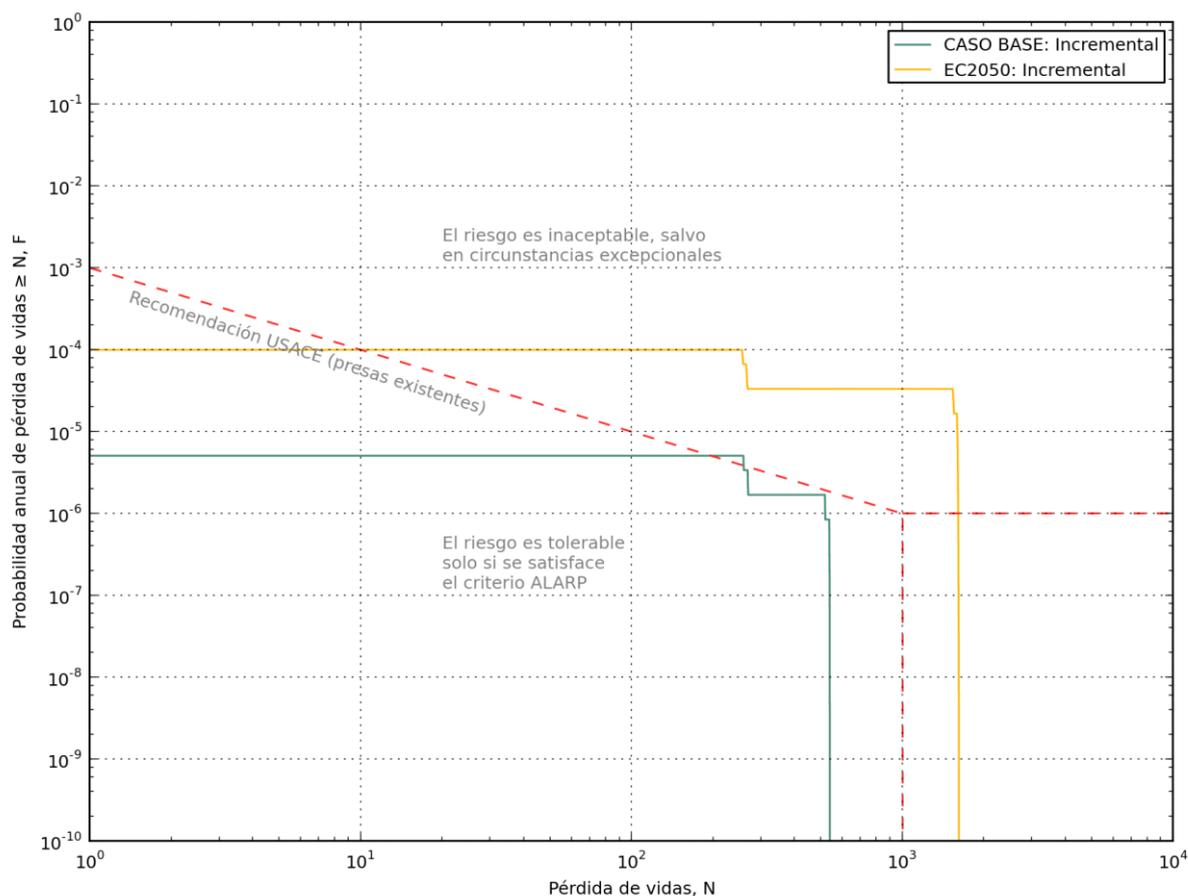


Ilustración 39: Curvas FN para el Caso Base y Escenario Futuro asociadas a las Recomendaciones de tolerabilidad de riesgo social propuesta por el USACE

A partir del gráfico FN asociado a los dos escenarios podemos deducir:

- El escenario actual excede ligeramente el umbral del área encerrada por las limitaciones de máximas consecuencias tolerables recomendadas por la USACE. De ahí que el riesgo asociado al caso base pueda definirse como Riesgo Tolerable, aunque en este caso es recomendable la aplicación de medidas para la reducción del riesgo.
- El escenario futuro no está alineado con las recomendaciones de tolerabilidad USACE y por tanto sería necesario aplicar medidas de reducción de riesgo.

### 3.1.6 Planteamiento de medidas de reducción del riesgo

Con el objetivo de reducir el riesgo y mejorar la seguridad de la presa, se han planteado medidas de carácter estructural y no estructural.

A continuación, se identifican las medidas planteadas, indicando el código y acrónimo asociado a cada una de ellas.

<i>Medidas No Estructurales</i>			<i>Medida Estructurales</i>		
<i>Código</i>	<i>Acrónimo</i>	<i>Nombre</i>	<i>Código</i>	<i>Acrónimo</i>	<i>Nombre</i>
02.1	PEP	Plan de Emergencia	02.4	PRE	Pretil
02.2	PFC	Plan de Formación Continua	02.5	ALIVO.5	Rebaje Aliviadero 0.5 m
02.3	MOD	Mejora Operatividad Órganos de Desagüe	02.6	ALIV1	Rebaje Aliviadero 1 m

Tabla 49 Medidas estructurales y no estructurales implantadas sobre los escenarios de la Presa 1.

#### 3.1.6.1 Medida 01.1 Plan de Emergencia

Esta mejora consiste en la implantación del Plan de Emergencia para la Presa 1, 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.

Como se ha detallado en el Capítulo 02, la Presa 1 es de categoría A, por ello, es de obligado cumplimiento la implantación de un Plan de Emergencia asociado.

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 SUFRI [1], en este caso las tasas de mortalidad se obtienen asociadas a la categoría C4 en lugar de la categoría C3 escogida para el caso base.

El coste de implantación se ha estimado en 50.000 €, a partir del coste de implantación del Plan de Emergencia en presas de características similares. Además, el coste anualizado de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en un 10% del valor de implantación, resultando en 5.000 €. El coste anualizado es 7.500 €.

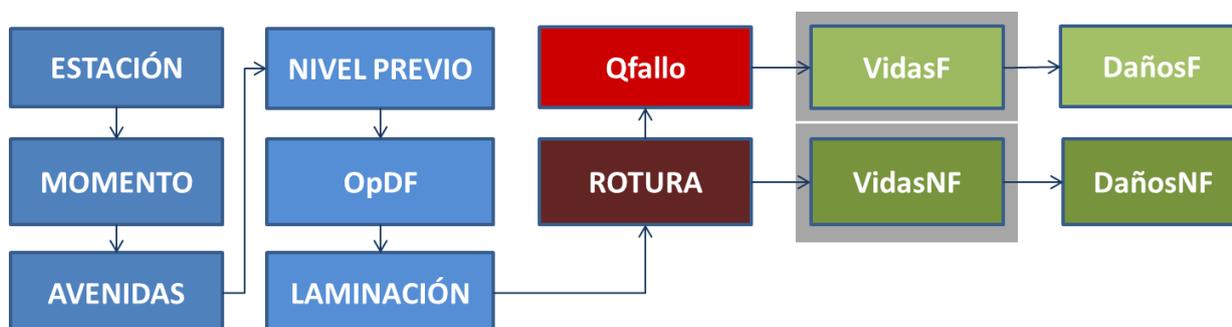


Ilustración 40 Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medida 01.1 de reducción de riesgo planteada en la presa1

### 3.1.6.2 Medida 01.2 Plan de Formación Continua

Como una medida para completar el Plan de Emergencia nace el Programa de Formación Continua a la población aguas abajo de la Presa. Su objetivo se fija en que la población entienda 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 coordinación entre los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad, con el fin de reducir la pérdida de vidas lo máximo posible.

Esta medida se concibe como un complemento al Plan de Emergencia, de manera que no tiene sentido implantarla antes que dicho Plan, es por ello, que a la hora de estudiar el orden de implantación de alternativas, el Plan de Formación llevará asociada una restricción de posición de manera que aunque sea más beneficiosa en términos del indicador utilizado, nunca pueda implantarse antes que el Plan de Emergencia.

Como la alternativa anterior, esta alternativa afecta únicamente a la pérdida de vidas. Por ello, los cálculos realizados de pérdida de vidas se realizan escogiendo para ello la categoría C10 en lugar de la categoría C4 escogida para el Plan de Emergencia.

El coste de implantación de esta alternativa se ha estimado en 15.000 €. El coste aproximado anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto como la mitad del coste de mantenimiento del Plan de Emergencia. Así, el coste anual de mantenimiento de esta medida es de 2.500 €. El coste anualizado es 3.250 €.

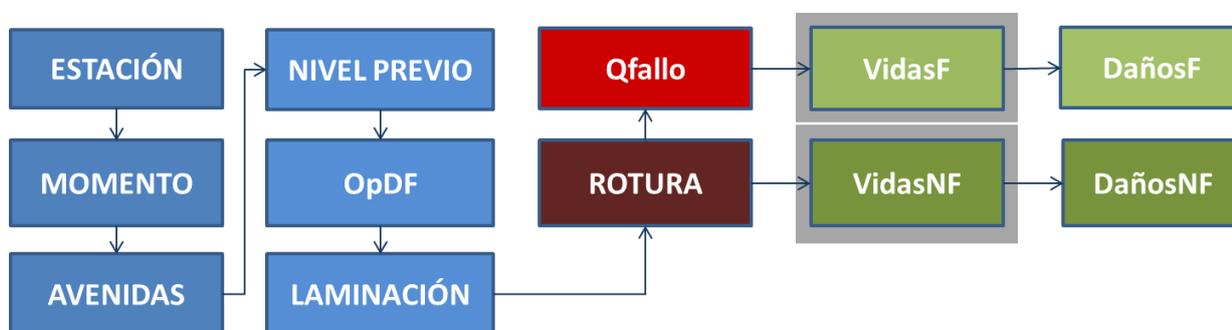


Ilustración 41 Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medida 01.2 de reducción de riesgo planteada en la presa 1.

### 3.1.6.3 Medida 01.3 Mejora de Operatividad de los Órganos de Desagüe

En el escenario actual, el régimen de explotación de la Presa 1 no utiliza ninguno de los dos desagües de fondo para la laminación del agua del embalse.

Con la implantación de esta medida se pretende incorporar la operatividad de los desagües de fondo a las reglas de operación de la presa, dotándola de un mayor margen de maniobras ante avenidas futuras. Esto provoca una disminución de la altura máxima alcanzada en el embalse provocando una reducción en la probabilidad de fallo de la presa. 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 incorporar esta medida en el modelo de riesgo, se ha mejorado la fiabilidad del desagüe de fondo, pasando de tener una fiabilidad del 0% en el caso base a 95% en esta medida, fiabilidad asociada a desagües en buenas condiciones y alto nivel de mantenimiento. La hipótesis utilizada en las reglas de operación para abrir estos desagües son los siguientes:

- Cuando el nivel del embalse supere el N.M.N, y,
- Cuando el ratio de ascenso del nivel en el embalse supere el ratio de ascenso medio de la rama ascendente de las avenidas para las que sobrevierte en el caso base

El coste de implantación de esta alternativa se ha estimado en 25.000 €, a partir del coste de implantación en presas de características similares. El coste anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en 5.000 €. El coste anualizado es 7.500 €.

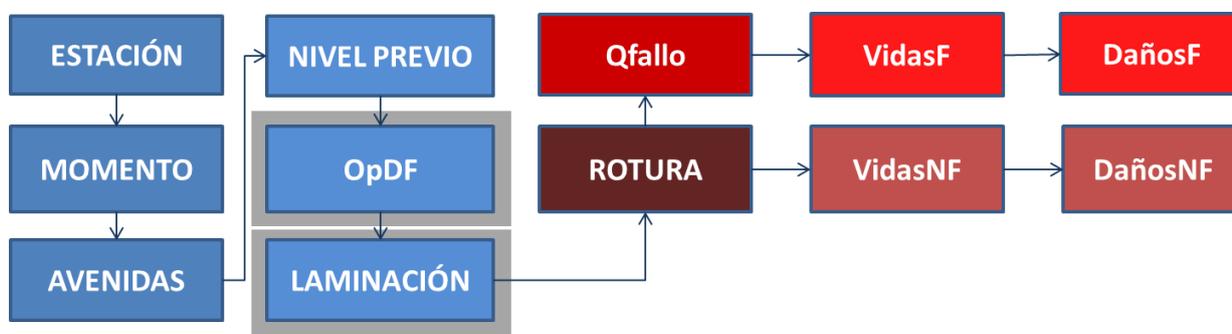


Ilustración 42 Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medida 01.3 de reducción de riesgo planteada en la presa 1.

### 3.1.6.4 Medida 01.4 Instalación de Pretil

Esta alternativa consiste en reforzar y elevar el cuerpo de presa mediante la construcción de un pretil, el cual, 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 0.5 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.

Como hipótesis se considera que el refuerzo de pretil no produce una probabilidad de deslizamiento significativo en la presa.

El coste de implantación del pretil se ha estimado en base al coste de implantación en presas de características similares, considerando un coste de implantación de 37.500 € y un coste de mantenimiento de 500 €. El coste anualizado es 2.375€.

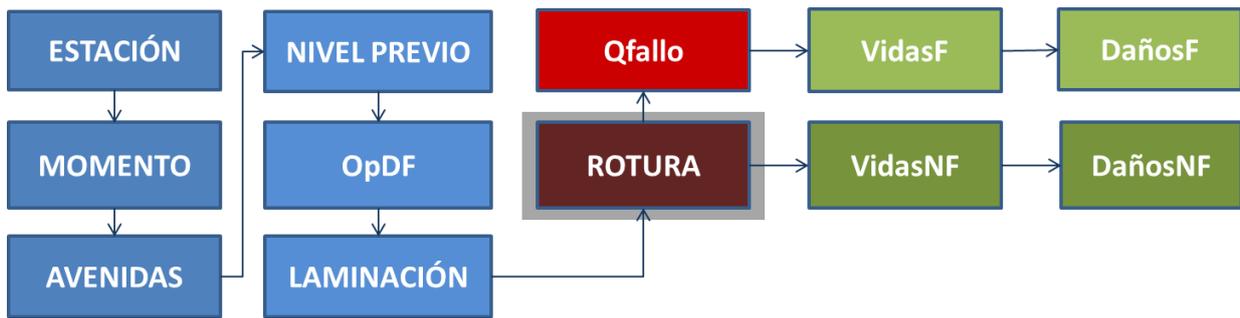


Ilustración 43 Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medida 01.4 de reducción de riesgo planteada en la presa 1.

### 3.1.6.5 Medida 01.5 Rebaje Umbral del Aliviadero en 0.5 metros

En esta medida se ha propuesto el rebaje de la cota del umbral del aliviadero con el objetivo de aumentar la capacidad de desagüe.

Esta medida afecta principalmente al nodo laminación de las avenidas y al nodo Nivel previo, ya que se modifican las curvas de gasto del aliviadero, empezando a verter agua a una cota inferior. Esto provoca una reducción del riesgo por sobrevertido.

La reducción de la cota de salida del agua por aliviadero supone, en contra, una reducción del volumen total almacenado en el embalse, provocando con ello un coste extra asociado al coste de abastecimiento de la población.

El coste de implantación de esta alternativa, en base a proyectos con presas de características similares, se ha asumido en 60.000 € y un coste de mantenimiento igual al coste anual de recurso alternativo unitario multiplicado por el volumen de pérdida de almacenamiento asociado al rebaje del N.M.N. El coste anual de mantenimiento es de 52.788 €. El coste anualizado es 55.787,50 €.

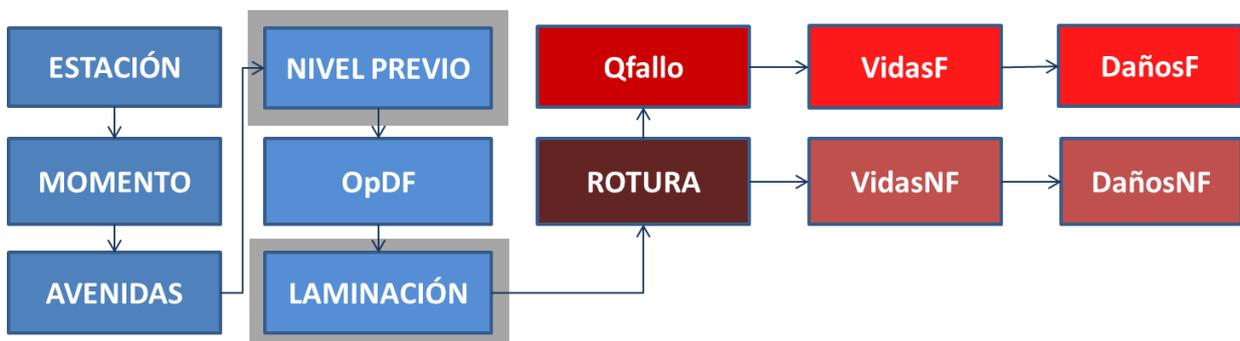


Ilustración 44 Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medida 01.5 y 01.6 de reducción de riesgo planteada en la presa 1

### 3.1.6.6 Medida 01.6 Rebaje Umbral del Aliviadero en 1 metro

Esta medida es análoga a la alternativa anterior. En ella se modifica el rebaje de medio metro a un metro, aumentando aún más la capacidad de desagüe del aliviadero y por otra parte, aumentando los costes de mantenimiento asociados al abastecimiento de la población.

El coste de implantación de esta alternativa, se ha asumido en 80.000 € y coste de mantenimiento anual es el doble que la alternativa anterior, es decir, 95.325 €. El coste anualizado de la medida es de 99.325 €.

### 3.1.7 Representación y Evaluación del Riesgo

En este capítulo se representa y se evalúa el efecto de las medidas de reducción de riesgo aplicadas al escenario base.

Dicha representación se realiza bajo las mismas condiciones que en el capítulo 3.1.5:

- Gráfico FN basándose en las recomendaciones de tolerabilidad de riesgo propuestas por el USBR en el año 2011.
- Curva FN basándose en las recomendaciones de tolerabilidad de riesgo individual y social propuesta por el USACE.

Además de ello, se muestra una tabla con los valores numéricos de riesgo incremental social, riesgo incremental económico y probabilidad de fallo para el escenario actual junto con las medidas de reducción de riesgo.

<b>Nombre</b>	<b>Código</b>	<b>Riesgo Económico Incremental</b>	<b>Riesgo Social Incremental</b>	<b>Probabilidad de Fallo</b>
		[M€/año]	[Vidas/año]	[1/año]
<i>Escenario Actual: Caso Base</i>	<i>CB</i>	<i>1.25E-04</i>	<i>1.79E-03</i>	<i>5.10E-06</i>
<i>Plan de Emergencia</i>	<i>01.1</i>	<i>1.25E-04</i>	<i>1.06E-03</i>	<i>5.10E-06</i>
<i>Plan Formación Continua</i>	<i>01.2</i>	<i>1.25E-04</i>	<i>7.72E-04</i>	<i>5.10E-06</i>
<i>Mejora Operatividad Órganos de Desagüe</i>	<i>01.3</i>	<i>1.11E-04</i>	<i>1.11E-04</i>	<i>4.53E-06</i>
<i>Pretil</i>	<i>01.4</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>Rebaje del Aliviadero 0.5 m</i>	<i>01.5</i>	<i>1.12E-04</i>	<i>1.61E-03</i>	<i>4.58E-06</i>
<i>Rebaje del Aliviadero 1 m</i>	<i>01.6</i>	<i>8.43E-05</i>	<i>1.21E-03</i>	<i>3.44E-06</i>

Tabla 50: Valores de Riesgo asociados al Caso Base y sus Medidas de Reducción del Riesgo

▪ **Gráfico fN**

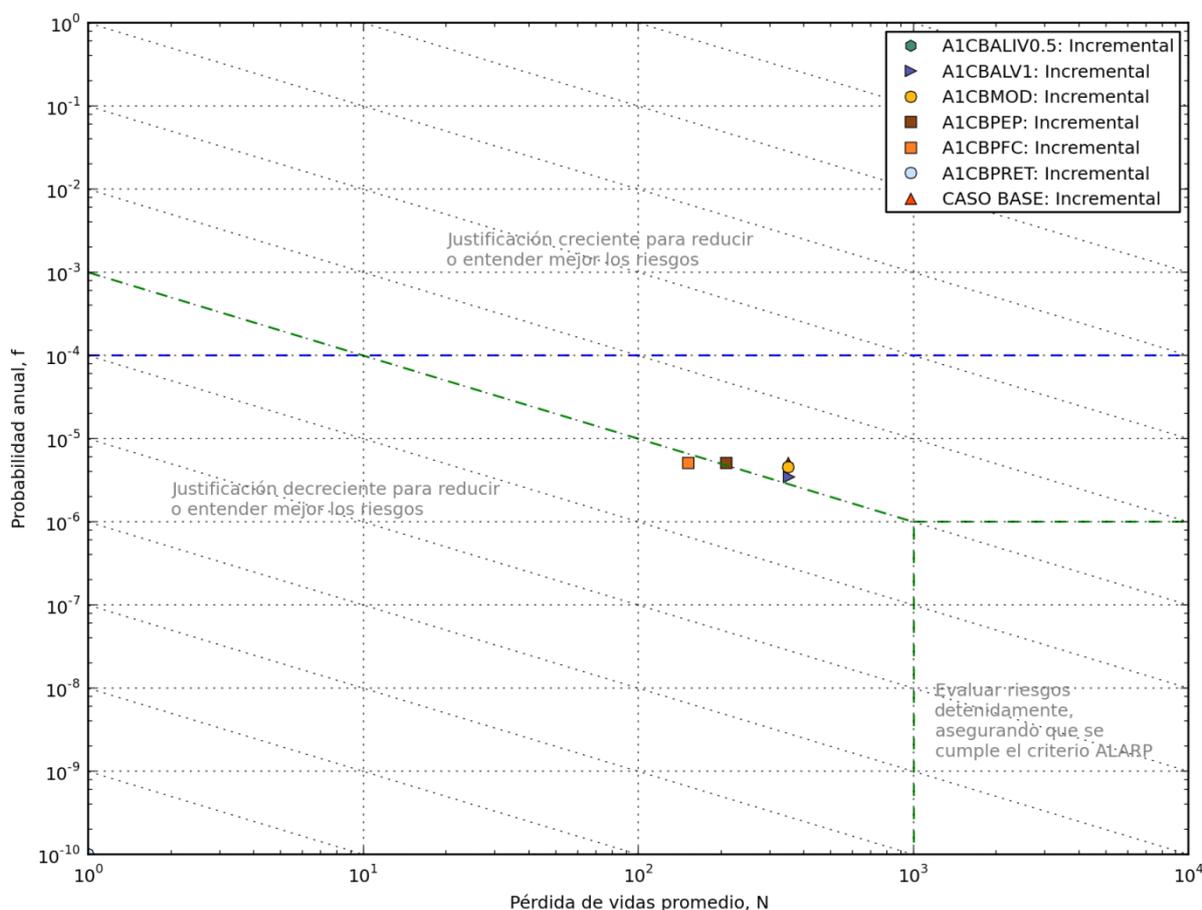


Ilustración 45 Gráfico fN para el Caso Base y Medidas de Reducción de riesgo basándose en las recomendaciones de tolerabilidad de riesgo propuestas por el USBR en el año 2011

Como se puede observar en el gráfico fN, los escenarios con las medidas propuestas no estarían alineados con los límites de tolerabilidad del USBR, a excepción de la medida del pretil que elimina la posibilidad de sobrevertido. El Plan de Emergencia y el Plan de formación Continua son medidas no estructurales asociadas a la seguridad de presas que más reducen las pérdidas de vidas.

▪ **Gráfico FN**

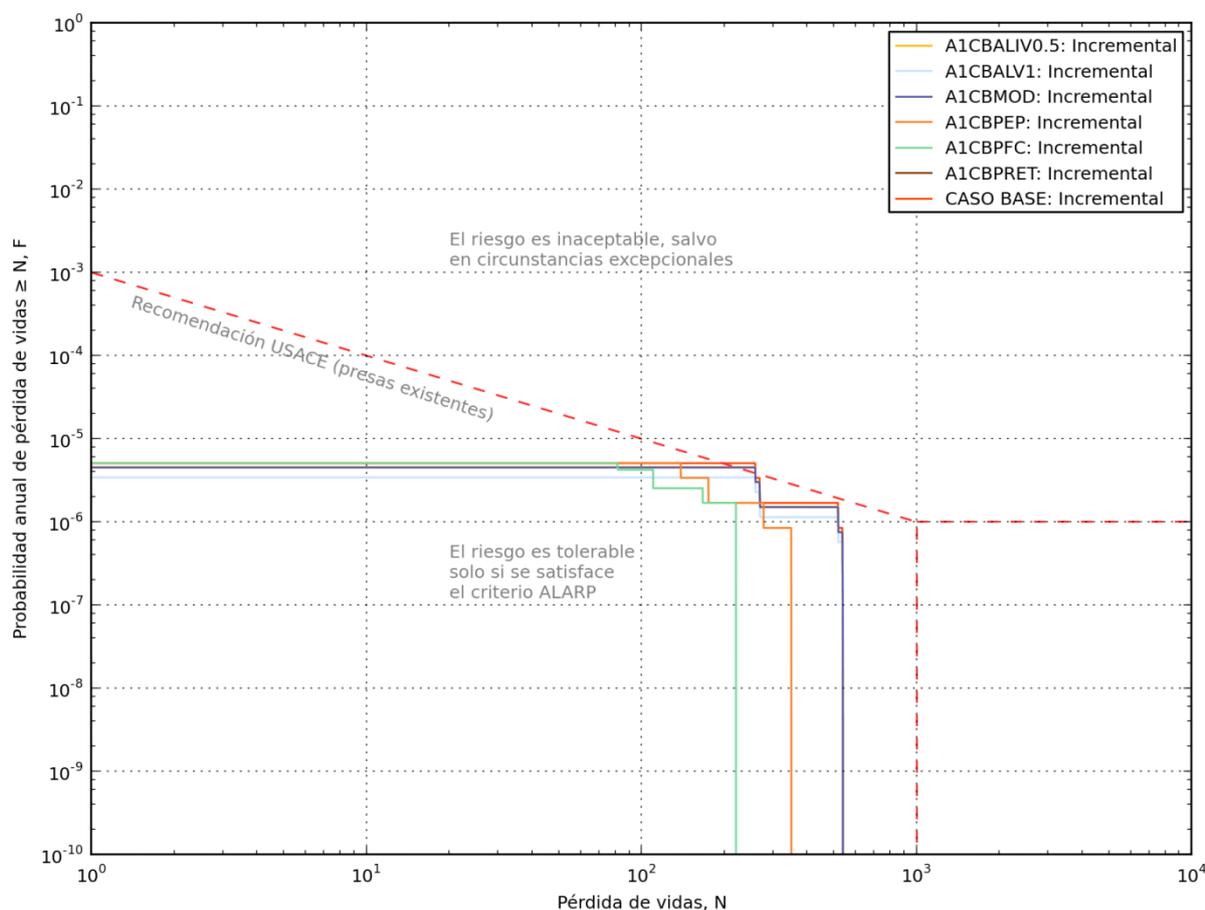


Ilustración 46: Curvas FN para el Caso Base y Medidas de Reducción de riesgo asociadas a las Recomendaciones de tolerabilidad de riesgo social propuesta por el USACE

A partir del gráfico fN y la curva FN asociadas se derivan las siguientes conclusiones:

- Las medidas de reducción de riesgo asociadas a la instalación del pretil, al presentar riesgo incremental cero, no aparece representada en gráfica fN y en la curva FN. Estas alternativas reducen por ellas mismas, a cero, la probabilidad de fallo de la presa por sobreevertido. También destaca la reducción de riesgo que suponen las medidas no estructurales frente a las estructurales.
- Tras la implantación de las medidas planteadas el riesgo estaría alineado con las distintas recomendaciones de tolerabilidad de los dos organismos considerados (USBR y USACE).

### 3.1.8 Gestión de medidas de reducción del riesgo

Una vez obtenidos los valores de riesgo, y a fin de obtener la secuencia de priorización óptima para la reducción del riesgo, se calcula el indicador ACSLS (Capítulo 2.2.10) para cada medida de reducción de riesgo establecida.

Es necesario recordar, que además del indicador ACSLS se deben considerar unos intervalos de justificación de las medidas, los cuales se muestran a continuación:

- Entre 0 y 6.1 M€ la medida se encuentra muy fuertemente justificada.
- Entre 6.1 y 24.2 M€ la medida se encuentra fuertemente justificada.
- Entre 24.2 y 121.2 M€ la medida se encuentra moderadamente justificada.
- Más de 121.2 M€ la medida está poco justificada.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

<i>Nombre</i>	<i>Código</i>	<i>Coste Anualizado</i> <i>[M€/año]</i>	<i>ACSLs</i> <i>[M€/Vida]</i>
<i>Plan de Emergencia</i>	<i>01.1</i>	<i>7.50E-03</i>	<i>10.32</i>
<i>Plan Formación Continua</i>	<i>01.2</i>	<i>3.25E-03</i>	<i>3.19</i>
<i>Mejora Operatividad Órganos de Desagüe</i>	<i>01.3</i>	<i>7.50E-03</i>	<i>4.46</i>
<i>Pretil</i>	<i>01.4</i>	<i>2.38E-03</i>	<i>1.26</i>
<i>Rebaje del Aliviadero 0.5 m</i>	<i>01.5</i>	<i>5.58E-02</i>	<i>305.38</i>
<i>Rebaje del Aliviadero 1 m</i>	<i>01.6</i>	<i>9.93E-02</i>	<i>170.72</i>

*Tabla 51: Indicador ACSLS asociado a las medidas de reducción de riesgo asociadas al Caso Base.*

El indicador ACSLS representa el coste ajustado por vida estadística salvada, por ello, a menor valor de indicador más ventajosa es la implantación de la medida.

Partiendo de esta hipótesis, a simple vista, en la tabla anterior se puede observar que la implantación del pretil sobre el cuerpo de presa presenta el valor más bajo de indicador y por lo tanto se situará como primera medida a implantar.

Por otra parte, las medidas de rebaje de aliviadero presentan valores de indicador por encima de 121.1 M€, es por ello que serán medidas difíciles de justificar por el alto precio que se necesita invertir para reducir el riesgo social.

En el siguiente capítulo se estudia en detalle la priorización de estas medidas, en función del indicador ACSLS.

### 3.1.9 Priorización de medidas

La secuencia de priorización de medidas se ha realizado en base a las siguientes hipótesis:

- No hay restricción presupuestaria: Se asume que se dispone de todo el presupuesto necesario para realizar, a día de hoy, todas las medidas planteadas.
- Se realiza la priorización en base a la eficiencia económica y social de las medidas de reducción de riesgo.

La tabla siguiente muestra los resultados de la priorización.

<b>PRIORIZACIÓN DE MEDIDAS DE REDUCCIÓN DEL RIESGO RESPECTO DEL ESCENARIO ACTUAL: CASO BASE</b>							
Alternativas		PEP	PFC	MOD	PRE	ALIVO.5	ALIV1
Coste Anualizado "Ca"	[M€/año]	7.50E-03	3.25E-03	7.50E-03	5.58E-02	5.58E-02	9.93E-02
Escenario				Caso Base			
Riesgo Económico Incremental	[M€/año]			1.25E-04			
Riesgo Social Incremental	[Vidas/año]			1.79E-03			
Probabilidad de Fallo	[1/año]			5.10E-06			
Alternativas		CB+PEP	CB+PFC	CB+MOD	CB+PRE	CB+ALIVO.5	CB+ALIV1
Riesgo Económico Incremental	[M€/año]	1.25E-04	1.25E-04	1.11E-04	0	1.12E-04	8.43E-05
Riesgo Social Incremental	[Vidas/año]	1.06E-03	7.72E-04	1.11E-04	0	1.61E-03	1.21E-03
Probabilidad de Fallo	[1/año]	5.10E-06	5.10E-06	4.53E-06	0	4.58E-06	3.44E-06
ACSL5	[M€/Vida]	10.32	3.19	4.46	1.26	305.38	170.72

Tabla 52: Priorización de medidas respecto del Escenario actual: Caso Base para la Presa 2

Realizando el primer paso de priorización, se obtiene como medida con mejor indicador la correspondiente a la implantación de un pretil sobre el cuerpo de presa. Debido a que esta alternativa lleva asociada probabilidad de fallo nula, la secuencia de priorización para el escenario actual, en términos de reducción del riesgo incremental, finalizaría en este paso.

Para las hipótesis realizadas y el modelo planteado, se puede decir, que únicamente es necesario aplicar la alternativa de pretil para reducir a cero el sobrevertido de agua por coronación y por tanto reducir a cero la probabilidad de fallo de la presa por sobrevertido. E

La implantación del pretil reduce la probabilidad de fallo a cero, pues anula la probabilidad asociada al sobrevertido, pero no asegura que el riesgo de la población aguas abajo también lo sea. Para conocer esta influencia aguas abajo, se va a estudiar la implantación del pretil en términos de reducción de riesgo total.

La siguiente tabla muestra el comportamiento del riesgo total asociado a la implantación de estas tres medidas sobre el escenario actual:

	<b>Riesgo Total Social</b>	<b>Riesgo Total Económico</b>	<b>Reducción Riesgo Social</b>	<b>Reducción Riesgo Económico</b>
	[Vidas/año]	[M€/año]	[Vidas/año]	[M€/año]
<b>CB</b>	<b>5.00E-02</b>	<b>3.45E-04</b>		
<b>CB+PRE</b>	<b>4.81E-02</b>	<b>2.19E-04</b>	<b>1.9E-03</b>	<b>-1.845E-03</b>

Tabla 53: Reducción del Riesgo Total para 3 alternativas respecto el escenario base actual.

De esta tabla se pueden extraer algunas conclusiones:

- EL Pretil reduce el riesgo por sobrevertido, pero no anula el riesgo total asociado a la inundación. No obstante, sí lo reduce, al igual que el riesgo económico.

Una vez estudiado el escenario actual y visto que la implantación del pretil anula el riesgo en términos de sobrevertido, se estudia que ocurre para escenarios futuros, es decir, teniendo en cuenta el efecto del cambio climático y el aumento de la población estacional. Para responder a ello, se realiza la priorización de todas las alternativas para el escenario futuro, partiendo de la situación “Escenario futuro + pretil” como base de este argumento.

Bajo esta nueva hipótesis de partida, en las siguientes ilustraciones se muestra el riesgo incremental obtenido en base a los siguientes criterios:

- Gráfico FN basándose en las recomendaciones de tolerabilidad de riesgo propuestas por el USBR en el año 2011.
- Curva FN basándose en las recomendaciones de tolerabilidad de riesgo social propuesta por el USACE.

▪ **Gráfico fN**

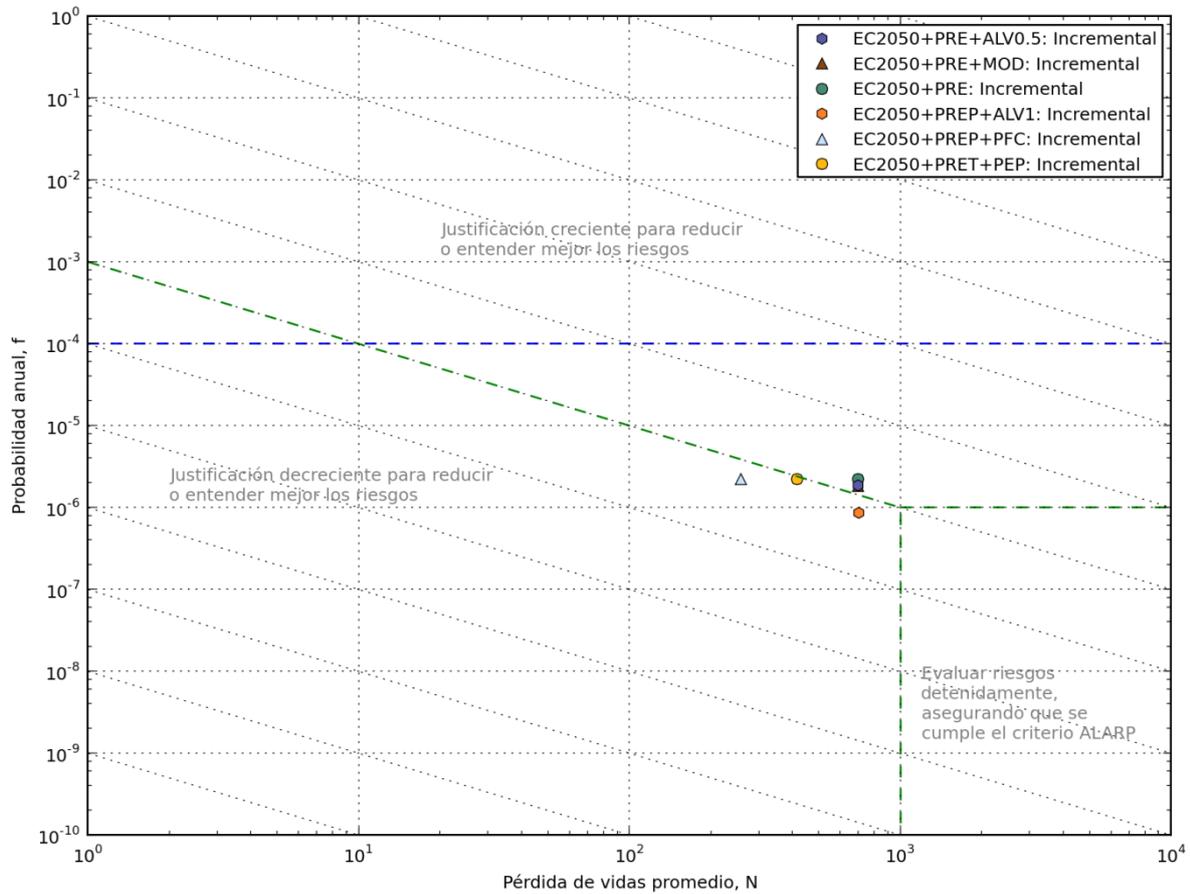


Ilustración 47 Gráfico fN para el escenario futuro y Medidas de Reducción de riesgo basándose en las recomendaciones de tolerabilidad de riesgo propuestas por el USBR en el año 2011

Como se observa, el riesgo social obtenido no estaría alineado con las recomendaciones de tolerabilidad por lo que resulta conveniente implantar algunas de las medidas planteadas.

▪ **Gráfico FN**

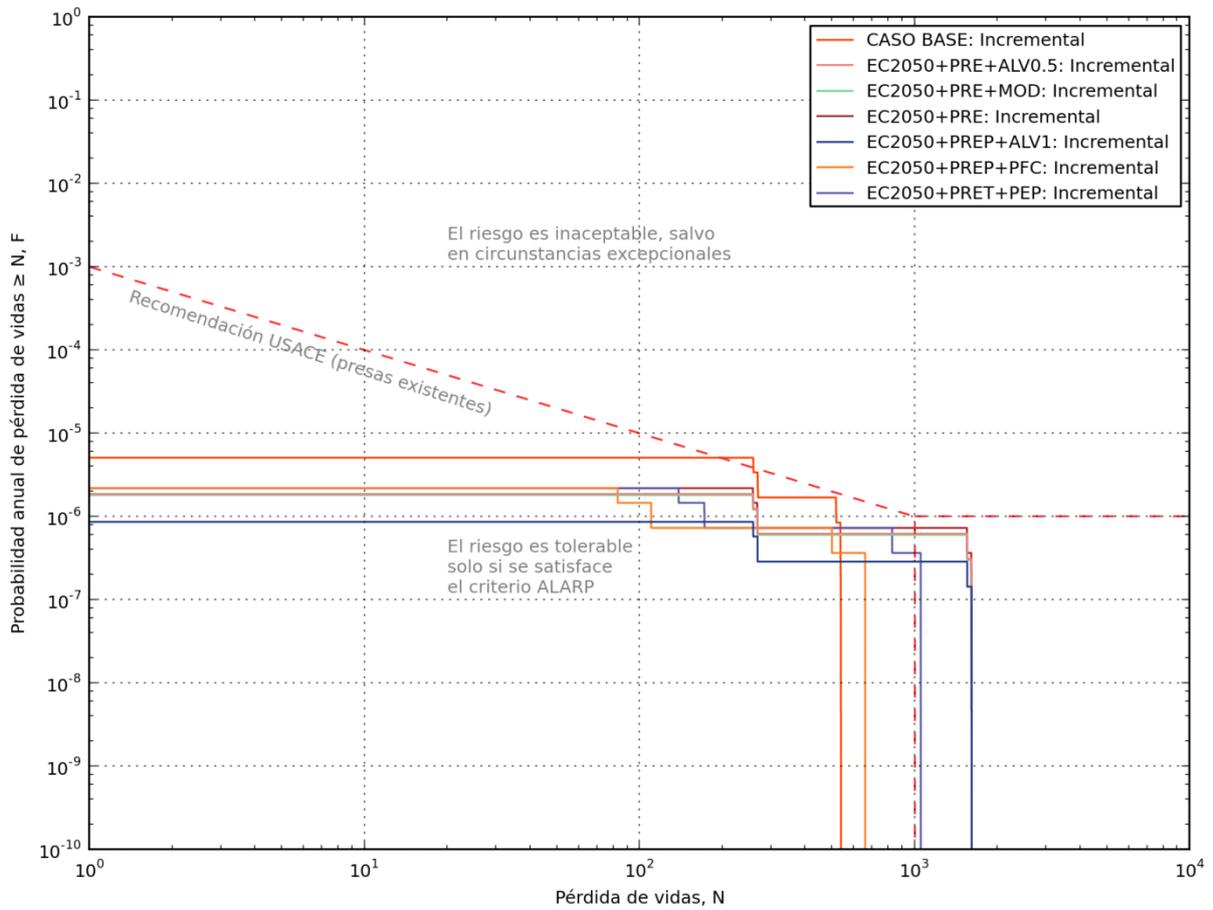


Tabla 54: Curvas FN para el Futuro y Medidas de Reducción de riesgo asociadas a las Recomendaciones de tolerabilidad de riesgo social propuesta por el USACE

Una vez obtenidos los cálculos del riesgo de cada medida, se procede a la obtención de la secuencia de implantación en base al indicador ACSLS.

A continuación se muestra la secuencia de priorización de medidas de reducción de riesgo.

<b>PRIORIZACIÓN DE MEDIDAS DE REDUCCIÓN DEL RIESGO RESPECTO DEL ESCENARIO 2050</b>							
		PEP	PFC	MOD	PRE	ALIVO.5	ALIV1
Coste Anualizado Ca	[M€/año]	7.50E-03	3.25E-03	7.50E-03	5.58E-02	5.58E-02	9.93E-02
<b>PASO</b>	<b>1</b>	<b>EC2050+PRE</b>					
Riesgo Económico Incremental	[M€/año]	5.65E-05					
Riesgo Social Incremental	[Vidas/año]	1.54E-03					
Probabilidad de Fallo	[1/año]	2.20E-06					
<b>Alternativas</b>		<b>EC2050 + PRE + PEP</b>	<b>EC2050 + PRE + PFC</b>	<b>EC2050 + PRE + MOD</b>	<b>EC2050 + PRE + ALIVO.5</b>	<b>EC2050 + PRE + ALIV1</b>	
Riesgo Económico Incremental	[M€/año]	5.65E-05	1.25E-04	4.66E-05	4.81E-05	2.23E-05	
Riesgo Social Incremental	[Vidas/año]	9.14E-04	7.72E-04	1.27E-03	1.31E-03	6.06E-04	
Probabilidad de Fallo	[1/año]	2.20E-06	5.10E-06	1.81E-06	1.87E-06	8.65E-07	
ACSL5	[M€/Vida]	12.02	4.33	27.78	244.62	106.60	
<b>PASO</b>	<b>2</b>	<b>EC2050 + PRE + PEP</b>					
<b>Alternativas</b>		<b>EC2050 + PRE + PEP + PFC</b>	<b>EC2050 + PRE + PEP + MOD</b>	<b>EC2050 + PRE + PEP + ALIVO.5</b>	<b>EC2050 + PRE + PEP + ALIV1</b>		
Riesgo Económico Incremental	[M€/año]	1.25E-04	4.66E-05	4.81E-05	2.23E-05		
Riesgo Social Incremental	[Vidas/año]	7.72E-04	3.78E-04	3.90E-04	1.80E-04		
Probabilidad de Fallo	[1/año]	5.10E-06	1.81E-06	1.87E-06	8.65E-07		
ACSL5	[M€/Vida]	23.38	13.98	106.53	135.43		
<b>PASO</b>	<b>3</b>	<b>EC2050 + PRE + PEP + PFC</b>					
<b>Alternativas</b>		<b>EC2050 + PRE + PEP + PFC + MOD</b>	<b>EC2050 + PRE + PEP + PFC + ALIVO.5</b>	<b>EC2050 + PRE + PEP + PFC + ALIV1</b>			
Riesgo Económico Incremental	[M€/año]	4.66E-05	3.75E-05	1.40E-05			
Riesgo Social Incremental	[Vidas/año]	2.74E-04	3.00E-04	2.27E-04			
Probabilidad de Fallo	[1/año]	1.81E-06	1.46E-06	5.46E-07			
ACSL5	[M€/Vida]	31.41	723.24	660.04			

Tabla 55: Priorización presa 1 para el escenario futuro

De la tabla anterior se derivan las siguientes conclusiones:

- Las medidas asociadas al rebaje del aliviadero presentan valores muy altos del indicador ACSLS, es decir, representa una medida poco justificada en términos de eficiencia.

Finalmente, el orden de priorización para la presa 1 presenta el siguiente orden:

<b>SECUENCIA DE PRIORIZACIÓN PRESA 1</b>		
<i>ORDEN DE PRIORIZACIÓN</i>	<i>MEDIDAS</i>	<i>ACSLS [M€/vida]</i>
1	<i>CB + PRE</i>	1.26
2	<i>EC2050 + PRE + PEP</i>	12.02
3	<i>EC2050 + PRE + PEP + MOD</i>	13.98
4	<i>EC2050 + PRE + PEP + MOD + PFC</i>	31.41

*Tabla 56 Secuencia de Priorización de Medidas Presa 1*

Como se puede observar en la tabla la primera medida a realizar en el caso base es la implantación del pretil. Seguidamente se traslada la implantación del pretil al escenario 2050, para asegurar que el plan de actuaciones será efectivo en el futuro.

Tras la implantación del pretil se implantará el plan de emergencia, que reducirá significativamente el riesgo social. La siguiente medida es la implantación de la mejora de la operatividad de los órganos de desagüe de fondo. Finalmente la secuencia de actuaciones termina con la implantación del plan de formación continua.

## **3.2 CASO DE ESTUDIO 2: PRESA DE HORMIGÓN**

A continuación, se presenta el estudio detallado del Análisis de riesgo para la Presa 2. En adelante, se detallan los resultados obtenidos tras aplicar la metodología explicada en el Capítulo 02.

### **3.2.1 Descripción Física de la Presa 2**

#### **- Cuerpo de Presa:**

La presa 2 es una presa de gravedad de planta recta, definida por una alineación recta, con una longitud de coronación de 75.20 metros. La coronación se sitúa a una cota de 490.45 m.s.n.m y tiene una anchura de 4.50 metros.

El paramento de aguas arriba de la presa tiene un talud vertical y el de aguas abajo de 0.75. La superficie de cimentación se encuentra a la cota 471.85 m.s.n.m, resultando una altura de presa sobre cimientos de 18.60 m (máxima nivel del agua en la presa antes de sobrevertir).

La presa tiene un paso en coronación por encima del aliviadero, de un solo vano y formado por vigas prefabricadas. El paso sobre el aliviadero tiene la misma anchura que el resto de coronación, es decir, 4.50 metros.

#### **- Sistemas de Desagüe**

##### **- Aliviadero:**

La Presa 2 presenta posee un único aliviadero superficial para evacuación de avenidas, situado en el mismo cuerpo de presa y en posición frontal respecto a la corriente. El aliviadero está formado por un único vano de labio fijo de 15 metros de longitud. Presenta una morfología rectangular con una cota del umbral del aliviadero a la cota 486.50 m.s.n.m.

##### **- Desagües de fondo:**

Está constituido por dos conductos de acero de 600 mm de diámetro. La embocadura de entrada de los desagües es circular y dispone de unas rejillas metálicas para evitar el paso de gruesos a través de los desagües y evitar también posibles atascos de los mismo.

Los conductos tienen una longitud aproximada de 8 metros y tienen el eje de los mismo a la cota 479.40 m.s.n.m, discurriendo sensiblemente horizontales.

##### **- Tomas de Agua:**

Las tomas de agua de la presa consisten en una tubería de acero inoxidable clavada al paramento aguas arriba, de 300 mm de diámetro.

#### **- Descripción del Embalse**

La cota del Nivel Máximo Normal (N.M.N) es la cota 486.50 m.s.n.m, coincidente con el umbral del aliviadero. A dicha cota el volumen de embalse es de 0.7 Hm<sup>3</sup> y la superficie de embalse a dicha cota es de 18 has.

En la siguiente tabla, se muestra a modo de resumen, las características físicas de la Presa 2 y su embalse.

<b>Características Presa 2</b>		
<i>Cuerpo de Presa</i>		
<i>Tipo Presa</i>	<i>Hormigón (Gravedad)</i>	
<i>Longitud/Anchura Coronación</i>	<i>75.20 m</i>	<i>4.50 m</i>
<i>Cota/Altura Coronación</i>	<i>490.45 m.s.n.m</i>	<i>18.60 m</i>
<i>Cota/Altura Cimientos</i>	<i>471.85 m.s.n.m</i>	<i>0 m</i>
<i>Aliviadero</i>		
<i>Tipo Aliviadero</i>	<i>Labio Fijo Rectangular</i>	
<i>Longitud/Altura Aliviadero</i>	<i>15.00 m</i>	<i>3.12 m</i>
<i>Cota/Altura Umbral Aliviadero</i>	<i>486.50 m.s.n.m</i>	<i>14.65 m</i>
<i>Caudal Diseño Aliviadero</i>	<i>167.60 m<sup>3</sup>/s</i>	
<i>Desagües de Fondo</i>		
<i>Número de Conductos</i>	<i>2</i>	
<i>Cota/Altura Conductos</i>	<i>479.40 m.s.n.m</i>	<i>7.55 m</i>
<i>Diámetro por Conducto</i>	<i>600 mm</i>	
<i>Capacidad Desagüe a N.M.N</i>	<i>5.09 m<sup>3</sup>/s</i>	
<i>Embalse</i>		
<i>Nivel Máximo Normal N.M.N</i>	<i>486.50 m.s.n.m</i>	<i>14.65 m</i>
<i>Nivel para la Avenida de Proyecto N.A.P</i>	<i>489.62 m.s.n.m</i>	<i>17.77 m</i>
<i>Nivel para la Avenida Extrema N.A.E</i>	<i>490.21 m.s.n.m</i>	<i>18.36 m</i>
<i>Volumen Embalse N.M.N</i>	<i>0.700 Hm<sup>3</sup></i>	
<i>Volumen Embalse N.A.P</i>	<i>1.460 Hm<sup>3</sup></i>	
<i>Volumen Embalse N.A.E</i>	<i>1.650 Hm<sup>3</sup></i>	

Tabla 57 Resumen Características Físicas de la Presa 2

### 3.2.2 Arquitectura del modelo de riesgo

La arquitectura propuesta se muestra en el siguiente esquema, con el que se trabajará en el resto del trabajo.

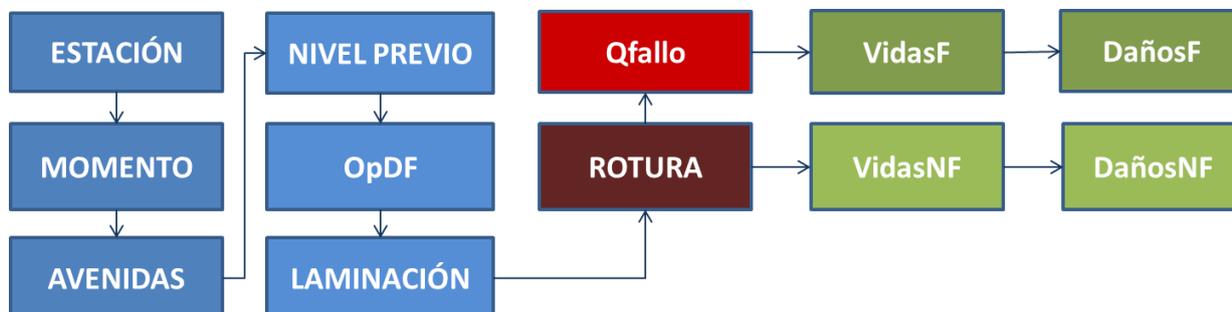


Ilustración 48 Diagrama de influencia empleado para la Presa 2. Fuente: Manual de: iPresas HidSimp[11]

### 3.2.3 Datos de entrada al modelo

A continuación, se describen las características de entrada al modelo de riesgo. Junto con ello, se expondrán todos los resultados asociados al proceso de cálculo realizado a fin de justificar su procedencia.

- Escenario Actual: Caso Base
- Escenario Futuro: Cambio Climático + Cambio Socioeconómico
- 

#### 3.2.3.1 Escenario Actual: Caso Base

- **Cargas**
  - **Nodo Estación**

Para este estudio se ha asumido un periodo de tiempo de 4 meses para verano y 8 meses para invierno, a emplear para la caracterización de la población estacional. Así, las probabilidades asociadas resultan ser:

Probabilidad Verano:  $4 \text{ meses} / 12 \text{ meses} = 0.333$

Probabilidad Invierno:  $8 \text{ meses} / 12 \text{ meses} = 0.667$

De manera que, el nodo introducido en el modelo iPresas HidSimp queda de la siguiente forma:

<b>Nodo Estación</b>	
<i>Nombre</i>	<i>Estación</i>
<i>Prob.Verano</i>	<i>0.333</i>
<i>Prob.Invierno</i>	<i>0.667</i>

Tabla 58 Datos de entrada del Nodo Estación del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 2.

▪ **Nodo Momento**

En el nodo estación se ha asumido que la duración del día y la noche es idéntica en cualquier momento del año, considerándose para el cálculo de tiempos de aviso durante el día y la noche. De esta manera las probabilidades asociadas serán siempre del 50%. El nodo Momento se introduce de la siguiente forma:

<b>Nodo Momento</b>		
<i>Estación</i>	<i>Verano</i>	<i>Invierno</i>
<i>Probabilidad Día</i>	0.5	0.5
<i>Probabilidad Noche</i>	0.5	0.5

*Tabla 59 Datos de entrada del Nodo Momento del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 2*

▪ **Nodo Avenidas**

La presa 2 objeto de estudio está clasificada como presa de categoría A (Guía Técnica “Clasificación de presas en función del riesgo potencial”), por lo tanto, según expresa la Guía Técnica de Seguridad de Presas Nº4 “Avenida de Proyecto”, se recomienda que las avenidas a considerar tengan los siguientes periodos de retorno:

**Avenida de Proyecto:**

Máxima avenida que debe tenerse en cuenta para el dimensionamiento del aliviadero, los órganos de desagüe y las estructuras de disipación de energía de forma que funcionen correctamente. Para presas de Categoría A se recomienda utilizar la avenida de 1.000 años de periodo de retorno.

**Avenida Extrema:**

La mayor avenida que la presa puede soportar. Supone un escenario límite al cual puede estar sometida la presa sin que se produzca su rotura, si bien admitiendo márgenes de seguridad más reducidos. Se recomienda utilizar la avenida de 5.000 años de periodo de retorno en presas de hormigón.

Aunque éstas sean las avenidas recomendadas por la Guía Técnica, el estudio de laminación se realiza también para los siguientes periodos de retorno: 2.33, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 10.000 años.

A continuación se exponen las características de las avenidas entrantes al embalse.

<b>Periodo de Retorno [años]</b>	<b>Caudal Pico [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Volumen [m<sup>3</sup>]</b>
2.33	31.44	1347519
5	44.64	1913271
10	57.13	2448592
25	75.06	3217072
50	89.87	3851829
100	105.81	4535017
200	122.89	5267066
500	147.17	6307707
1000	166.82	7149906
5000	216.65	9268153
10000	243.30	10427855

Tabla 60 Avenidas entrantes al embalse 2

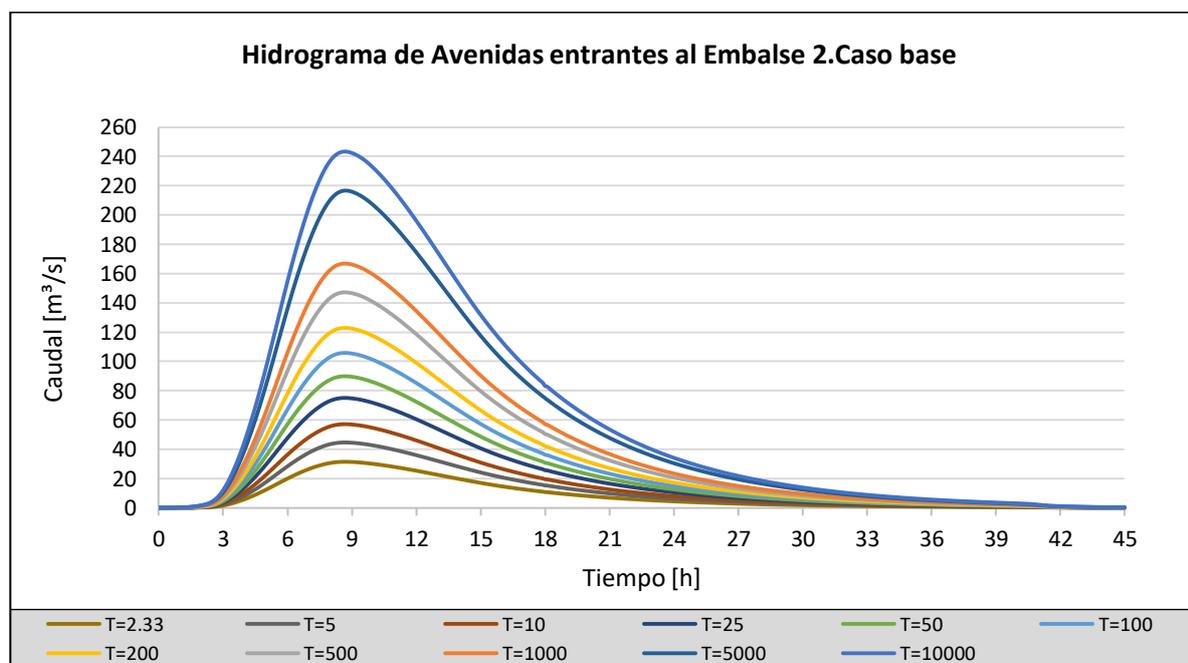


Ilustración 49 Hidrogramas de Avenidas entrantes al Embalse 2

En la página anterior se ha especificado que la laminación del embalse se realiza para avenidas que van desde 2.33 a 10.000 años de periodo de retorno. Sin embargo, para introducir las avenidas en el modelo es necesaria la creación de una avenida ficticia de 1 año de periodo de retorno. Dicha avenida ficticia no genera afección sobre el embalse. El nivel asociado a la avenida coincide con los valores de nivel previo y no produce caudal saliente.

Con la aclaración del párrafo anterior, la laminación se calculará para un  $T_{min} = 1$  y  $T_{máx} = 10.000$  años. Los datos introducidos en el modelo queda de la siguiente forma:

<b>Nodo Avenidas</b>	
<i>Nombre</i>	<i>Avenidas</i>
<i>Tmin [años]</i>	<i>1</i>
<i>Tmax [años]</i>	<i>10000</i>

Tabla 61: Datos de entrada del Nodo Avenidas del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 2.

▪ **Nodo Nivel Previo**

El registro histórico utilizado para obtener la relación entre probabilidad y niveles en el embalse es suficientemente largo (se poseen 803 valores medidos desde la fecha de construcción de la presa hasta la actualidad) y por tanto representativos de su explotación.

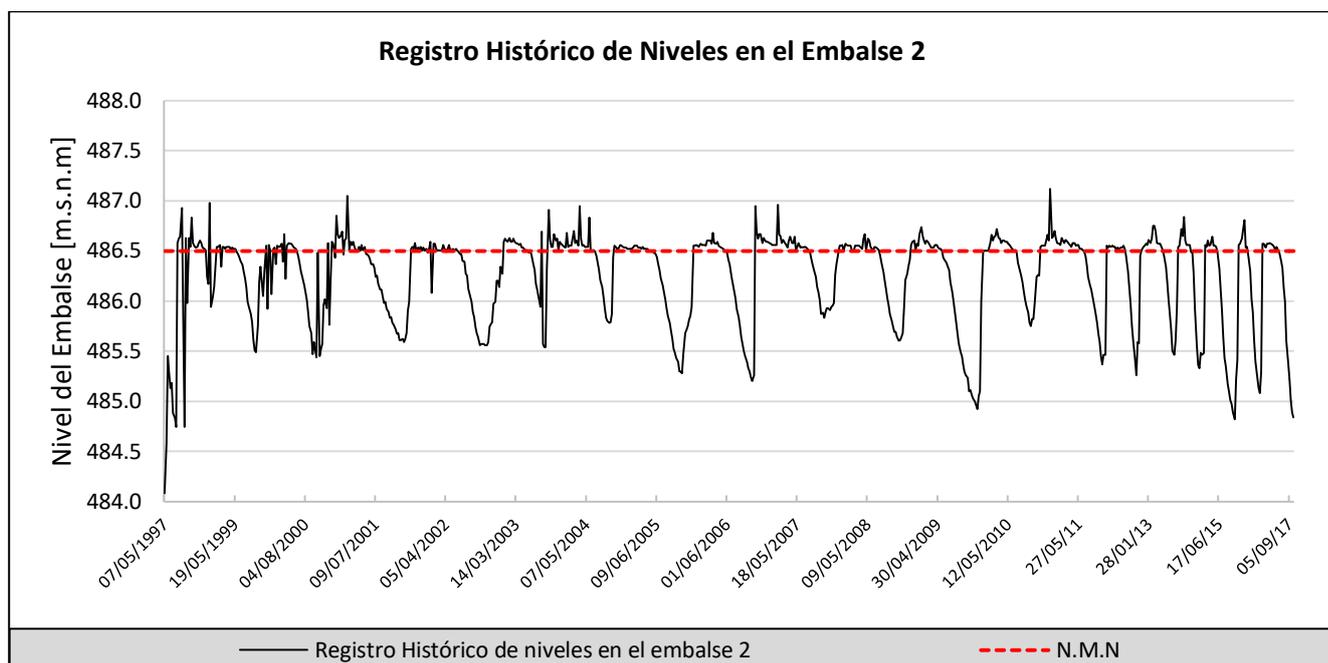


Ilustración 50 Registro Histórico de Niveles en el Embalse 2

Para evitar introducir en la curva de probabilidad los datos que no son representativos de la situación normal del embalse, se eliminan del análisis los datos correspondientes a las situaciones de avenida.

Como se puede apreciar en la gráfica anterior, existen registros que superan el N.M.N del embalse, fijado en 486.50 m.s.n.m. Estos registros corresponderían a situación de avenida, ya que en situación normal el nivel en el embalse no superará el N.M.N gracias al aliviadero de labio fijo. Por este motivo, como una aproximación razonable se ha truncado la serie de datos para dicho valor de N.M.N.

Cuando se representan gráficamente los niveles en el embalse y su probabilidad de excedencia se obtiene una curva como la que se muestra en la siguiente figura:

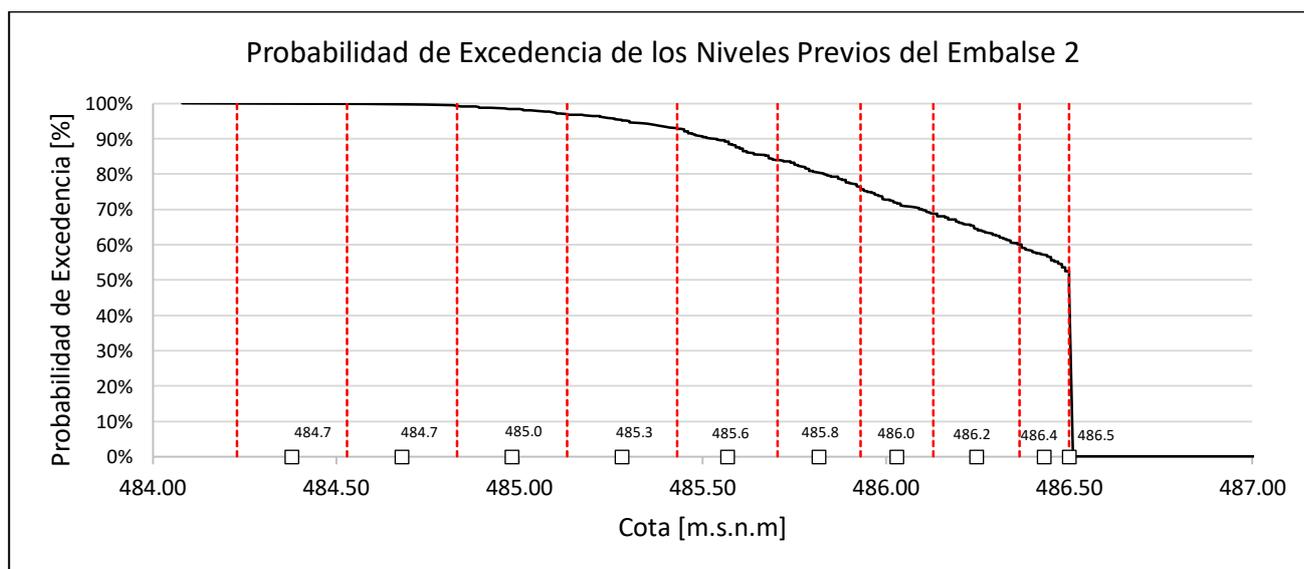


Ilustración 51 Curva de Probabilidad de excedencia de los niveles previos del embalse 2

La gráfica anterior representa las probabilidades de excedencia de niveles previos del embalse 2, los intervalos en los que se ha discretizado (en trazos rojos) y los niveles medios de cada intervalo que sirven de entrada en el nodo de Laminación del modelo de riesgo (puntos situados en el eje horizontal).

Los datos de entrada necesarios para el modelo de riesgo incluyen la probabilidad de ocurrencia de un determinado nivel cuando llega la avenida correspondiente. Por tanto, el modelo no incluye la probabilidad de excedencia ( $PE_n$ ) sino la probabilidad de estar en un determinado intervalo de niveles previos, siendo representado dicho intervalo por el promedio de sus extremos, denominado nivel previo representativo.

Así, una vez ordenado de menor a mayor todo el registro de niveles previos y calculada la probabilidad de excedencia para cada nivel, se define una serie de intervalos para los que se calcula la probabilidad de ocurrencia y su valor representativo.

<b>Nivel Previo Inicial [m.s.n.m]</b>	<b><math>PE_n</math></b>	<b>Intervalo</b>	<b>Nivel Previo Representativo [m.s.n.m]</b>	<b>Probabilidad de ocurrencia de estar en dicho intervalo [%]</b>
484.23	0.9996	484.2 - 484.5	484.4	0.07
484.53	0.9989	484.5 - 484.8	484.7	0.51
484.83	0.9938	484.8 - 485.1	485.0	2.49
485.13	0.9689	485.1 - 485.4	485.3	3.99
485.43	0.9290	485.4 - 485.7	485.6	8.90
485.71	0.8400	485.7 - 485.9	485.8	7.78
485.93	0.7621	485.9 - 486.1	486.0	7.35
486.13	0.6887	486.1 - 486.4	486.2	8.78
486.37	0.6009	486.4 - 486.5	486.4	8.03
486.5	0.5205		486.5	52.05

Tabla 62: Probabilidad de ocurrencia de estar en un intervalo determinado de niveles previos.

Así, la hoja de cálculo que se adjunta al nodo Nivel Previo lleva introducida la siguiente tabla:

<b>PrevWL</b>	<b>Prob</b>
484.38	0.00075
484.68	0.00511
484.98	0.02491
485.28	0.03985
485.57	0.08904
485.82	0.07783
486.03	0.07347
486.25	0.08780
486.43	0.08032
486.50	0.52055

Tabla 63: Estructura de la hoja de cálculo para el nodo Nivel Previo

▪ **Nodo Op. O.D**

Para el caso base, los desagües de fondo se mantendrán en todo momento cerrados de manera que el único órgano de desagüe en funcionamiento será el aliviadero de labio fijo.

De esta manera, la probabilidad de operatividad asociada a ellos será nula, introduciendo el nudo en el modelo de la siguiente forma:

<b>Nodo Op.OD</b>	
Número de O.D	0
Porcentaje de Operatividad de O.D [%]	0

Tabla 64: Datos de entrada en el nodo Op. O.P

▪ **Nodo Laminación**

**Curva característica del embalse 2**

Con los datos de máximas avenidas entrantes al embalse para distintos periodos de retorno, se ha analizado la laminación de estas teniendo en cuenta las características del aliviadero de la presa, el desagüe de fondo y la curva característica del embalse.

La curva característica del embalse 2 relaciona el volumen embalsado con el nivel que en el embalse. Se muestra a continuación:

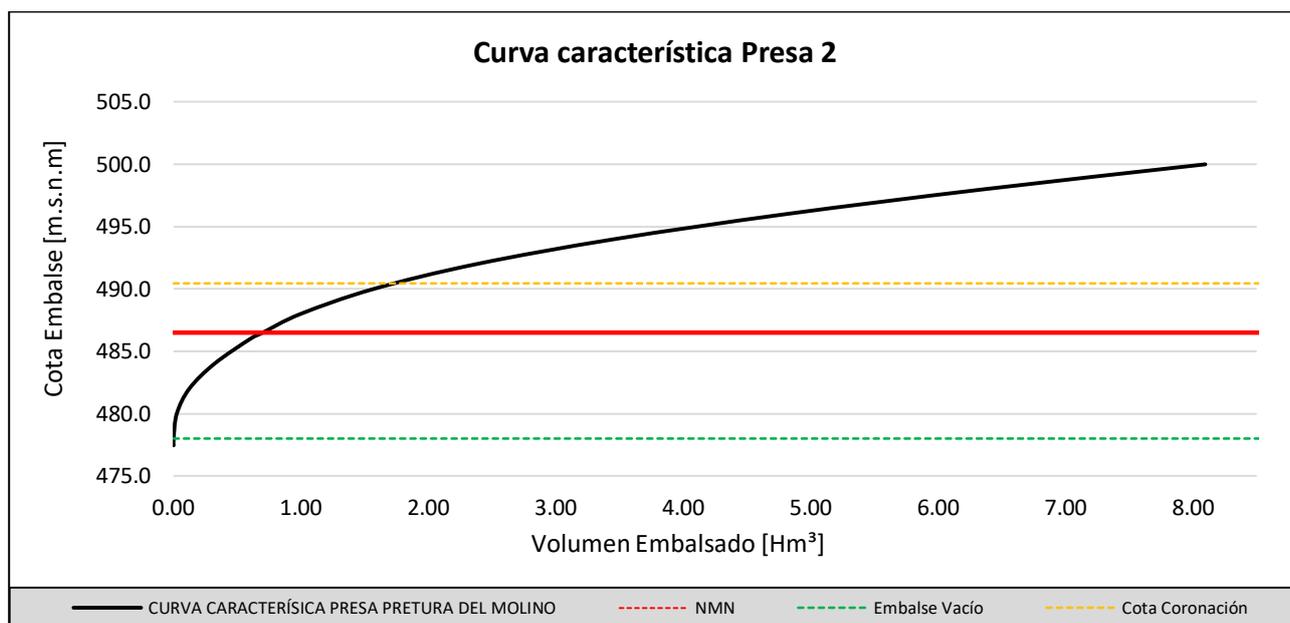


Ilustración 52: Curva característica del embalse 2

- **Curvas de Gasto de los Órganos de Desagüe:**

**Curva de gasto del aliviadero**

Para calcular la relación cota del embalse con el caudal de salida se ha utilizado la siguiente fórmula:

$$Q = C \times L \times H_e^{1.5}$$

- Siendo:
- Q = Caudal desaguado [m<sup>3</sup>/s]
  - L = Longitud del labio de vertido [m]
  - H<sub>e</sub> = Altura de energía sobre el umbral del labio [m]
  - C = Coeficiente de desagüe

El coeficiente de desagüe es función de la altura total de energía sobre la cresta, de la altura en dicha cresta sobre el fondo y de la inclinación de su paramento de aguas arriba. En los cálculos realizados se ha tomado C = 2, que es un valor medio y se ha considerado constante respecto a la altura de energía sobre la cresta. También se ha considerado que no hay reducción del coeficiente de desagüe por sumergencia. La longitud útil de vertido del aliviadero se calcula mediante la siguiente expresión:

$$L = L' - 2(NK_p + K_a) \times H_e$$

- Siendo:
- L = Longitud útil de vertido [m]
  - L' = Longitud neta de vertido [m]
  - N = Numero de pilas

- $K_a$  = Coeficiente de contracción en estribos
- $K_p$  = Coeficiente de contracción en pilas
- $H_e$  = Altura de energía sobre el umbral del labio [m]

En el caso de la presa 2 estudiada, se tiene que la longitud neta de vertido es de 15.00 metros, no tiene pilas y el coeficiente de contracción en estribos es de 0.10 (correspondiente a estribos redondos).

Con estos datos se obtiene la curva de gasto del aliviadero de la presa 2, la cual se muestra a continuación en forma de gráfica:

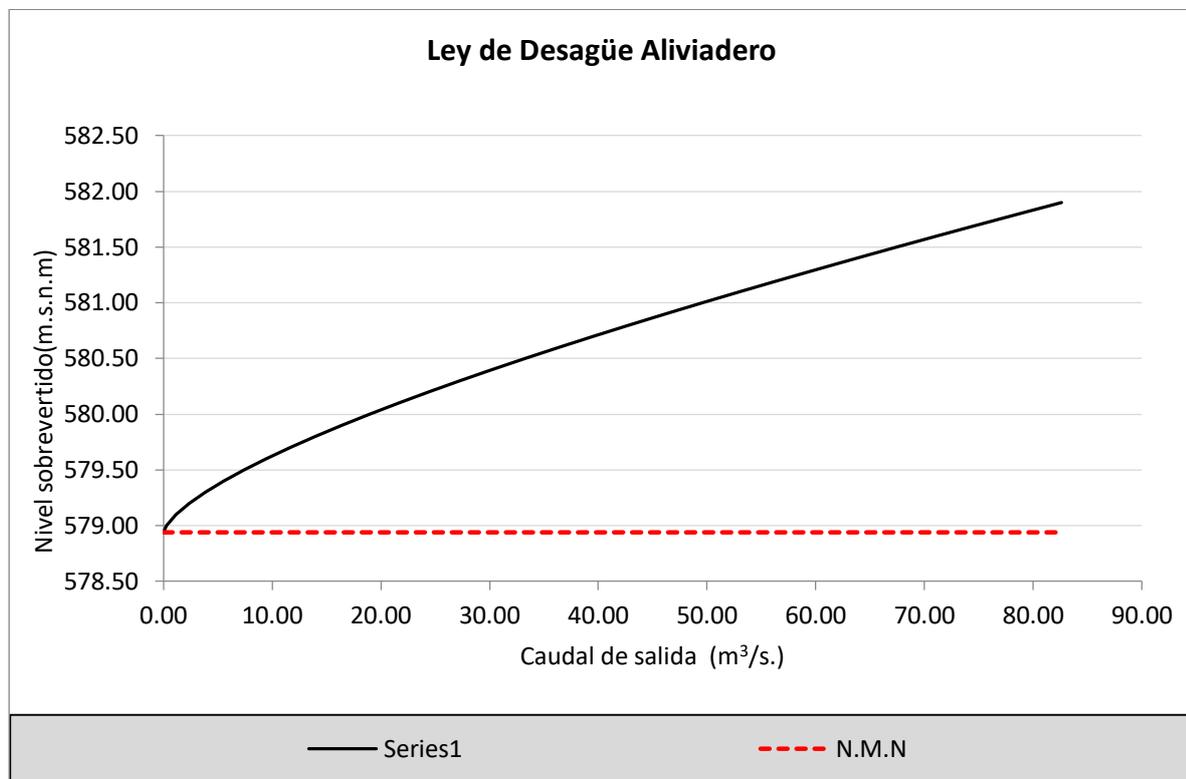


Ilustración 53: Ley de desagüe del aliviadero de la presa 2

Cuando el nivel del embalse sobrepase el nivel de coronación del cuerpo de presa (490.45 m.s.n.m), habrá que sumar al caudal vertido por aliviadero el caudal sobrevertido.

El caudal sobrevertido se parametriza mediante la siguiente expresión:

$$Q = 1.9 \times L \times H_e$$

- Siendo:
- $Q$  = Caudal saliente por encima del cuerpo de presa [m³/s]
  - $L$  = Longitud de coronación = 75.20 m
  - $H_e$  = Altura de energía sobre el umbral del labio [m]

### **Curva de gasto del desagüe de fondo**

Para el caso base, el desagüe de fondo se considera siempre cerrado, permaneciendo así del lado de la seguridad. Aun así, se ha estudiado los tres posibles casos:

- Desagüe de fondo cerrado.
- Desagüe de fondo con un conducto abierto.
- Desagüe de fondo con los dos conductos abiertos.

Los desagües de fondo de la Presa 2 en función del número de conductos abiertos siguen la ley de desagüe que se muestra a continuación:

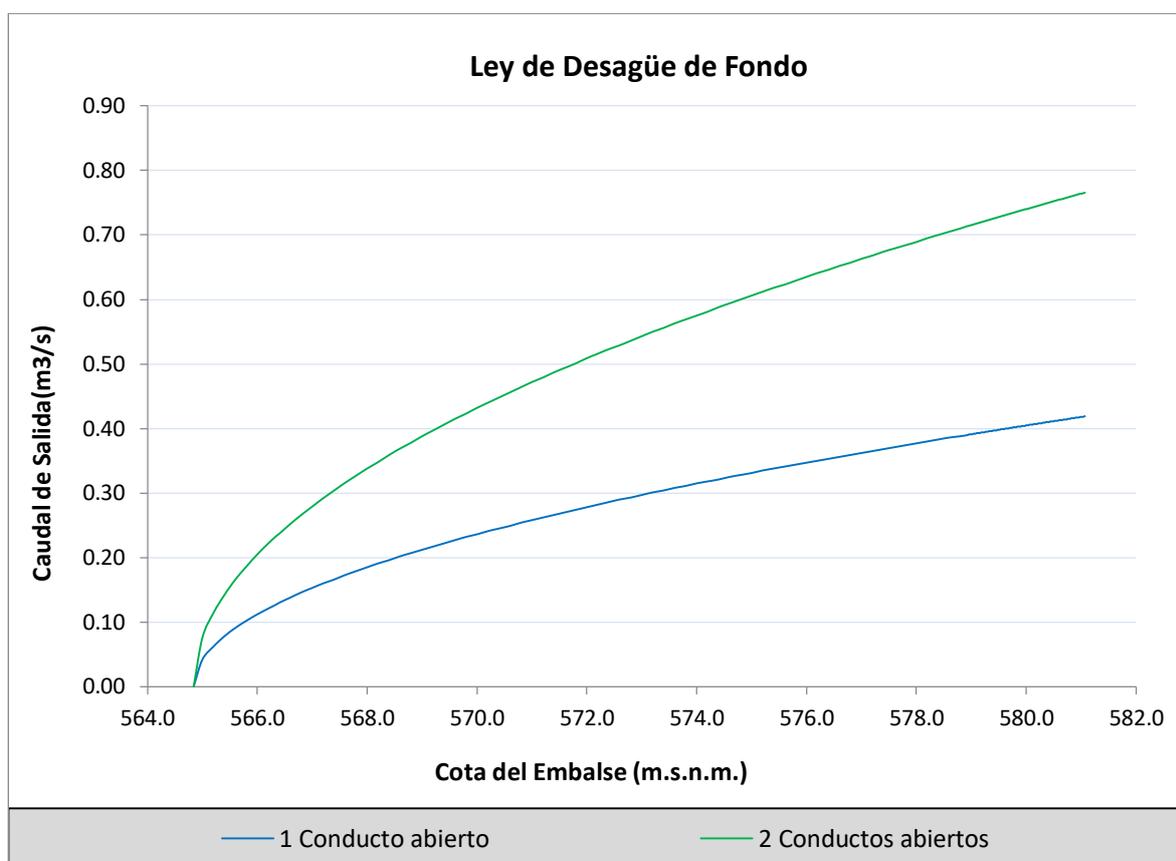


Ilustración 54: Ley de desagüe del desagüe de fondo de la presa 2

Una vez obtenidos todos los datos, se simula la laminación y se extrae de ella una hoja de cálculo para todas las combinaciones, obteniéndose el nivel máximo alcanzado en el embalse (MaxWL) y el caudal laminado máximo (QNo\_Fallo).

La hoja de cálculo obtenida para el caso base es la que se muestra a continuación para T=10000:

<i>T</i>	<i>AEP</i>	<i>PrevWL</i>	<i>OpA</i>	<i>OpDF</i>	<i>MaxWL</i>	<i>QNo_Fallo</i>
10000	0.0001	484.38	1	0	490.482	230.207
10000	0.0001	484.68	1	0	490.482	230.390
10000	0.0001	484.98	1	0	490.483	230.561
10000	0.0001	485.28	1	0	490.484	230.705
10000	0.0001	485.57	1	0	490.485	230.876
10000	0.0001	485.82	1	0	490.485	231.024
10000	0.0001	486.03	1	0	490.486	231.141
10000	0.0001	486.25	1	0	490.486	231.251
10000	0.0001	486.43	1	0	490.487	231.331
10000	0.0001	486.50	1	0	490.487	231.355

Tabla 65: Estructura del fichero de Microsoft Excel utilizado para introducir los datos de la laminación al modelo.

Como se puede apreciar en esta tabla, para la avenida con periodo de retorno igual a 10.000 años la presa alcanza niveles superiores a 490.45 m.s.n.m, luego sobrevierte

A continuación se muestran gráficamente los resultados obtenidos asociados a cada periodo de retorno.

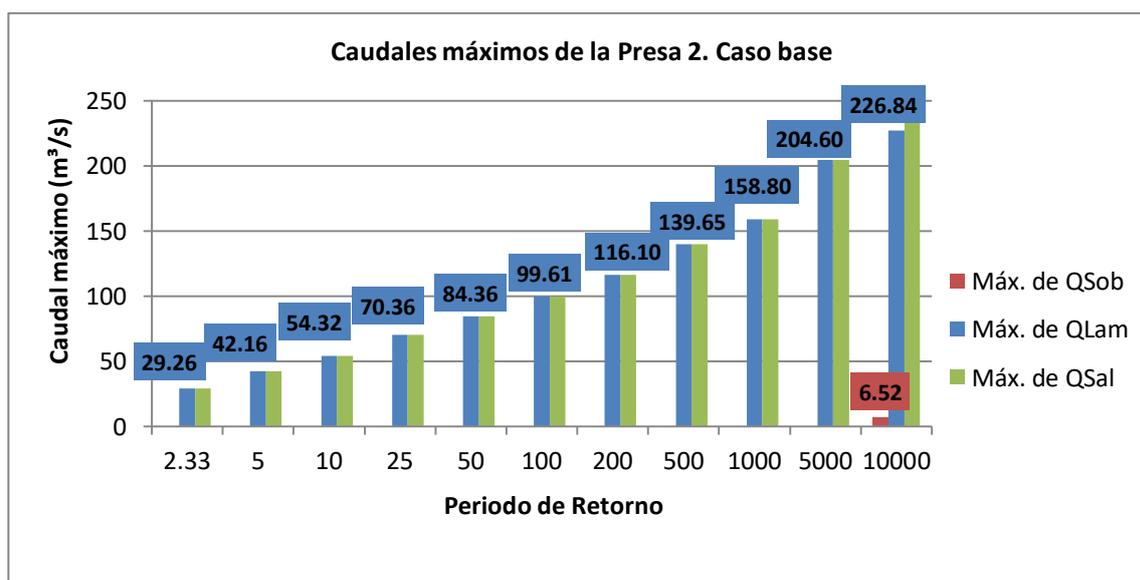


Ilustración 55 Representación de los caudales máximos asociados a los periodos de retorno de la Presa 2 para el Caso base.

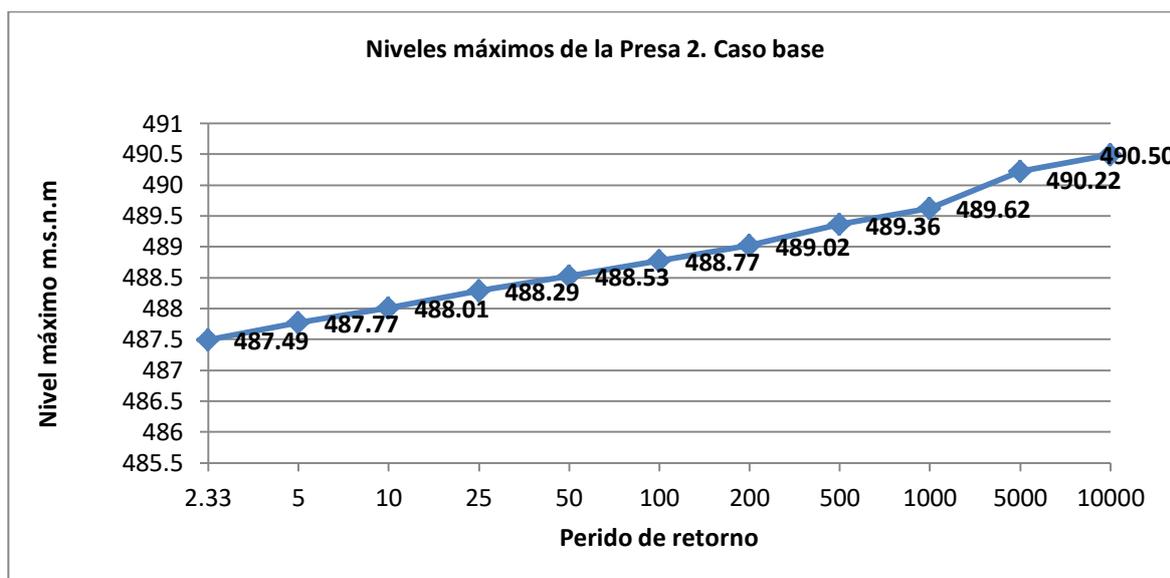


Ilustración 56 Representación de los niveles máximos asociados a los diferentes periodos de retorno de la Presa 2 para el Caso base.

- **Respuesta del Sistema**

▪ **Nodo Rotura**

Los datos introducidos en el modelo se presenta a continuación:

<b>Nodo Rotura</b>	
Nivel de coronación	490.45
Tipo de presa	Gravedad

Tabla 66 Datos de entrada del Nodo Rotura del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 2

▪ **Nodo Q Fallo**

Los datos de entrada al nodo se reflejan en la siguiente tabla. L

<b>Nodo QFallo</b>	
Nivel cimienta	471.85 m.s.n.m
Nivel de referencia	490.45 m.s.n.m
Q referencia	1931.4 m <sup>3</sup> /s

Tabla 67 Datos de entrada del Nodo QFallo del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 2

- **Consecuencias**

El cálculo de pérdida de vidas potencial y de las consecuencias económicas se basa en la identificación de las afecciones resultantes de la inundación aguas abajo.

- Características de la zona de afección.

Se describe la zona de afección aguas abajo de la presa para los dos tipos de escenarios considerados (actual y futuro). Se han tenido en cuenta los resultados de la modelación hidráulica de dos escenarios de inundación:

- H1: Rotura de la presa sin avenida, con el embalse a la cota N.M.N.

- H2: Rotura de la presa en situación de avenida, con el embalse a la cota N.A.P.

### **Consecuencias Sociales**

Se han calculado las consecuencias sociales en términos de número de heridos y pérdida de vidas potencial en base a la metodología explicada en el capítulo 2.2.5.3 para cada una de las afecciones presentes aguas abajo de la presa. El sumatorio de todas las afecciones, en términos de pérdidas de vidas, se introducirá en el modelo de riesgo.

Para el cálculo de las consecuencias sociales se introduce la variabilidad estacional y diaria para caracterizar la población presente en los elementos de afección. Por ejemplo, en una piscina, no tendrá asociada la misma población en verano que en invierno y tampoco para el día o la noche.

Las consecuencias sociales, calculadas para H1 y H2 se muestran en la siguiente tabla:

<i>SUFRI_</i> <i>Categoría C3</i>	<i>Qmax [m<sup>3</sup>/s]</i>	<i>NÚMERO DE</i> <i>VÍCTIMAS</i> <i>INVIERNO-DIA</i>	<i>NÚMERO DE</i> <i>VÍCTIMAS</i> <i>VERANO-DIA</i>	<i>NÚMERO DE</i> <i>VÍCTIMAS</i> <i>INVIERNO-NOCHE</i>	<i>NÚMERO DE</i> <i>VÍCTIMAS</i> <i>VERANO -NOCHE</i>
<i>H0</i>	<i>33.00</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>H1</i>	<i>997.20</i>	<i>147</i>	<i>294</i>	<i>201</i>	<i>401</i>
<i>H2</i>	<i>1931.49</i>	<i>221</i>	<i>442</i>	<i>227</i>	<i>453</i>

*Tabla 68 Cálculo de pérdida de vidas. Metodología SUFRI de la presa 2*

Se han calculado las consecuencias sociales en términos de pérdida de vidas en base a la metodología SUFRI explicada en el capítulo 2.2.5.3 para cada una de las afecciones presentes aguas abajo de la presa. Aunque se han estimado las consecuencias para las dos metodologías descritas en el Capítulo 2, se opta por emplear la segunda pues está basada en ratios de escenarios de rotura reales y las tasas de mortalidad de referencia son ampliamente empleadas en el ámbito de seguridad de presas.

### **Consecuencias Económicas**

Se obtendrán las consecuencias económicas en caso de rotura y las consecuencias económicas en caso de no rotura. Las consecuencias económicas en caso de rotura serán la suma de Costes de reconstrucción, Coste por lucro cesante y Coste de inundación.

- **Coste de inundación**

A continuación se muestran los resultados para los escenarios H1 y H2.

Para el escenario H1:

<b>COSTES DE INUNDACIÓN PRESA 2 H1</b>					
	ÁREA INUNDADA	COSTE UNITARIO	DAÑO	COSTES DIRECTOS	COSTES INDIRECTOS
	(m2)	(€/m2)	%	(€)	(€)
Piscina, Parque y Casetas de Ocio	1941.06	200	100%	388,212.00 €	58,231.80 €
Obra de Paso sobre el río	173.6	250	67%	29,103.53 €	4,365.53 €
Obra de Paso sobre el río	96.04	250	66%	15,761.86 €	2,364.28 €
Obra de Paso sobre el río	79.03	250	92%	18,146.50 €	2,721.98 €
Albergue	67.18	380	91%	23,171.93 €	3,475.79 €
Balsa de Riego sobre el Arroyo del Retorno	70.91	500	47%	16,815.80 €	2,522.37 €
Caseta de explotación Agrícola y/o Ganadera	84.75	380	65%	21,027.97 €	3,154.20 €
Merendero Municipal	1224.21	200	80%	195,297.50 €	29,294.63 €
Municipio	37500	260	93%	9,067,500.00 €	1,360,125.00 €
Obra de Paso sobre el río	141.51	250	83%	29,217.65 €	4,382.65 €
Vivienda Aislada	48.38	260	71%	8,879.15 €	1,331.87 €
Vivienda Aislada	59.69	260	37%	5,764.35 €	864.65 €
Depósito de Abastecimiento a vivienda	29.8	500	65%	9,728.82 €	1,459.32 €
Vivienda Aislada	43.87	260	75%	8,574.78 €	1,286.22 €
			<b>Totales</b>	<b>9,837,201.85 €</b>	<b>1,475,580.28 €</b>
			<b>TOTAL</b>	<b>11,312,782.13 €</b>	

Tabla 69 Costes de Inundación de la Presa 2 para el escenario H1

Para el escenario H2:

<b>COSTES DE INUNDACIÓN PRESA 2 H2</b>					
	ÁREA INUNDADA	COSTE UNITARIO	DAÑO	COSTES DIRECTOS	COSTES INDIRECTOS
	(m <sup>2</sup> )	(€/m <sup>2</sup> )	%	(€)	(€)
Piscina, Parque y Casetas de Ocio	1941.06	200	100%	388,212.00 €	58,231.80 €
Obra de Paso sobre el río	173.6	250	95%	41,330.15 €	6,199.52 €
Obra de Paso sobre el río	96.04	250	94%	22,680.22 €	3,402.03 €
Obra de Paso sobre el río	79.03	250	100%	19,757.50 €	2,963.63 €
Albergue Ganadero	67.18	380	100%	25,528.40 €	3,829.26 €
Vivienda Aislada	143.7	260	61%	22,680.93 €	3,402.14 €
Balsa de Riego sobre el Arroyo del Retorno	70.91	500	100%	35,455.00 €	5,318.25 €
Municipio	37500	260	100%	9,750,000.00 €	1,462,500.00 €
Caseta de explotación Agrícola y/o Ganadera	84.75	380	100%	32,205.00 €	4,830.75 €
Merendero Municipal	1224.21	200	100%	244,842.00 €	36,726.30 €
Obra de Paso sobre el río	141.51	250	100%	35,377.50 €	5,306.63 €
Vivienda Aislada	103.47	260	82%	22,028.15 €	3,304.22 €
Vivienda Aislada	48.38	260	100%	12,578.80 €	1,886.82 €
Vivienda Aislada	59.69	260	100%	15,519.40 €	2,327.91 €
Caseta de explotación Agrícola y/o Ganadera	120.55	380	21%	9,685.33 €	1,452.80 €
Depósito de Abastecimiento a vivienda	29.8	500	100%	14,900.00 €	2,235.00 €
Vivienda Aislada	43.87	260	100%	11,406.20 €	1,710.93 €
Instalación de medida en el río	48.82	500	94%	23,058.06 €	3,458.71 €
			Totales	<b>10,727,244.65 €</b>	<b>1,609,086.70 €</b>
			TOTAL	<b>12,336,331.35 €</b>	

Tabla 70 Costes de Inundación de la Presa 2 para el escenario H2

- **Coste de reconstrucción**

<b>COSTE DE RECONSTRUCCIÓN DE LA PRESA</b>		
Coste de Construcción (Año 1998)	418,000,000.00 Pesetas	2,512,234.34 €
Incremento IPC 1998-2018		55.30 %
<b>Coste de Reconstrucción</b>		<b>3,901,499.93 €</b>

Tabla 71 Coste de Reconstrucción Presa 2

### Coste por lucro cesante

<b>COSTE POR VACIADO DURANTE 4 AÑOS HASTA RECONSTRUCCIÓN</b>					
POBLACIÓN ABASTECIDA	CONSUMO ANUAL		COSTE UNITARIO RECURSO ALTERNATIVO	COSTE ANUAL ABASTECIMIENTO EN CASO DE NO PRESA	TOTAL
(Habitantes)	(litros/hab/día)	(m <sup>3</sup> /año)	(€/m <sup>3</sup> )	(€/Año)	
Periodo Estival	7449				
Resto del Año	2483	130	471273.40	0.615	289,833.14 €
<b>Total</b>	<b>9932</b>				<b>1,159,332.56 €</b>

Tabla 72 Coste por lucro cesante Presa 2

El resumen de los resultados asociados a las consecuencias económicas para la Presa 2 se detalla en la siguiente tabla:

<b>Costes caso rotura (M€)</b>	<b>H.0</b>	<b>H.1</b>	<b>H.2</b>
	M€	M€	M€
COSTE INUNDACIÓN (M€)	0.00	11.313	12.337
COSTE ABASTECIMIENTO DURANTE 4 AÑOS DE RECONSTRUCCIÓN EN CASO DE ROTURA (M€)	1.159	1.159	1.159
COSTE RECONSTRUCCIÓN (M€)	3.901	3.901	3.901

Tabla 73 Coste en caso de rotura desglosado de la presa 2

Para introducir los datos al modelo los resultados se agrupan en dos grupos:

- Costes asociados a la no rotura de la presa.
- Costes asociados a la rotura de la presa.

Caso	Q max (m <sup>3</sup> /s)	Costes	
		No rotura (M€)	Rotura (M€)
H0	33.00	0.00	5.06
H1	997.20	11.31	16.37
H2	1931.49	12.34	17.40

Tabla 74 Tabla Resumen de Consecuencias Económicas de la presa 2

#### ▪ **Nodo Consecuencias**

Una vez calculadas todas las consecuencias, ya se está en disposición de introducir la información al modelo. Los nodos referentes a consecuencias, tanto sociales como económicas se muestran a continuación:

▪ **Nodo Vidas F**

<i>Estación</i>	<i>Moment</i>	<i>QFallo</i>	<i>Pérdida de vidasF</i>
Verano	Día	33.00	0.00
Verano	Día	997.20	293.08
Verano	Día	1931.49	441.64
Verano	Noche	33.00	0.00
Verano	Noche	997.20	400.17
Verano	Noche	1931.49	452.45
Invierno	Día	33.00	0.00
Invierno	Día	997.20	146.54
Invierno	Día	1931.49	220.82
Invierno	Noche	33.00	0.00
Invierno	Noche	997.20	200.09
Invierno	Noche	1931.49	226.22

Tabla 75: Datos de entrada del Nodo Vidas F del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 2

▪ **Nodo Vidas NF**

<i>Estación</i>	<i>Moment</i>	<i>QNo_Fallo</i>	<i>Pérdida de vidasNF</i>
Verano	Día	33.00	0.00
Verano	Día	997.20	293.08
Verano	Día	1931.49	441.64
Verano	Noche	33.00	0.00
Verano	Noche	997.20	400.17
Verano	Noche	1931.49	452.45
Invierno	Día	33.00	0.00
Invierno	Día	997.20	146.54
Invierno	Día	1931.49	220.82
Invierno	Noche	33.00	0.00
Invierno	Noche	997.20	200.09
Invierno	Noche	1931.49	226.22

Tabla 76 Datos de entrada del Nodo Vidas NF del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 2

▪ **Nodo Daños F**

<i>QFallo</i>	<i>DañosF(M€)</i>
33.00	5.0
997.20	16.37
1931.49	17.40

Tabla 77: Datos de entrada del Nodo Daños F del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 2

- **Nodo Daños NF**

<b><i>QNo_Fallo</i></b>	<b><i>DañosNF(M€)</i></b>
<i>33.00</i>	<i>0.00</i>
<i>997.20</i>	<i>11.31</i>
<i>1931.49</i>	<i>12.34</i>

*Tabla 78: Datos de entrada del Nodo Daños NF del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 2*

### 3.2.3.2 Escenario Futuro: CAMBIO CLIMÁTICO + CAMBIO SOCIOECONÓMICO

La variación que presenta el escenario futuro sobre el escenario actual viene asociada a:

- Aumento de las avenidas entrantes al embalse.
- Aumento de la población aguas abajo del embalse.

Por ello, los cambios introducidos en el modelo de riesgo recaerán en:

- Nodo Laminación
- Nodo VidasF
- Nodo VidaNF

Se asume, en base a la información redactada en el punto 2.2.5, la hipótesis de un aumento de la población de manera que:

- Se triplica la población en núcleos urbanos y viviendas aisladas durante el verano.
- Aumento de un 25% de la población en instalaciones para uso público durante el día (piscinas, merenderos, campings, etc...)
- **Cargas**
  - **Nodo Avenidas**

La información introducida en el Nodo Avenidas no varía para ninguna variación realizada sobre el Caso Base. Siempre se introducirá de la siguiente forma:

<b>Nodo Avenidas</b>	
<i>Nombre</i>	Avenidas
<i>Tmin.</i>	1
<i>Tmax.</i>	10000

Tabla 79: Datos de entrada del Nodo Avenidas del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 2.

Las proyecciones de los hidrogramas de avenida para el año 2050 suponen incrementos de caudales punta de avenida.

- Para periodo de retorno  $T < 500$  años los incrementos de caudales punta de avenida son de un 13%.
- Para periodos de retorno comprendidos entre 500-1000 años un incremento del 23%.
- Para periodos de retorno  $T > 1000$  incrementos del 40% en los caudales punta de avenida.

Los resultados obtenidos se exponen a continuación, detallados en gráfica y tabla.

<b>Periodo de Retorno [años]</b>	<b>Caudal Pico [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Volumen [m<sup>3</sup>]</b>
2.33	35.53	1522696
5	50.44	2161996
10	64.56	2766909
25	84.82	3635291
50	101.55	4352566
100	119.57	5124569
200	138.87	5951785
500	181.02	7758479
1000	205.19	8794384
5000	303.31	12975414
10000	340.62	14598997

Tabla 80 Avenidas entrantes al embalse 2 para el escenario 2050

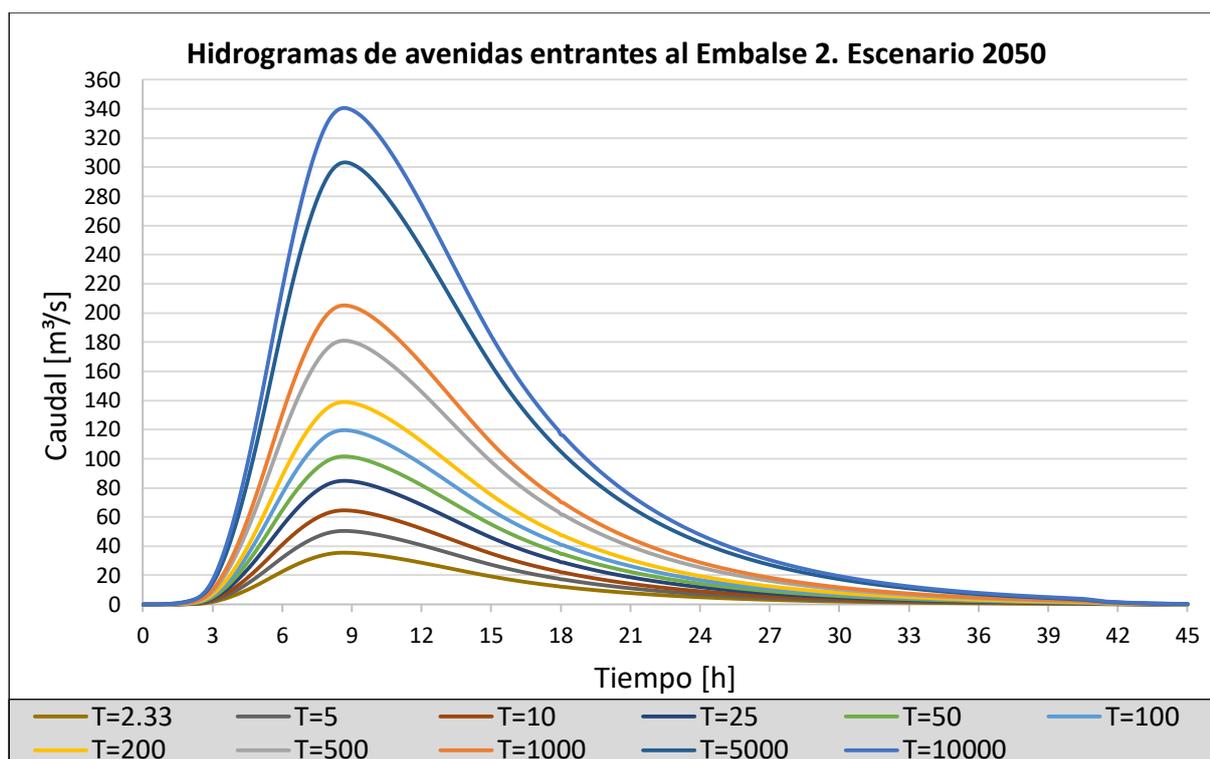


Ilustración 57: Hidrogramas de Avenidas entrantes al Embalse 2 para el escenario 2050

▪ **Nodo Laminación**

Una vez actualizadas las avenidas, se simula la laminación y se extrae de ella una hoja de cálculo para todas las combinaciones, obteniéndose el nivel máximo alcanzado en el embalse (MaxWL) y el caudal laminado máximo (QNo\_Fallo).

La hoja de cálculo obtenida para el caso base se muestra a continuación:

<i>T</i>	<i>AEP</i>	<i>PrevWL</i>	<i>OpA</i>	<i>OpDF</i>	<i>MaxWL</i>	<i>QNo_Fallo</i>
10000	0.0001	484.38	1	0	490.95	336.56
10000	0.0001	484.68	1	0	490.95	336.60
10000	0.0001	484.98	1	0	490.95	336.63
10000	0.0001	485.28	1	0	490.95	336.66
10000	0.0001	485.57	1	0	490.95	336.69
10000	0.0001	485.82	1	0	490.95	336.70
10000	0.0001	486.03	1	0	490.95	336.72
10000	0.0001	486.25	1	0	490.95	336.74
10000	0.0001	486.43	1	0	490.95	336.75
10000	0.0001	486.50	1	0	490.95	336.75

Tabla 81 Estructura del fichero de Microsoft Excel utilizado para introducir los datos de la laminación al modelo. Escenario 2050

A continuación se representan gráficamente los resultados obtenidos en la laminación para el Escenario 2050.

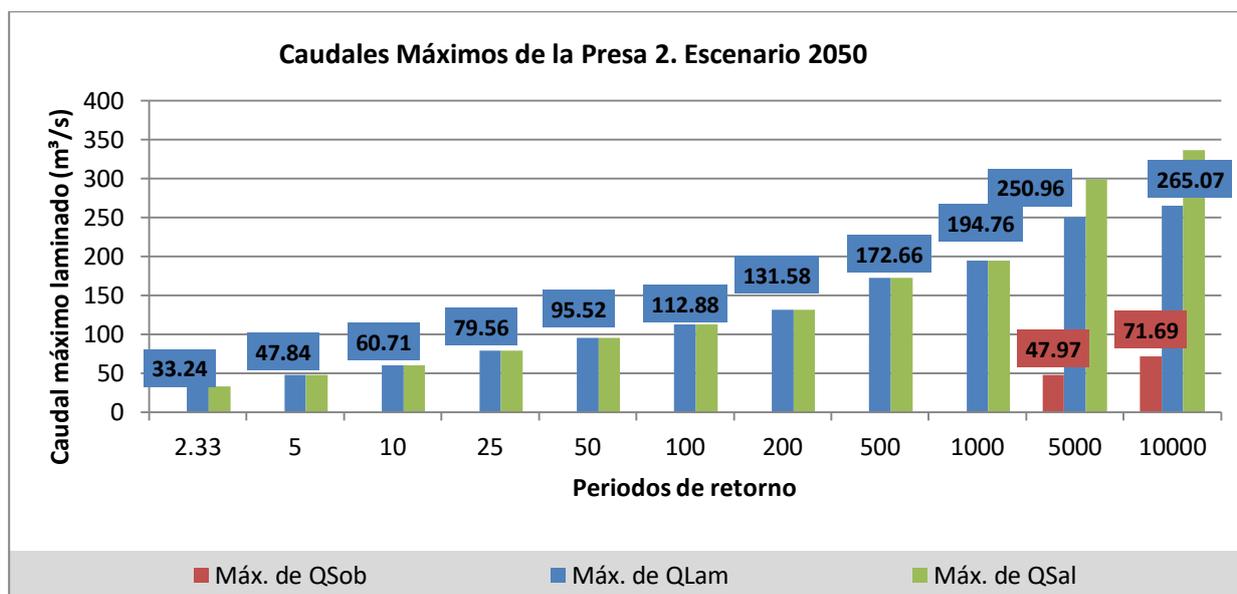


Ilustración 58 Representación de los Caudales máximos asociados a los periodos de retorno en la Presa 2 para el Escenario 2050.

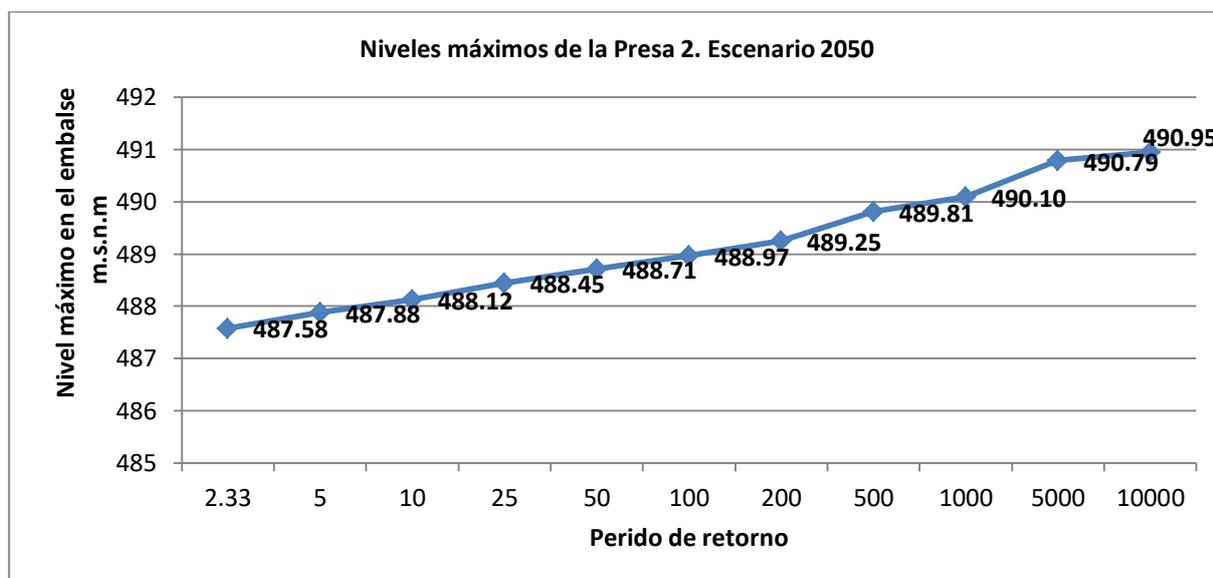


Ilustración 59 Representación de los niveles máximos asociados a cada periodo de retorno de la Presa 2 para el Escenario 2050.

Si se compara esta tabla con la asociada a escenario Caso Base se pueden apreciar algunas diferencias:

- La altura máxima de sobrevertido pasa de ser de 5 cm a alcanzar los 50 cm para la avenida de periodo de retorno máximo.
- En el caso base la única avenida asociada al sobrevertido era la avenida de  $T=10.000$  años, en cambio para este escenario futuro, una avenida de  $T=5.000$  años también rebasaría la cota de coronación.

- **Respuesta del Sistema**

En los nodos asociados a esta parte del esquema de cálculo se ha seguido la misma hipótesis que para el Caso Base.

- **Consecuencias**

Debido al estudio de las consecuencias bajo las dos metodologías que se ha realizado para el Caso Base se decide no recalcular para los nuevos escenarios las consecuencias sociales con la metodología MAGRAMA (2013) [14]. Así pues, los siguientes resultados mostrados se basan en la metodología SUFRI[1], pues aplica tasas de mortalidad de referencia empleadas internacionalmente en la estimación de consecuencias por rotura de presa

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos para las consecuencias económicas asociadas a la Presa 2 en el escenario futuro.

<b>SUFRI_</b> <b>Categoría C.3</b>	<b>Qmax (m3/s)</b>	<b>NÚMERO DE</b> <b>VÍCTIMAS</b> <b>INVIERNO-DIA</b>	<b>NÚMERO DE</b> <b>VÍCTIMAS</b> <b>VERANO-DIA</b>	<b>NÚMERO DE</b> <b>VÍCTIMAS</b> <b>INVIERNO-NOCHE</b>	<b>NÚMERO DE</b> <b>VÍCTIMAS</b> <b>VERANO -NOCHE</b>
<b>H0</b>	33.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>H1</b>	997.20	147	880	201	1201
<b>H2</b>	1931.49	221	1325	227	1358

Tabla 82 Cálculo de pérdida de vidas. Metodología SUFRI de la presa 2 para el escenario 2050

Si comparamos los resultados respecto del caso base se puede apreciar que:

- Se comprueba que el aumento de las consecuencias recae en los periodos donde se produce aumento de población (verano y día para para instalaciones públicas, y verano para viviendas).
- En las condiciones donde se producen víctimas, el incremento de ellas respecto del Caso Base suele ser del orden del 30 %.

Una vez calculados los resultados ya se dispone de la información necesaria para introducir en los nodos Vidas F y Vidas NF.

▪ **Nodo Vidas F**

<b>Estación</b>	<b>Moment</b>	<b>QFallo</b>	<b>Pérdida de</b> <b>vidasF</b>
Verano	Día	33.00	0.00
Verano	Día	997.20	879.23
Verano	Día	1931.49	1324.91
Verano	Noche	33.00	0.00
Verano	Noche	997.20	1200.52
Verano	Noche	1931.49	1357.35
Invierno	Día	33.00	0.00
Invierno	Día	997.20	146.54
Invierno	Día	1931.49	220.82
Invierno	Noche	33.00	0.00
Invierno	Noche	997.20	200.09
Invierno	Noche	1931.49	226.22

Tabla 83: Datos de entrada del Nodo Vidas F del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 2 para el escenario 2050

▪ **Nodo Vidas NF**

<i>Estación</i>	<i>Moment</i>	<i>QFallo</i>	<i>Pérdida de vidasF</i>
<i>Verano</i>	<i>Día</i>	<i>33.00</i>	<i>0.00</i>
<i>Verano</i>	<i>Día</i>	<i>997.20</i>	<i>879.23</i>
<i>Verano</i>	<i>Día</i>	<i>1931.49</i>	<i>1324.91</i>
<i>Verano</i>	<i>Noche</i>	<i>33.00</i>	<i>0.00</i>
<i>Verano</i>	<i>Noche</i>	<i>997.20</i>	<i>1200.52</i>
<i>Verano</i>	<i>Noche</i>	<i>1931.49</i>	<i>1357.35</i>
<i>Invierno</i>	<i>Día</i>	<i>33.00</i>	<i>0.00</i>
<i>Invierno</i>	<i>Día</i>	<i>997.20</i>	<i>146.54</i>
<i>Invierno</i>	<i>Día</i>	<i>1931.49</i>	<i>220.82</i>
<i>Invierno</i>	<i>Noche</i>	<i>33.00</i>	<i>0.00</i>
<i>Invierno</i>	<i>Noche</i>	<i>997.20</i>	<i>200.09</i>
<i>Invierno</i>	<i>Noche</i>	<i>1931.49</i>	<i>226.22</i>

Tabla 84 Datos de entrada del Nodo Vidas NF del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 2 para el escenario CAMBIO CLIMÁTICO

**Consecuencias Económicas**

Al variar la población en el nuevo escenario, los costes directos e indirectos correspondientes al coste de inundación se incrementarán por el aumento del coste del lucro cesante por mayor demanda de abastecimiento.

Los resultados están expresados en Millones de €.

▪ **Nodo Daños F**

<i>QFallo</i>	<i>DañosF(M€)</i>
<i>33.00</i>	<i>7.38</i>
<i>997.20</i>	<i>20.78</i>
<i>1931.49</i>	<i>21.96</i>

Tabla 85: Datos de entrada del Nodo Daños F del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 2

▪ **Nodo Daños NF**

<i>QNo_Fallo</i>	<i>DañosNF(M€)</i>
<i>33.00</i>	<i>0.00</i>
<i>997.20</i>	<i>13.40</i>
<i>1931.49</i>	<i>14.58</i>

Tabla 86: Datos de entrada del Nodo Daños NF del modelo de Análisis de Riesgo de la presa 2

### 3.2.4 Calculo del Riesgo

#### 3.2.3.1 Escenario actual: CASO BASE

En el escenario correspondiente al Caso Base, lo que se busca es evaluar la situación actual del sistema.

Una vez introducida toda la información en el modelo de riesgo referido al Caso Base, se procede a calcular resultados en términos de riesgo.

Se prestará especial atención a 3 de esos valores, los cuales están sombreados en la tabla anterior:

- Probabilidad de Fallo.
- El riesgo incremental social y económico: Utilizados para calcular el indicador ACSLS.

<i>Resultado del Riesgo</i>	<i>Resultado del Riesgo</i>
<i>Riesgo Económico Total [M€/año]</i>	<i>7.30E-02</i>
<i>Riesgo Social Total [Vidas/año]</i>	<i>1.49E+00</i>
<i>Probabilidad de Fallo [1/año]</i>	<i>1.51E-06</i>
<i>Riesgo Económico de Fallo [M€/año]</i>	<i>2.62E-05</i>
<i>Riesgo Social de Fallo [Vidas/año]</i>	<i>4.49E-04</i>
<i>Riesgo Económico de No Fallo [Vidas/año]</i>	<i>7.30E-02</i>
<i>Riesgo Social de No Fallo [Vidas/año]</i>	<i>1.49E+00</i>
<i>Riesgo Económico Incremental [M€/año]</i>	<i>2.27E-05</i>
<i>Riesgo Social Incremental [Vidas/año]</i>	<i>3.76E-04</i>

*Tabla 87 Probabilidades y Riesgos asociados al escenario Caso Base de la Presa 2*

### 3.2.3.2 Escenario futuro: CAMBIO CLIMÁTICO + CAMBIO SOCIOECONÓMICO

<i>Resultado del Riesgo</i>	<i>Resultado del Riesgo</i>
<i>Riesgo Económico Total [M€/año]</i>	<i>1.25E-01</i>
<i>Riesgo Social Total [Vidas/año]</i>	<i>4.29E+00</i>
<i>Probabilidad de Fallo [1/año]</i>	<i>1.05E-04</i>
<i>Riesgo Económico de Fallo [M€/año]</i>	<i>2.31E-03</i>
<i>Riesgo Social de Fallo [Vidas/año]</i>	<i>6.27E-02</i>
<i>Riesgo Económico de No Fallo [Vidas/año]</i>	<i>1.23E-01</i>
<i>Riesgo Social de No Fallo [Vidas/año]</i>	<i>4.23E+00</i>
<i>Riesgo Económico Incremental [M€/año]</i>	<i>1.89E-03</i>
<i>Riesgo Social Incremental [Vidas/año]</i>	<i>4.83E-02</i>

Tabla 88 Probabilidades y Riesgos asociados al escenario Futuro de la Presa 2

Se puede apreciar, observando las dos tablas anteriores, el incremento de riesgo que se produce en el escenario futuro.

### 3.2.5 Representación y Evaluación del Riesgo para los escenarios

En este trabajo, la representación y evaluación del riesgo se ha realizado en términos de riesgo incremental.

Por la definición de riesgo incremental:

$$Riesgo Incremental = Prob. Fallo * (Consecuencias Rotura - Consecuencias No Rotura)$$

Puede ocurrir, que en determinadas situaciones el riesgo incremental sea nulo, esto se atribuye, en este trabajo, a que la probabilidad de fallo asociada sea nula. Esto no significa que el riesgo asociado al escenario en cuestión sea nulo: En este caso el riesgo en términos de riesgo incremental es nulo, es decir, en términos de rotura de la presa por sobrevertido el riesgo es nulo (para las hipótesis consideradas) pero no así en términos de riesgo de inundación..

A continuación, se detallan y comparan la gráfica fN y la curva FN para los dos escenarios estudiados: Escenario actual y Escenario Futuro.

▪ **Gráfico fN:**

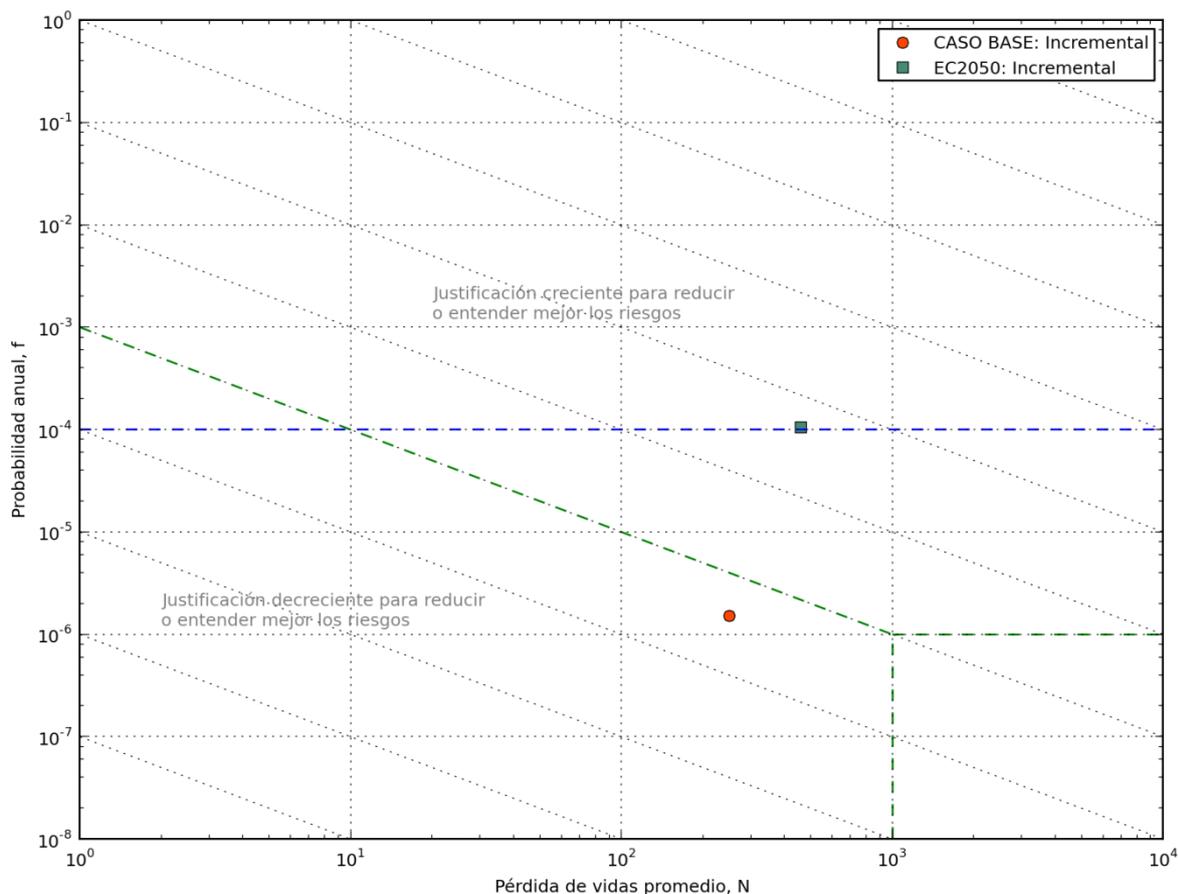


Ilustración 60 Gráfico fN para el Caso Base y Escenario Futuro basándose en las recomendaciones de tolerabilidad de riesgo propuestas por el USBR en el año 2011

A partir del gráfico fN asociado a los dos escenarios podemos deducir:

- El riesgo para el escenario futuro está ubicado por encima y a la derecha respecto de la representación del riesgo del escenario base. Al aumentar las avenidas entrantes al embalse la presa alcanza un valor de probabilidad de fallo superior y en términos de riesgo sociales.
- El escenario actual cumple con las recomendaciones de tolerabilidad propuestas por el USBR. En cambio el escenario futuro no estaría alineado con las recomendaciones propuestas en términos de riesgo individual y social.

▪ **Curva FN:**

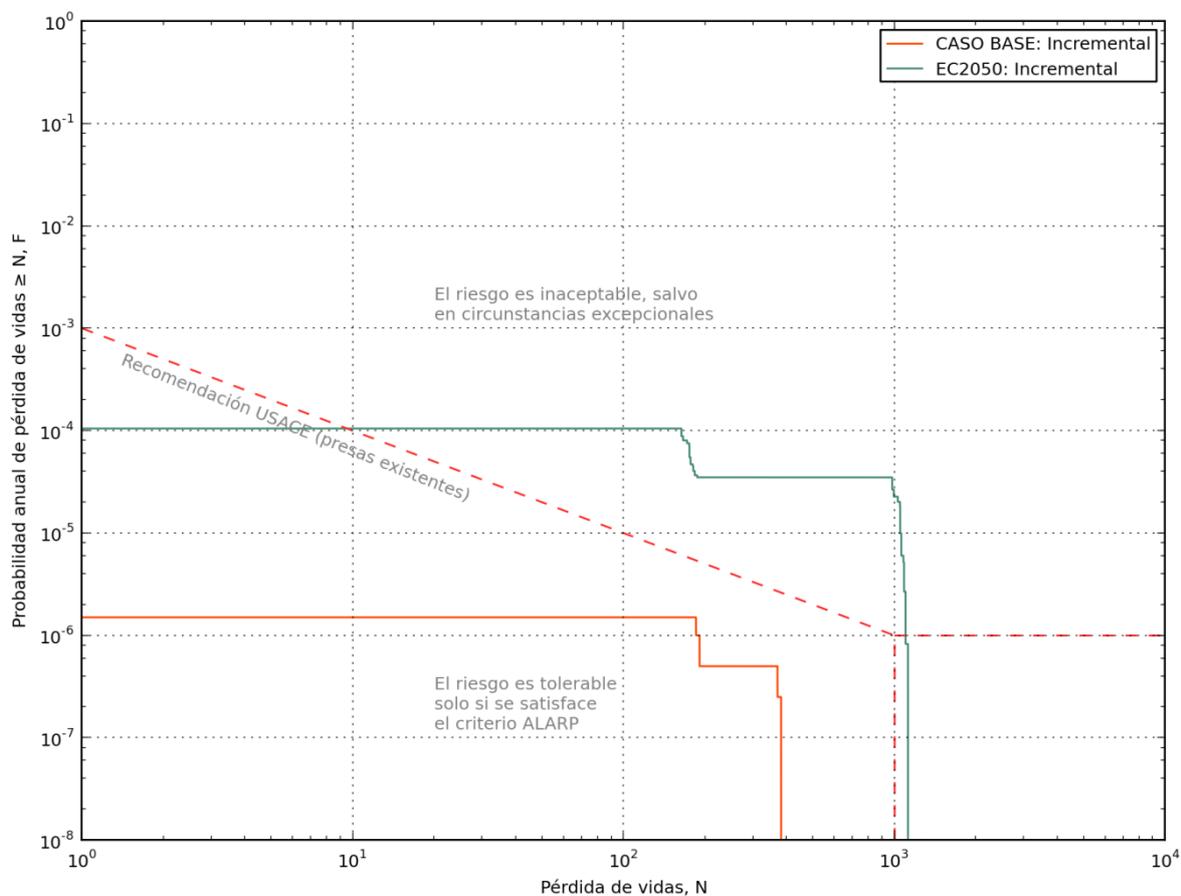


Ilustración 61: Curvas FN para el Caso Base y Escenario Futuro asociadas a las Recomendaciones de tolerabilidad de riesgo social propuesta por el USACE

A partir del gráfico FN asociado a los dos escenarios podemos deducir:

- El escenario actual se encuentra en el interior del área encerrada por las recomendaciones de riesgo social propuestas por la USACE.
- El escenario futuro no estaría alineado con las recomendaciones de tolerabilidad USACE y por tanto sería necesario aplicar medidas de reducción de riesgo.

### 3.2.6 Planteamiento de medidas de reducción del riesgo

Con el objetivo de reducir el riesgo y mejorar la respuesta de la infraestructura hidráulica a presente y futuro, se han definido una serie de medidas, de carácter estructural y no estructural.

A continuación, se identifican las medidas que se han propuesto en la presa 2, indicando el código y acrónimo asociado a cada una de ellas:

<i>Medidas No Estructurales</i>			<i>Medida Estructurales</i>		
<i>Código</i>	<i>Acrónimo</i>	<i>Nombre</i>	<i>Código</i>	<i>Acrónimo</i>	<i>Nombre</i>
02.1	PEP	Plan de Emergencia	02.4	PRE	Pretil
02.2	PFC	Plan de Formación Continua	02.5	ALIV0.5	Rebaje Aliviadero 0.5 m
02.3	MOD	Mejora Operatividad Órganos de Desagüe	02.6	ALIV1	Rebaje Aliviadero 1 m

Tabla 89 Medidas estructurales y no estructurales implantadas sobre los escenarios de la presa 2.

#### 3.2.6.1 Medida 02.1 Plan de Emergencia

Esta mejora consiste en la implantación del Plan de Emergencia para la Presa 2, 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.

Como se ha detallado en el Capítulo 02, la Presa 2 es de categoría A, por ello, es de obligado cumplimiento la implantación de un Plan de Emergencia asociado.

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[4]. En este caso se aplican las tasa de mortalidad asociadas a la categoría C4 en lugar de la categoría C3 escogida para el caso base.

El coste de implantación se ha estimado en 50.000 €, a partir del coste de implantación del Plan de Emergencia en presas de características similares. Además, el coste anualizado de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en un 10% del valor de implantación, resultando en 5.000 €. El coste anualizado es 7.500 €.

En la siguiente imagen se muestran los nodos afectados por la implantación de esta medida de reducción de riesgo:

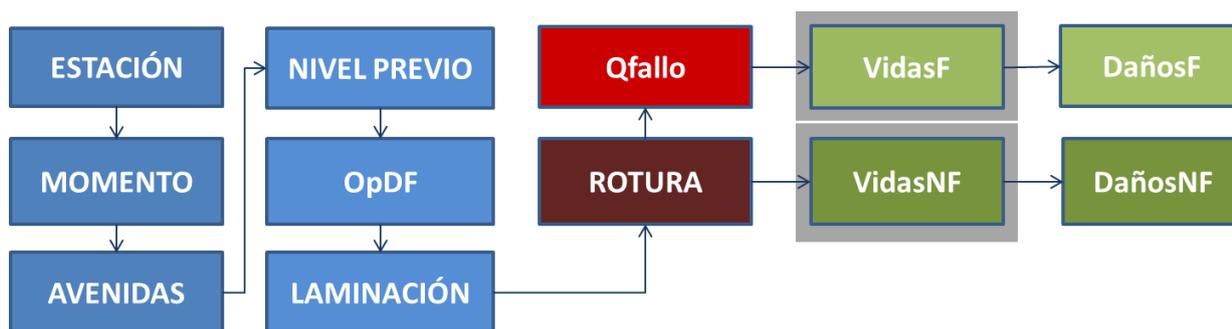


Ilustración 62: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medida 02.1 de reducción de riesgo planteada en la presa 2.

### 3.2.6.2 Medida 02.2 Plan de Formación Continua

Como una medida para completar el Plan de Emergencia nace el Programa de Formación Continua a la población aguas abajo de la Presa. Su objetivo se fija en que la población entienda 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 coordinación entre los servicios de emergencia y fuerzas de seguridad, con el fin de reducir la pérdida de vidas lo máximo posible.

Esta medida se concibe como una complemento al Plan de Emergencia, de manera que no tiene sentido implantarla antes que dicho Plan, es por ello, que a la hora de estudiar el orden de implantación de alternativas, el Plan de Formación llevará asociada una restricción de posición de manera que aunque sea más beneficiosa en términos del indicador utilizado, nunca pueda implantarse antes que el Plan de Emergencia.

Como la alternativa anterior, esta alternativa afecta únicamente a la pérdida de vidas. Por ello, los cálculos realizados de pérdida de vidas se realizan, escogiendo para ello la categoría C10 en lugar de la categoría C4 escogida para el Plan de Emergencia.

El coste de implantación de esta alternativa se ha estimado en 15.000 €. El coste aproximado anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto como la mitad del coste de mantenimiento del Plan de Emergencia. Así, el coste anual de mantenimiento de esta medida es de 2.500 €. El coste anualizado es 3.250 €.

En la siguiente imagen se muestran los nodos afectados por la implantación de esta medida de reducción de riesgo:

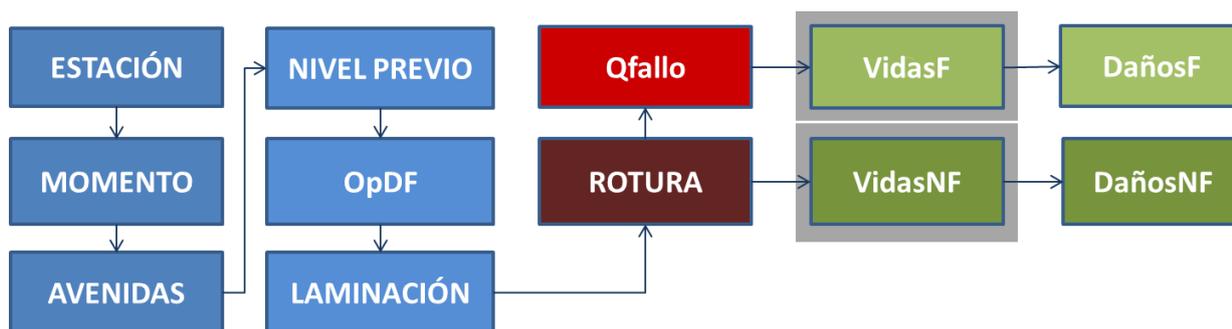


Ilustración 63: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medida 02.2 de reducción de riesgo planteada en la presa 2.

### 3.2.6.3 Medida 02.3 Mejora de Operatividad de los Órganos de Desagüe

En el escenario actual, el régimen de explotación de la Presa 2 no utiliza ninguno de los dos desagües de fondo para la laminación del agua del embalse.

Con la implantación de esta medida se pretende incorporar la operatividad de los desagües de fondo a las reglas de operación de la presa, dotándola de un mayor margen de maniobras ante avenidas futuras. Esto provoca una disminución de la altura máxima alcanzada en el embalse provocando una reducción en la probabilidad de fallo de la presa. 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 incorporar esta medida en el modelo de riesgo, se ha mejorado la fiabilidad del desagüe de fondo, pasando de tener una fiabilidad del 0% en el caso base a 95% en esta medida, fiabilidad asociada a desagües en buenas condiciones y alto nivel de mantenimiento. La hipótesis utilizada en las reglas de operación para abrir estos desagües son los siguientes:

- Cuando el nivel del embalse supere el N.M.N, y,
- Cuando el ratio de ascenso del nivel del embalse supere el ratio de crecimiento medio de una avenidas para las que sobrevierte en el caso base.

El coste de implantación de esta alternativa se ha estimado en 25.000 €, a partir del coste de implantación en presas de características similares. El coste anual de mantenimiento de esta alternativa se ha supuesto en 5.000 €. El coste anualizado es 6.250 €.

En la siguiente imagen se muestran los nodos afectados por la implantación de esta medida de reducción de riesgo:

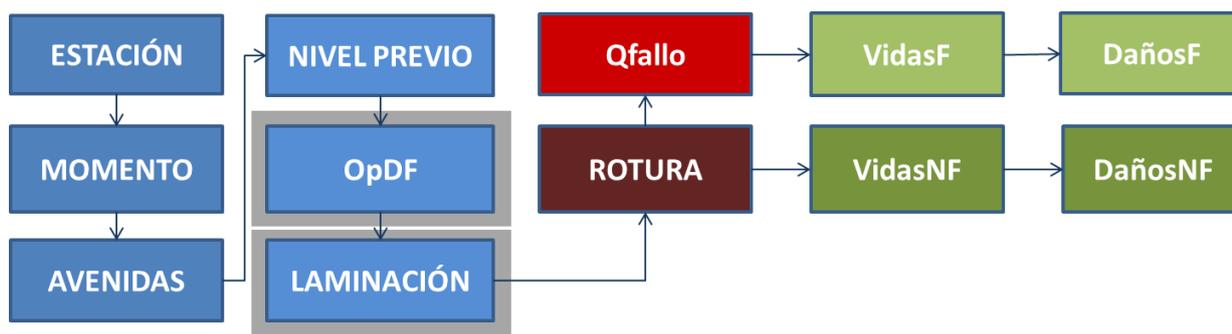


Ilustración 64: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medida 02.3 de reducción de riesgo planteada en la presa 2.

### 3.2.6.4 Medida 02.4 Instalación de Pretil.

Esta alternativa consiste en reforzar y elevar el cuerpo de presa mediante la construcción de un pretil, el cual, 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 0.5 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.

Como hipótesis se considera que el refuerzo de pretil no produce una probabilidad de deslizamiento significativo en la presa.

El coste de implantación del pretil se ha estimado en base al coste de implantación en presas de características similares, considerando un coste de implantación de 13.000 € y un coste anual de mantenimiento de 500 €. El coste anualizado es 1.150 €.

En la siguiente imagen se muestran los nodos afectados por la implantación de esta medida de reducción de riesgo:

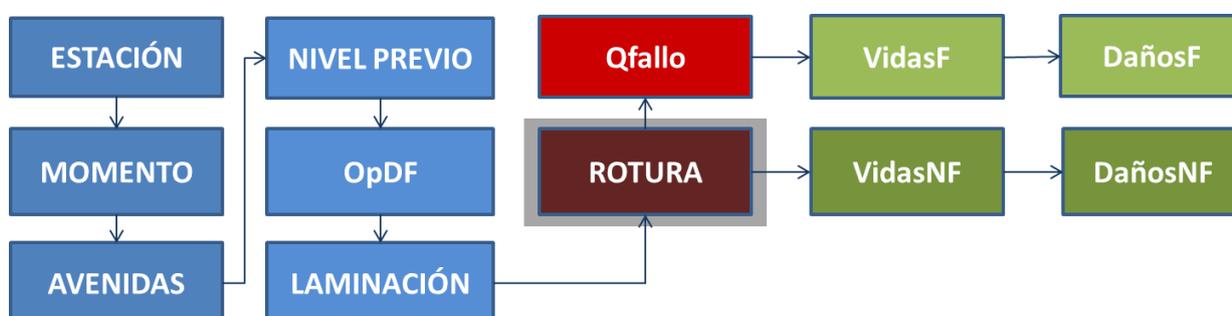


Ilustración 65: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medida 02.4 de reducción de riesgo planteada en la presa 2.

### 3.2.6.5 Medida 02.5 Rebaje Umbral del Aliviadero en 0.5 metros

En esta medida se ha propuesto el rebaje de la cota del umbral del aliviadero con el objetivo de aumentar la capacidad de desagüe.

Esta medida afecta principalmente al nodo laminación de las avenidas y al nodo de Nivel previo, ya que se modifican las curvas de gasto del aliviadero, empezando a verter agua a una cota inferior. Esto provoca una reducción de riesgo por sobrevertido.

La reducción de la cota de salida del agua por aliviadero supone, en contra, una reducción del caudal total almacenado en el embalse, provocando con ello un coste extra asociado al coste de abastecimiento de la población.

El coste de implantación de esta alternativa, en base a proyectos con presas de característica similares, se ha asumido en 60.000 € y un coste anual de mantenimiento igual al coste anual de recurso alternativo unitario multiplicado por el volumen de pérdida de almacenamiento asociado al rebaje del N.M.N, El coste anualizado de la medida es 51.200€.

En la siguiente imagen se muestran los nodos afectados por la implantación de esta medida de reducción de riesgo:

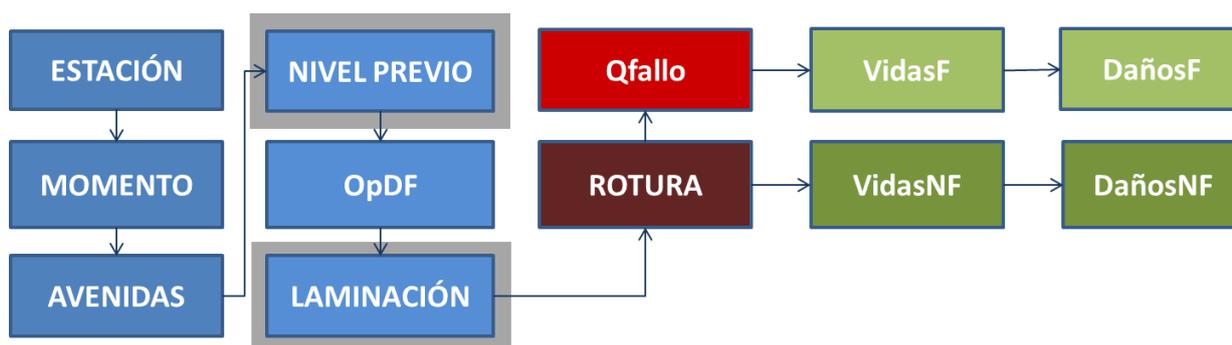


Ilustración 66: Resumen de los nodos del modelo de riesgo afectados por las medida 02.5 y 02.6 de reducción de riesgo planteada en la presa 2.

### 3.2.6.6 Medida 02.6 Rebaje Umbral del Aliviadero en 1 metro

Esta medida es análoga a la alternativa anterior. En ella se modifica el rebaje de medio metro a un metro, aumentando aún más la capacidad de desagüe del aliviadero y por otra parte, aumentando los costes de mantenimiento asociados al abastecimiento de la población.

El coste de implantación de esta alternativa, se ha asumido en 80.000 € y coste de mantenimiento anual del doble que la alternativa anterior, es decir, 96.400 €. El coste anualizado es 102.400 €.

En el siguiente capítulo se representa el riesgo asociado a cada alternativa y se realiza la comparación, en términos de aumento o reducción del riesgo, con el escenario base actual y el escenario futuro.

### 3.2.7 Representación y Evaluación del Riesgo

En este capítulo se representa y se evalúa el efecto de las medidas de reducción de riesgo aplicadas al escenario base.

Dicha representación se realiza bajo las mismas condiciones que en el capítulo 3.2.5:

- Gráfico FN basándose en las recomendaciones de tolerabilidad de riesgo propuestas por el USBR en el año 2011
- Curva FN basándose en las recomendaciones de tolerabilidad de riesgo social propuesta por el USACE.

Además de ello, se muestra una tabla con los valores numéricos de riesgo incremental social, riesgo incremental económico y probabilidad de fallo para el escenario actual junto con las medidas de reducción de riesgo.

<b>Nombre</b>	<b>Código</b>	<b>Riesgo Económico Incremental</b>	<b>Riesgo Social Incremental</b>	<b>Probabilidad de Fallo</b>
		<i>[M€/año]</i>	<i>[Vidas/año]</i>	<i>[1/año]</i>
<i>Escenario Actual: Caso Base</i>	<i>CB</i>	<i>2.27E-05</i>	<i>3.76E-04</i>	<i>1.51E-06</i>
<i>Plan de Emergencia</i>	<i>02.1</i>	<i>2.27E-05</i>	<i>6.85E-05</i>	<i>1.51E-06</i>
<i>Plan Formación Continua</i>	<i>02.2</i>	<i>2.27E-05</i>	<i>2.03E-05</i>	<i>1.51E-06</i>
<i>Mejora Operatividad Órganos de Desagüe</i>	<i>02.3</i>	<i>1.22E-06</i>	<i>2.03E-05</i>	<i>8.11E-08</i>
<i>Pretil</i>	<i>02.4</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>Rebaje del Aliviadero 0.5 m</i>	<i>02.5</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>Rebaje del Aliviadero 1 m</i>	<i>02.6</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>

*Tabla 90: Valores de Riesgo asociados al Caso Base y sus Medidas de Reducción del Riesgo*

▪ **Gráfico fN**

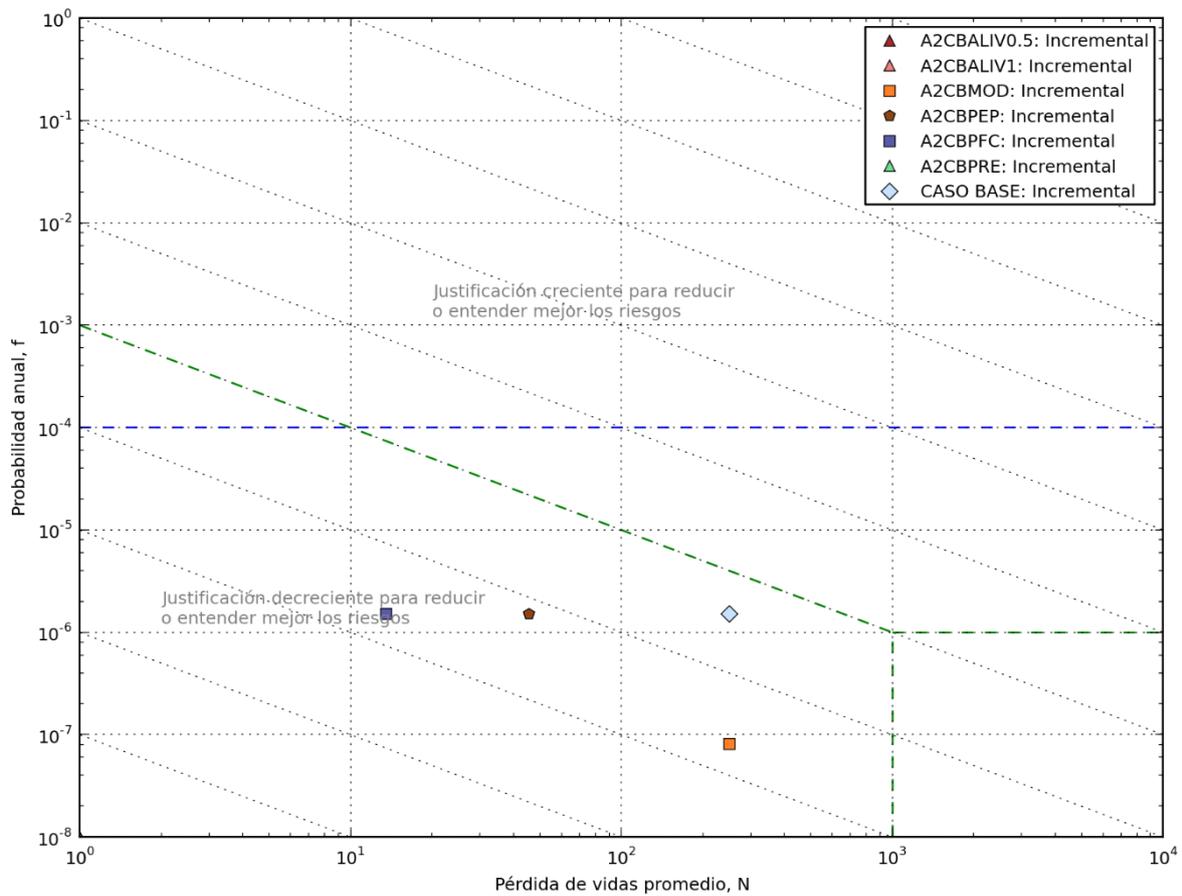


Ilustración 67 Gráfico fN para el Caso Base y Medidas de Reducción de riesgo basándose en las recomendaciones de tolerabilidad de riesgo propuestas por el USBR en el año 2011

En este caso como se puede observar en la Ilustración 67 Gráfico fN para el Caso Base y Medidas de Reducción de riesgo basándose en las recomendaciones de tolerabilidad de riesgo propuestas por el USBR en el año 2011 las medidas estructurales no aparecen representadas al ser cero su probabilidad de fallo.

▪ **Gráfico FN**

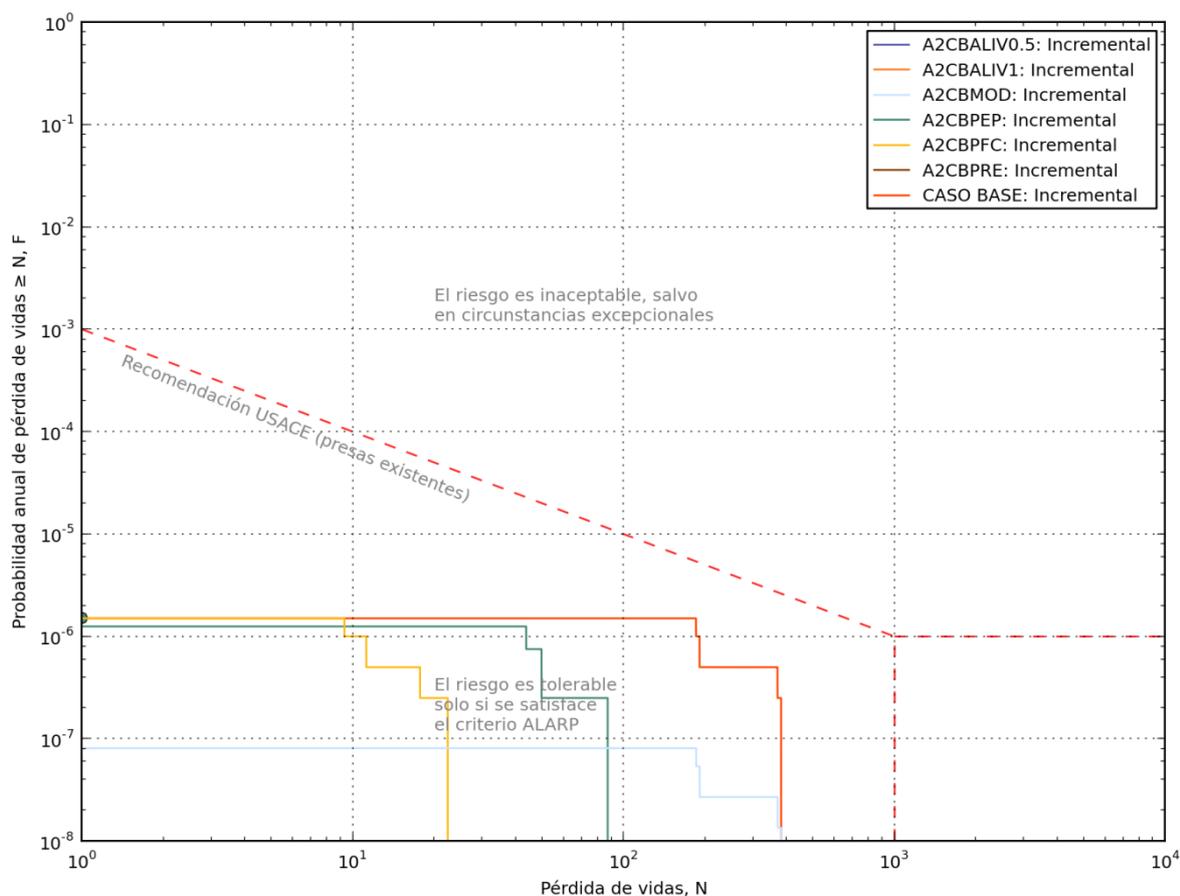


Ilustración 68: Curvas FN para el Caso Base y Medidas de Reducción de riesgo asociadas a las Recomendaciones de tolerabilidad de riesgo social propuesta por el USACE

A partir del gráfico fN y la curva FN asociadas a los dos escenarios podemos obtener las siguientes conclusiones:

- Las medidas de reducción de riesgo asociadas a rebajes en el cuerpo del aliviadero y a la instalación del pretil, al presentar riesgo incremental cero (tabla anterior), no muestran valor en la gráfica fN y en la curva FN. Estas alternativas reducen por ellas mismas, a cero, la probabilidad de fallo de la presa por sobreevertido. Para evaluar su eficiencia, se estudiarán su incidencia sobre el caso base en términos de reducción de riesgo total, y en función del indicador ACSLS.
- El resto de las alternativas reducen el riesgo en mayor o menor medida.

### 3.2.8 Gestión de medidas de reducción del riesgo

Una vez obtenidos los valores de riesgo, y a fin de obtener la secuencia de priorización óptima para la reducción del riesgo, se calcula el indicador ACSLS (Capítulo 2.2.10) para cada medida de reducción de riesgo establecida.

Es necesario recordar, que además del indicador ACSLS se deben considerar unos intervalos de justificación de las medidas, los cuales se muestran a continuación:

- Entre 0 y 6.1 M€ la medida se encuentra muy fuertemente justificada.
- Entre 6.1 y 24.2 M€ la medida se encuentra fuertemente justificada.
- Entre 24.2 y 121.2 M€ la medida se encuentra moderadamente justificada.
- Más de 121.2 M€ la medida está poco justificada.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

<i>Nombre</i>	<i>Código</i>	<i>Coste Anualizado</i>	<i>ACSLS</i>
		<i>[M€/año]</i>	<i>[M€/Vida]</i>
<i>Plan de Emergencia</i>	<i>02.1</i>	<i>7.50E-03</i>	<i>24.36</i>
<i>Plan Formación Continua</i>	<i>02.2</i>	<i>3.25E-03</i>	<i>9.13</i>
<i>Mejora Operatividad Órganos de Desagüe</i>	<i>02.3</i>	<i>6.25E-03</i>	<i>17.49</i>
<i>Pretil</i>	<i>02.4</i>	<i>1.15E-03</i>	<i>3.00</i>
<i>Rebaje del Aliviadero 0.5 m</i>	<i>02.5</i>	<i>5.12E-02</i>	<i>135.98</i>
<i>Rebaje del Aliviadero 1 m</i>	<i>02.6</i>	<i>1.02E-01</i>	<i>272.03</i>

*Tabla 91: Indicador ACSLS asociado a las medidas de reducción de riesgo asociadas al Caso Base.*

El indicador ACSLS representa el coste ajustado por vida estadística salvada, por ello, a menor valor de indicador más ventajosa es la implantación de la medida.

Partiendo de esta hipótesis, a simple vista, en la tabla anterior se puede observar que la implantación del pretil sobre el cuerpo de presa presenta el valor más bajo de indicador y por lo tanto se situará como primera medida a implantar.

Por otra parte, las medidas de rebaje de aliviadero presentan valores de indicador por encima de 121.1 M€, es por ello que serán medidas difíciles de justificar por el alto precio que se necesita invertir para reducir el riesgo social.

En el siguiente capítulo se estudia en detalle la priorización de estas medidas, en función del indicador ACSLS.

### 3.2.9 Priorización de medidas

La secuencia de priorización de medidas se ha realizado en base a las siguientes hipótesis:

- No hay restricción presupuestaria: Se asume que se dispone todo el presupuesto necesario para realizar, a día de hoy, todas las medidas planteadas.
- Se realiza la priorización en base a la eficiencia económica y social de las medidas de reducción de riesgo.

La tabla siguiente muestra los resultados de priorización.

<b>PRIORIZACIÓN DE MEDIDAS DE REDUCCIÓN DEL RIESGO RESPECTO DEL ESCENARIO ACTUAL: CASO BASE</b>							
Alternativas		PEP	PFC	MOD	PRE	ALIVO.5	ALIV1
Coste Anualizado "Ca"	[M€/año]	7.50E-03	3.25E-03	7.50E-03	5.58E-02	5.58E-02	9.93E-02
Escenario				Caso Base			
Riesgo Económico Incremental	[M€/año]			2.27E-05			
Riesgo Social Incremental	[Vidas/año]			3.76E-04			
Probabilidad de Fallo	[1/año]			1.51E-06			
Alternativas		CB+PEP	CB+PFC	CB+MOD	CB+PRE	CB+ALIVO.5	CB+ALIV1
Riesgo Económico Incremental	[M€/año]	2.27E-05	2.27E-05	1.22E-06	0	0	0
Riesgo Social Incremental	[Vidas/año]	6.85E-05	2.03E-05	2.03E-05	0	0	0
Probabilidad de Fallo	[1/año]	1.51E-06	1.51E-06	8.11E-08	0	0	0
ACSL5	[M€/Vida]	24.36	9.13	17.49	3.00	135.98	272.03

Tabla 92: Priorización de medidas respecto del Escenario actual: Caso Base para la Presa 2

Realizando el primer paso de priorización, se obtiene como medida con mejor indicador la correspondiente a la implantación, sobre el escenario actual, de un pretil sobre el cuerpo de presa. Debido a que esta alternativa lleva asociados probabilidad de fallo nula, la secuencia de priorización para el escenario actual, en términos de reducción del riesgo incremental, finalizaría en este paso.

Para las hipótesis realizadas y el modelo planteado, como conclusión, se puede decir, que únicamente es necesario aplicar la alternativa de pretil para reducir a cero el sobrevertido por coronación y por tanto reducir a cero la probabilidad de fallo de la presa.

Como se puede apreciar en la tabla, implantar las alternativas de reducción de umbral de aliviadero también reduciría a cero la probabilidad de fallo de la presa, pero lo haría a un mayor coste.

Como se ha comentado, las tres medidas con probabilidad de fallo cero anulan la probabilidad asociada al sobrevertido,. Además se analizan las tres alternativas en términos de reducción de riesgo total.

La siguiente tabla muestra el riesgo total asociado a la implantación de estas tres medidas sobre el escenario actual:

	<b>Riesgo Total Social</b>	<b>Riesgo Total Económico</b>	<b>Reducción Riesgo Social</b>	<b>Reducción Riesgo Económico</b>
	[Vidas/año]	[M€/año]	[Vidas/año]	[M€/año]
CB	1.49037	0.07298		
CB+PRE	1.48985	0.07295	<b>5.20E-04</b>	<b>2.97E-05</b>
CB+ALIV0.5	1.53832	0.07533	<b>-4.80E-02</b>	<b>-2.34E-03</b>
CB+ALIV1	1.56805	0.07678	<b>-7.77E-02</b>	<b>-3.80E-03</b>

Tabla 93: Reducción del Riesgo Total para 3 alternativas respecto el escenario base actual.

De esta tabla se pueden extraer algunas conclusiones:

- Todas las alternativas reducen el riesgo por sobrevertido, pero no anulan el riesgo total asociado a la inundación.
- Las alternativas asociadas al rebaje del pretil aumentan el riesgo total, tanto económico como social de la población aguas abajo, ya que aumenta el riesgo asociado a la inundación por eventos de no rotura de la presa.

La alternativa asociada a la construcción del pretil anula la probabilidad de rotura de la presa y reduce el riesgo total, por lo que sería la alternativa más adecuada. A continuación, se realiza la priorización de todas las alternativas a escenario futuro, partiendo de la situación “Escenario futuro + pretil” como punto de partida de este análisis.

Bajo esta nueva hipótesis de partida, en las siguientes ilustraciones se muestra el riesgo incremental en base a los siguientes criterios:

- Gráfico FN basándose en las recomendaciones de tolerabilidad de riesgo propuestas por el USBR en el año 2011.
- Curva FN basándose en las recomendaciones de tolerabilidad de riesgo social propuesta por el USACE.

▪ **Gráfico fN**

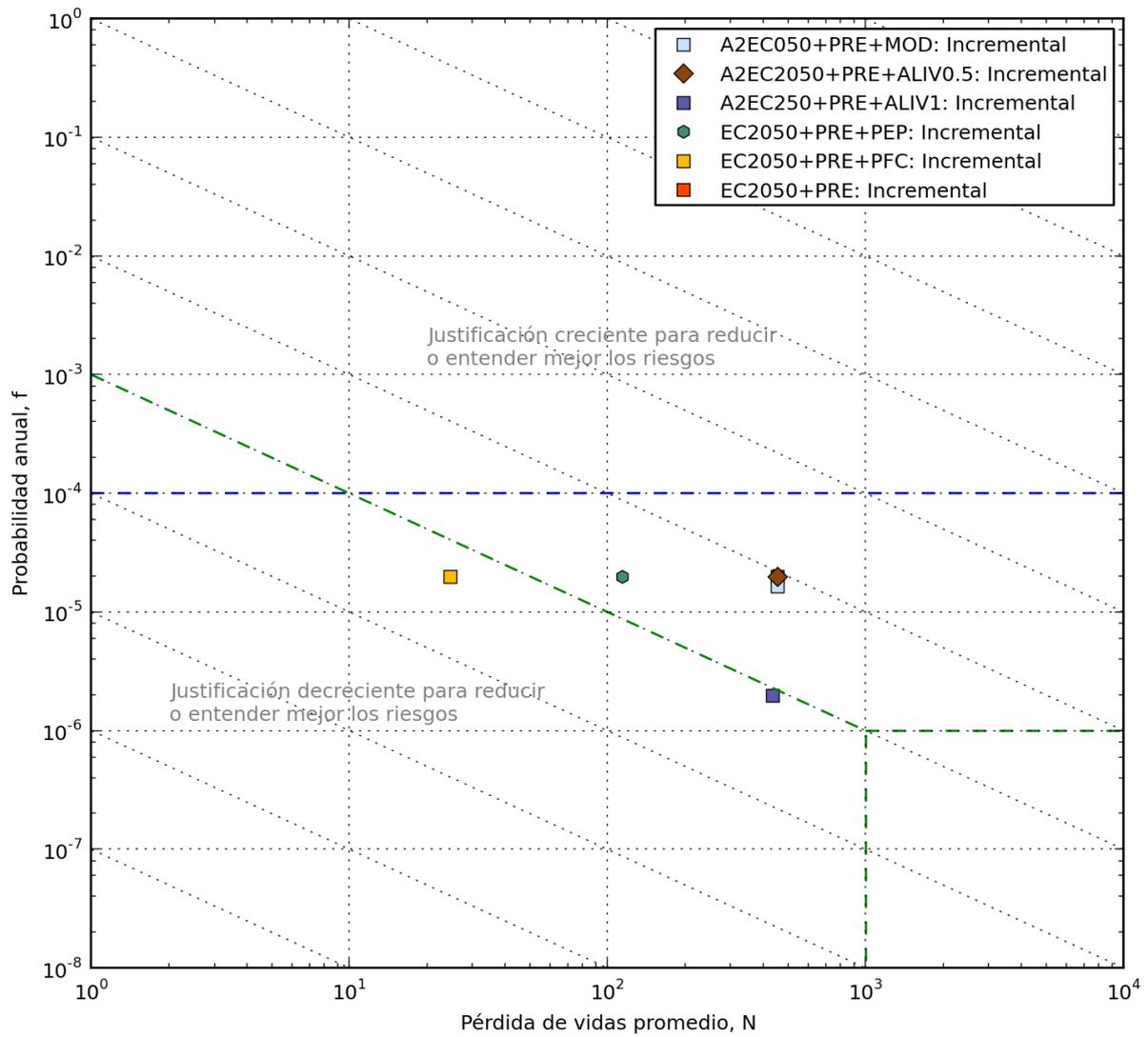


Tabla 94 Gráfico fN para el escenario futuro y Medidas de Reducción de riesgo basándose en las recomendaciones de tolerabilidad de riesgo propuestas por el USBR en el año 2011

▪ **Gráfico FN**

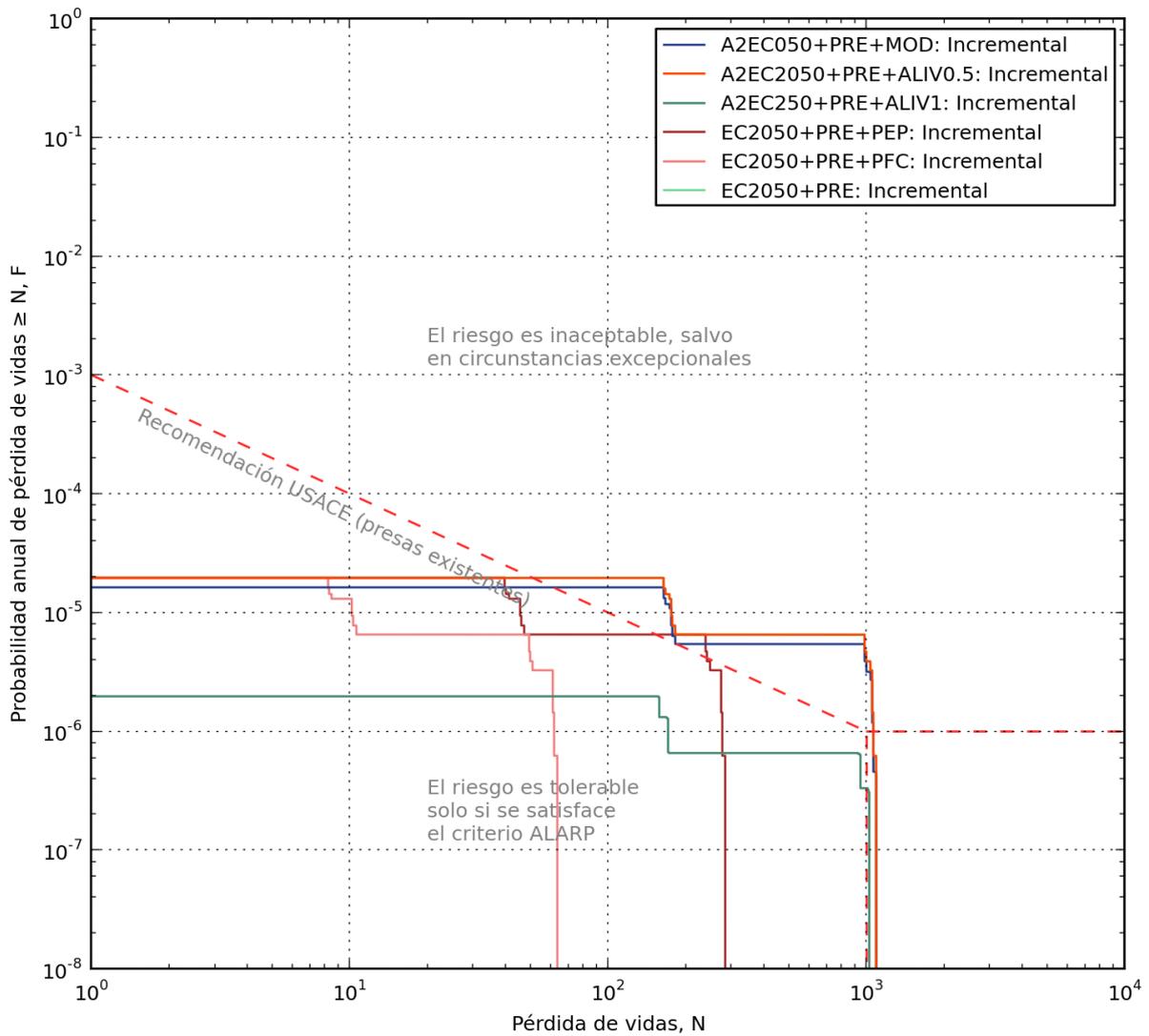


Tabla 95: Curvas FN para el Futuro y Medidas de Reducción de riesgo asociadas a las Recomendaciones de tolerabilidad de riesgo social propuesta por el USACE

A continuación, se muestra la secuencia de priorización de medidas de reducción de riesgo para el escenario futuro:

<b>PRIORIZACIÓN DE MEDIDAS DE REDUCCIÓN DEL RIESGO RESPECTO DEL ESCENARIO FUTURO</b>							
		PEP	PFC	MOD	PRE	ALIVO.5	ALIV1
Coste Anualizado Ca	[M€/año]	7.50E-03	3.25E-03	7.50E-03	5.58E-02	5.58E-02	9.93E-02
<b>PASO</b>	<b>1</b>	<b>EC2050+PRE</b>					
Riesgo Económico Incremental	[M€/año]			3.52E-04			
Riesgo Social Incremental	[Vidas/año]			8.98E-03			
Probabilidad de Fallo	[1/año]			1.97E-05			
<b>Alternativas</b>		<b>EC2050 + PRE + PEP</b>	<b>EC2050 + PRE + PFC</b>	<b>EC2050 + PRE + MOD</b>	<b>EC2050 + PRE + ALIVO.5</b>	<b>EC2050 + PRE + ALIV1</b>	
Riesgo Económico Incremental	[M€/año]	3.52E-04	3.52E-04	2.93E-04	3.52E-04	3.42E-05	
Riesgo Social Incremental	[Vidas/año]	2.25E-03	4.86E-04	7.46E-03	8.95E-03	8.62E-04	
Probabilidad de Fallo	[1/año]	1.97E-05	1.97E-05	1.64E-05	1.96E-05	1.97E-06	
ACSL5	[M€/Vida]	1.12	0.38	4.09	2382.97	12.58	
<b>PASO</b>	<b>2</b>	<b>EC2050 + PRE + PEP</b>					
<b>Alternativas</b>		<b>EC2050 + PRE + PEP + PFC</b>	<b>EC2050 + PRE + PEP + MOD</b>	<b>EC2050 + PRE + PEP + ALIVO.5</b>	<b>EC2050 + PRE + PEP + ALIV1</b>		
Riesgo Económico Incremental	[M€/año]	3.52E-04	2.93E-04	3.52E-04	3.42E-05		
Riesgo Social Incremental	[Vidas/año]	4.86E-04	1.87E-03	2.25E-03	2.18E-04		
Probabilidad de Fallo	[1/año]	1.97E-05	1.64E-05	1.96E-05	1.97E-06		
ACSL5	[M€/Vida]	1.84	16.28	9461.26	50.12		
<b>PASO</b>	<b>3</b>	<b>EC2050 + PRE + PEP + PFC</b>					
<b>Alternativas</b>		<b>EC2050 + PRE + PEP + PFC + MOD</b>	<b>EC2050 + PRE + PEP + PFC + ALIVO.5</b>	<b>EC2050 + PRE + PEP + PFC + ALIV1</b>			
Riesgo Económico Incremental	[M€/año]	2.93E-04	3.52E-04	3.42E-05			
Riesgo Social Incremental	[Vidas/año]	4.04E-04	4.85E-04	4.70E-05			
Probabilidad de Fallo	[1/año]	1.64E-05	1.96E-05	1.97E-06			
ACSL5	[M€/Vida]	75.48	43826.04	232.44			

Tabla 96: Priorización presa 2 para el escenario futuro

De la tabla asociada a la priorización podemos sacar algunas conclusiones:

- La medida a implantar en segundo lugar tras la implantación del pretil sería el Plan de Emergencia, seguido del Plan de Formación Continua.

Finalmente, el orden de priorización para la presa 2 presenta el siguiente orden:

<b>SECUENCIA DE PRIORIZACIÓN PRESA 2</b>		
<i>ORDEN DE PRIORIZACIÓN</i>	<i>MEDIDAS</i>	<i>ACSLs [M€]</i>
1	<i>CB + PRE</i>	<i>3.00</i>
2	<i>EC2050 + PRE + PEP</i>	<i>1.12</i>
3	<i>EC2050 + PRE + PEP + PFC</i>	<i>1.84</i>
4	<i>EC2050 + PRE + PEP + PFC + MOD</i>	<i>75.48</i>

*Tabla 97 Secuencia de Priorización de Medidas Presa 2*

Como se puede observar en esta tabla la primera medida a implantar es el pretil en el caso base. Para reducir el riesgo en el escenario 2050 se traslada esta medida y junto con el resto se define la secuencia de medidas en este escenario. El plan de emergencia será la siguiente medida a implantar. Tras la implantación del plan de emergencia se procede con el plan de formación continua para finalizar con la implantación de la mejora de la operatividad de los órganos de desagüe de fondo



## **CAPITULO 04. ANÁLISIS CONJUNTO**



Una vez realizada la secuencia de priorización para cada una de las dos presas del sistema por separado, se procede a realizar la priorización conjunta de ambas. De esta forma se pretende definir una secuencia de priorización conjunta en base al indicador ACSLS calculado en los capítulos anteriores. Para ello, se emplean los resultados de cada secuencia individual para establecer los pasos que componen la secuencia conjunta a partir del indicador ACSLS.

<b>SECUENCIA DE PRIORIZACIÓN PRESA 1</b>			<b>SECUENCIA DE PRIORIZACIÓN PRESA 2</b>		
<i>ORDEN DE PRIORIZACIÓN</i>	<i>MEDIDAS</i>	<i>ACSLs [M€/vida]</i>	<i>ORDEN DE PRIORIZACIÓN</i>	<i>MEDIDAS</i>	<i>ACSLs [M€/vida]</i>
1	PRETIL	1.26	1	PRETIL	3
2	PLAN DE EMERGENCIA	12.02	2	PLAN DE EMERGENCIA	1.12
3	MEJORA OD	13.98	3	PLAN DE FORMACIÓN CONTINUA	1.84
4	PLAN DE FORMACIÓN CONTINUA	31.41	4	MEJORA OD	75.48

Tabla 98 Secuencia de Priorización para Presa 1 y 2 por separado.

<i>ORDEN DE PRIORIZACIÓN</i>	<i>ESCENARIO</i>	<i>MEDIDA</i>	<i>ACSLs [M€/vida]</i>
1	ACTUAL 2018	PRETIL PRESA 1	1.26
2	ACTUAL 2018	PRETIL PRESA 2	3.00
3	FUTURO 2050	PLAN DE EMERGENCIA PRESA 2	1.12
4	FUTURO 2050	PLAN DE FORMACIÓN CONTINUA PRESA 2	1.84
5	FUTURO 2050	PLAN DE EMERGENCIA PRESA 1	12.02
6	FUTURO 2050	MEJORA OPERATIVIDAD OD PRESA 1	13.98
7	FUTURO 2050	PLAN DE FORMACIÓN CONTINUA PRESA 1	31.41
8	FUTURO 2050	MEJORA OPERATIVIDAD OD PRESA 2	75.48

Tabla 99 Secuencia de priorización conjunta.

En base a los resultados obtenidos en la priorización conjunta se deriva que la primera actuación sería la medida estructural correspondiente a la ejecución del pretil en la Presa 1 para seguir con la medida análoga para la Presa 2.

Ambas medidas eliminarían la probabilidad de fallo por sobrevvertido en el escenario actual. Por tanto, los pasos siguientes se definen en función de los resultados para el escenario 2050, resultando el siguiente paso en la ejecución de medidas no estructurales sobre la Presa 2, primero con la implantación de un Plan de Emergencia y posteriormente con un Plan de Formación Continua.

El siguiente paso para reducir el riesgo consistirá en la implantación del Plan de Emergencia de la Presa 1, prosiguiendo para esta misma presa, con la mejora de los desagües de fondo. La siguiente actuación a realizar también corresponde a la Presa 1 con la implantación del Plan de formación continua.

Una vez implantadas estas medidas sobre la Presa 1, la secuencia finalizaría con la mejora de la operatividad de los órganos de desagüe de la Presa 2.

A continuación, se detallan en tres gráficos, la reducción de riesgo económico, la reducción de riesgo social y la reducción de probabilidad de fallo que experimenta el sistema a lo largo de la secuencia de priorización en función del coste anualizado.

### Reducción de Probabilidad de Fallo Agregado

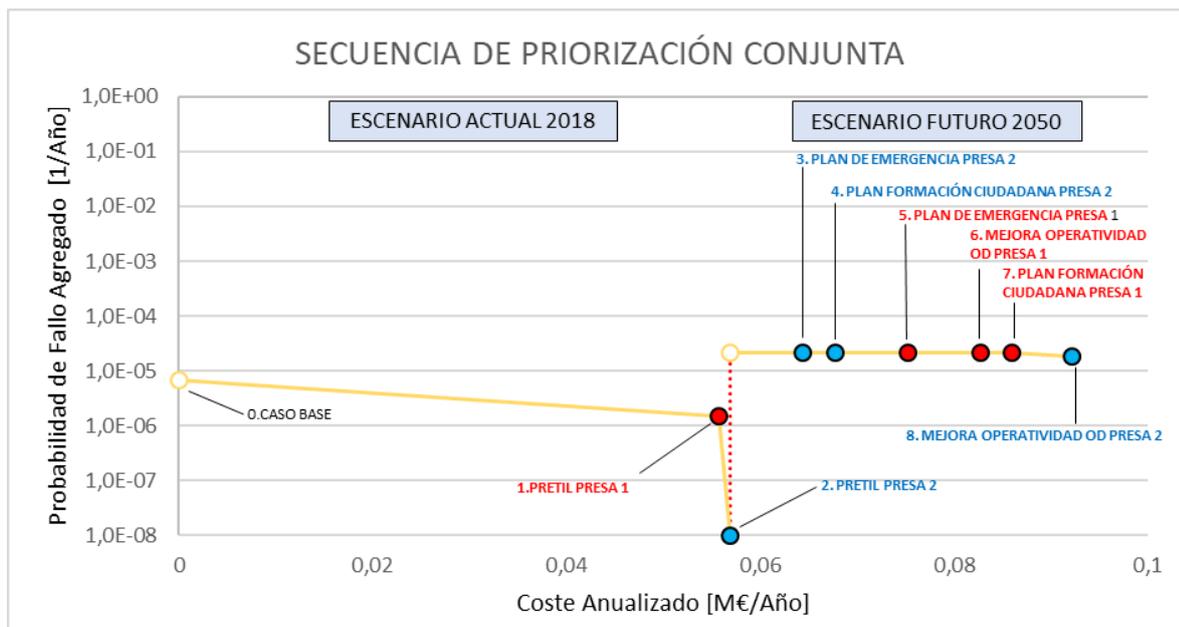


Ilustración 69 Secuencia de Priorización conjunta mostrando la reducción de probabilidad de fallo agregada

### Reducción de Riesgo Económico Agregado

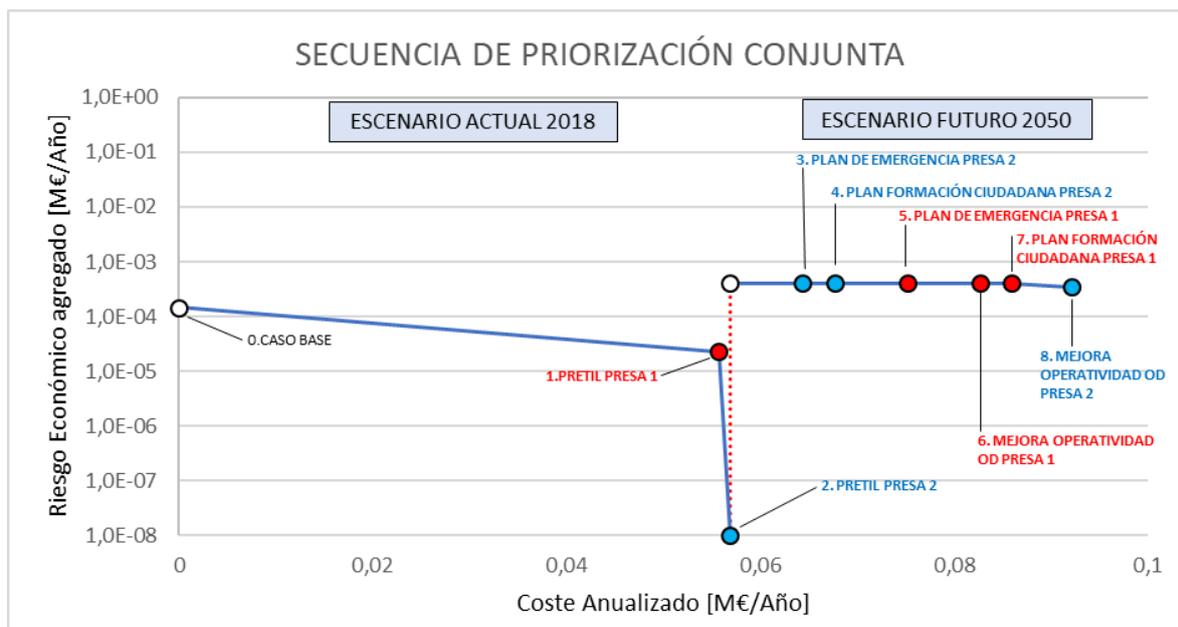


Ilustración 70 Secuencia de Priorización conjunta mostrando la reducción de riesgo económico agregada

En las tablas anteriores no se aprecia reducción del riesgo económico entre las medidas estructurales dado que este no varía entre ellas, en cambio en las medidas no estructurales sí que existe una disminución del riesgo económico agregado.

En la Ilustración 71 se representa la reducción de riesgo social agregado, donde se refleja con mayor claridad la disminución del riesgo al aplicar tanto las medidas estructurales como las no estructurales.

### Reducción de Riesgo Social Agregado

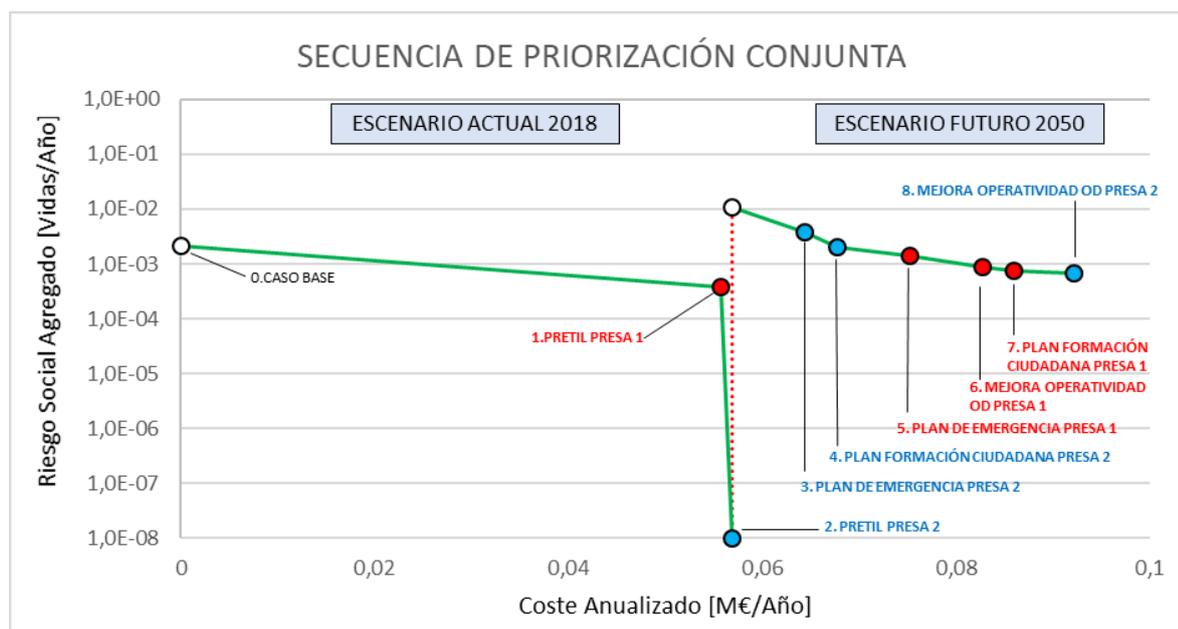


Ilustración 71 Secuencia de Priorización conjunta mostrando la reducción de riesgo social agregada

Sobre la base de los resultados anteriores, se derivan las siguientes conclusiones:

- En términos de probabilidad de fallo, las medidas propuestas permitirían alcanzar de forma eficiente un escenario futuro alineado con las recomendaciones internacionales de tolerabilidad en términos de riesgo individual.
- En términos de reducción del riesgo social incremental agregado, tras la implementación de las ocho medidas planteadas se alcanzaría en escenario futuro un nivel de riesgo inferior al del caso base. Con ello, se puede afirmar que la aplicación de las medidas propuestas para reducir el riesgo, desde el punto de vista social, garantizaría un nivel de riesgo a futuro inferior al actual y alineado con las recomendaciones internacionales de tolerabilidad en términos de eficiencia social.
- En cuanto a la reducción de riesgo económico, las medidas planteadas presentan la secuencia óptima de priorización combinando tanto eficiencia social como económica, alcanzando un nivel de riesgo agregado del orden de  $3 \times 10^{-4}$  Millones de euros/año en el escenario futuro.

En resumen, para la situación actual, con la aplicación de una única medida para cada presa se consigue reducir el riesgo de sobrevertido a cero (para las hipótesis y modelo empleados). Para la situación futura las medidas no consiguen la reducción total del riesgo por sobrevertido pero sí disminuirlo de forma eficiente.

## **CAPITULO 05. CONCLUSIONES**



Una vez realizado el Análisis de Riesgo de las dos presas y calculada la secuencia de priorización de medidas conjunta, se resumen las siguientes conclusiones:

- Ambas presas presentan en la actualidad buena respuesta ante las avenidas entrantes potenciales. Para avenidas extremas se ha comprobado que ambas presas presentarían eventos de sobrevertido. Debido al riesgo actual existente, resulta de especial importancia la definición de diferentes medidas de reducción de riesgo.
- En este trabajo, se ha podido comprobar que medidas no estructurales como la implantación de Planes de Emergencia y Planes de Formación Continua reducen el riesgo social considerablemente. De estos resultados se deduce que la seguridad de presas debe tener en cuenta otros factores que no están asociados directamente con la seguridad de la infraestructura, como son la efectividad de los mecanismos de gestión de emergencias.
- La implantación de otras medidas, tales como elevación de la cota de coronación y mejora de los órganos de desagüe pueden reducir notablemente el riesgo. El rebaje del aliviadero no ha resultado ser una medida a implantar dado que los indicadores ACSLS obtenidos son altos, lo que se traduce en medidas cuya implantación no está suficientemente justificada.
- El resultado del Plan de Actuaciones Conjunto, dado que se ha realizado con indicadores de eficiencia social y económica, proporciona una secuencia de actuaciones que permite efectuar una gestión de la seguridad de las presas más eficiente. Esto permite hacer un uso responsable y justificado de las inversiones económicas que se destinan a estas infraestructuras. Por tanto, como se ha reflejado en este trabajo un uso responsable y justificado de las inversiones económicas conlleva tener en cuenta todos los factores que intervienen en la seguridad de presas para poder evaluar y analizar el riesgo de estas infraestructuras, como son el carácter dinámico de los sistemas presa-embalse y su componente socioeconómica.

Para finalizar, durante la realización de este trabajo se ha estudiado el estado del arte en materia de gobernanza de riesgos en seguridad de presas y desde la visión de futuros técnicos en Ingeniería Civil se concluye que resulta de especial importancia mejorar la gestión de las infraestructuras hidráulicas de las que cada vez es más dependiente la sociedad, considerando criterios de sostenibilidad, así como equidad y eficiencia, tanto en su componente social como económica.



## **CAPITULO 06. REFERENCIAS**

- [1] SPANCOLD (2012): Análisis de Riesgos aplicado a la Seguridad de Presas y Embalses. Guía Técnica de Explotación de Presas y Embalses, N.8,Vol.I.
- [2] ANCOLD. Guidelines on Risk Assessment. Australian National Committee on Large Dams, 2003
- [3] Graham, Wayne J.: A procedure for estimating loss of life caused by dam Failure. U.S. Department of Interior. Bureau of Reclamation, DSO-99-06, 1999
- [4] Graham, Wayne J.: A comparison of methods for estimating loss of life from dam failure. In 29th USSD Annual Meeting and Conference on Managing our Water Retention Systems, pages 1145–1165, Abril 2009
- [5] Morales, Adrián 2012: *Herramienta de gestión continua de actuaciones en seguridad de presas con indicadores de riesgo*. Universitat Politecnica de Valencia
- [6] USBR. Dam Safety Public Protection Guidelines. A Risk Framework to Support Dam Safety Decision-Making. United States Bureau of Reclamation. Dam Safety Office, 2011
- [7] 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  
[www.sufri.tugraz.at](http://www.sufri.tugraz.at)
- [8] I. Escuder-Bueno, J.T. Castillo-Rodríguez, A. Morales Torres, L. Altarejos García. (2013) Metodología completa y cuantitativa de análisis del riesgo de inundación en zonas urbanas. ISBN: 978-84-9048-121-9
- [9] J.T. Castillo-Rodríguez(2016), Seguridad de presas y embalses: hacia una gestión informada en riesgo <https://www.iagua.es/blogs/jessica-castillo/seguridad-presas-y-embalses-viaje-continua>
- [10] I. Escuder-Bueno, J. González Pérez (2014) Metodología para la evaluación del riesgo hidrológico de presas y priorización de medidas correctoras ISBN: 978-84-380-0465-4
- [11] Manual de iPresas Flood. Versión 1.0.1
- [12] INE <https://www.ine.es/dyngs/INEbase>
- [13] INE. <http://www.ine.es/varipc/index.do>.
- [14] MAGRAMA (2013) Propuesta de Mínimos para la metodología de realización de los Mapas de Riesgo de Inundación. Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente.
- [15] MAGRAMA, (2016) Seguridad de presas. <http://www.magrama.gob.es/es/>
- [16] Garijo, C., Mediero, L., Garrote, L. (2018) Utilidad de las proyecciones climáticas generadas por AEMET para estudios de impacto del cambio climático sobre avenidas a escalanacional. *Ingeniería del Agua*, 22.(3),153-166.  
<https://doi.org/10.4995/la.2018.9312>
- [17] Mediero, L., Soriano, E., Garijo, C. (2018): Cuantificación de los cambios esperables por el efecto del Cambio Climático en las leyes de frecuencia de caudal y volumen utilizadas en el diseño y comprobación de la seguridad hidrológica de presas, XI Jornadas Españolas de (2012): Presas, León, 25-29 Junio 2018, Comité Nacional Español de Grandes Presas. ISBN 84-89567-23-9
- [18] IPCC, 2014: Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de

- Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs
- [19] AEMET, (2017). AEMET, Agencia Estatal de Meteorología de España 2017. Proyecciones climáticas para el siglo XXII.  
[http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio\\_climat](http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat)
- [20] Rodríguez, E., Picatoste, J.R., & Heras, F.H. (2014). Quinto informe de evaluación del IPCC: Bases físicas. Tiempo y Clima 5 (43), 36-41
- [21] Norma 5.2-IC de drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras, Orden FOM/298/2016 de 15 de febrero de 2016.