

Proyecto Fin de Carrera

“DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE
ELABORACIÓN DE LOS ESTUDIOS DE ROTURA DE
BALSA PARA LA EVALUACIÓN DE
PELIGROSIDAD CON LA HERRAMIENTA IBER.
DESARROLLO DE UN EJEMPLO COMPLETO”

MEMORIA

Autor/es

Joaquín Borrueal Capdevila

Director/es

Luís Díaz
Susana García Asín

INGENIERO AGRÓNOMO
Escuela Politécnica Superior Huesca
2017

ÍNDICE FIGURAS

FIGURA 1. Casos de altura de la balsa en función del terreno.....	7
FIGURA 2: Casos especiales de consideración de altura de la balsa	8
FIGURA 3: Volumen movilizable	9
FIGURA 4: Ámbito de aplicación.....	10
FIGURA 5: Cuencas hidrográficas y Comunidades Autónomas	12
FIGURA 6: Competencias en función de la ubicación respecto del Dominio Público Hidráulico...	13
FIGURA 7: Competencias y Órganos Competentes por Comunidades Autónomas	13
FIGURA 8: Gráficos en función del calado y la velocidad Guía Técnica	15
FIGURA 9. Esquema general proceso obtención propuesta de clasificación	20
FIGURA 10: Modelo 1-D a la izquierda. Modelo 2-D a la derecha.....	22
FIGURA 11: formación de la brecha de rotura con deformación de la malla.....	23
FIGURA 12: Esquema proceso de elaboración de estudio para la clasificación de balsa con Iber	27
FIGURA 13: Modelización de la geometría de la zona de estudio	30
FIGURA 14. Plano de zona de inundación en Autocad, zonas y edificios.....	32
FIGURA 15. Zonas definidas mediante polígonos cerrados (geometrías)	
FIGURA 16. Geometrías y superficies sobre ortofoto	34
FIGURA 17. Mallado no estructurado triangular con diferentes tamaños de malla según zonas	35
FIGURA 18. Geometrías RTIN	37
FIGURA 19. Mallado coincidente con el raster MDE con herramienta GDAL	39
FIGURA 20. Condición inicial cota en el interior de la balsa	40
FIGURA 21 Condición de salida del modelo en el contorno de la malla	42
FIGURA 22 Asignación de usos de suelo.....	43
FIGURA 23 .Rotura de forma trapezoidal progresiva	44
FIGURA 24.Esquema brecha de rotura geometría trapezoidal Guía Técnica.....	45
FIGURA 25. Esquema geometría brecha y eje generatriz. Representación en Iber	45
FIGURA 26. Deformación de la malla de cálculo para la evolución de la formación de la brecha	46
FIGURA 27 Ejemplo de mapa generado con Iber de calados máximos	50
FIGURA 28. Criterios de peligrosidad.....	51
FIGURA 29: Ejemplo de mapa de peligrosidad según RD9/2008.....	51
FIGURA 30. Ejemplo de gráfico de máximos de nivel de agua en una sección	52
FIGURA 31. Sonda de evolución de calado a lo largo del tiempo en un punto.....	53
FIGURA 32 Hidrogramas en dos secciones diferentes del terreno.....	53

ÍNDICE TABLAS

TABLA 1 Tabla orientativa de la Guía Técnica para valorar los daños	17
---	----

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS	2
3	REVISIÓN LEGISLACIÓN Y NORMATIVA EN MATERIA DE CLASIFICACIÓN Y SEGURIDAD EN BALSAS	3
3.1	Antecedentes legislación en materia de seguridad de presas y embalses	3
3.2	Normativa aplicable balsas	4
3.3	Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril	6
3.3.1	Definiciones	6
3.3.2	Ámbito de aplicación. Clasificación de balsas	10
3.3.3	Categorías	11
3.3.4	Ámbito competencial:.....	11
3.3.5	Distribución de responsabilidades	14
3.4	Guía Técnica para la Clasificación de Presas en Función del Riesgo Potencial.....	14
3.5	Normativa y legislación en la Comunidad Autónoma de Aragón en materia de seguridad de embalses, presas y balsas.	18
3.5.1	Ley 10/2014 de Aguas y Ríos de Aragón.	18
3.5.2	Borrador Decreto del Gobierno de Aragón por el que se aprueba el Reglamento regulador de clasificación y registro de presas, embalses y balsas competencia de la Administración de la Comunidad Autónoma de Aragón	18
4	Descripción de la metodología propuesta para la elaboración de los estudios de avenida de onda de rotura de balsa para su clasificación	20
4.1	Esquema general.....	20
4.2	Selección del método de modelización.....	21
4.3	IBER	¡Error! Marcador no definido.
4.3.1	Esquema del proceso con IBER	27
4.4	Establecimiento de escenarios de rotura	28
4.5	Delimitación de la zona de estudio	29
4.6	Definición de la geometría: Creación de geometrías y superficies y mallado	30
4.6.1	Crear geometrías y superficies para zonas,, mallado y elevar la malla a través del raster de MDT.....	32
4.6.2	Crear superficies RTIN a través del raster de MDT y mallado estructurado coincidente con el RTIN	37
4.6.3	Crear superficies directamente del raster de MDT y mallado coincidente con este raster (importar GDAL)	39
4.7	Condiciones iniciales	40
4.8	Condiciones de contorno (entrada y salida).....	40
4.8.1	Condición de entrada.....	41
4.8.2	Condiciones de salida.....	41
4.9	Rugosidad y usos del suelo.....	42
4.10	Definición de la brecha de rotura.....	44
4.11	Propagación de la onda de rotura. Cálculo y simulación	47
4.11.1	Datos del problema	47
4.11.2	Cálculo y simulación	49
4.12	Postproceso. Visualización de resultados	50
4.12.1	Mapas de inundación y peligrosidad	50
4.12.2	Secciones, sondas de evolución en el tiempo en un punto dado, hidrogramas.....	52
4.12.3	Exportación de resultados en formato RASTER.....	53
5	EJEMPLO DE APLICACIÓN: SIMULACIÓN DE LA ONDA DE AVENIDA POR ROTURA DE LA Balsa DE RIEGO	54
6	CONCLUSIONES	55
7	BIBLIOGRAFÍA	56

1 INTRODUCCIÓN

La nueva normativa de seguridad de presas, embalses y balsas, hace necesaria la clasificación de balsas de riego en base a su riesgo potencial en caso de rotura. Para ello es necesario el conocimiento de la normativa, los criterios de clasificación y seguir una metodología para el cálculo de la onda de avenida del agua en caso de rotura.

La normativa anteriormente, se centraba en presas, sin considerar el caso de balsas de riego. En el Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril (Real Decreto 9/2008 en adelante) se incorporan las balsas como objeto de la normativa, incluyendo un nuevo título en el dedicado a la “seguridad de las presas, embalses y **balsas**”.

Las balsas de riego que sobrepasen ciertas dimensiones, deberán ser registradas y clasificadas en base a unos criterios de seguridad basados en posibles afecciones a vidas humanas, infraestructuras y afecciones medioambientales, siendo necesaria la participación de técnicos formados al respecto y que elaboren estudios hidráulicos e hidrodinámicos de la onda de avenida en el caso de rotura del dique o presa.

Las competencias en materias de seguridad en estas balsas serán de la Administración General del Estado en unos casos, y en otros estarán transferidas a las Administraciones Autonómicas.

La legislación en el caso de que el órgano competente sea la Comunidad Autónoma de Aragón, está pendiente de aprobación, propuesto en un borrador de Decreto en el año 2016 del Gobierno de Aragón por el que se aprueba el Reglamento regulador de la clasificación el registro de presas embalses y balsas (Borrador de Decreto del G. A en adelante).

La descripción de la metodología presentada en este Trabajo Fin de Carrera puede ser aplicable para los casos en los que sea necesario registro y clasificación de la balsa en la Administración General del Estado, y también para los casos que el registro sea del ámbito competencial del Gobierno de Aragón, en el caso de que se aprobara el borrador y pasara a ser obligatorio el registro de las mismas.

Se recomiendan diferentes métodos de cálculo de la onda de avenida para la clasificación en la Guía Técnica para la Clasificación de Presas en Función del Riesgo Potencial (Guía Técnica en adelante).

Adoptaremos una metodología y estrategias basadas en modelos completos bidimensionales con la herramienta informática Iber.

Iber es un modelo matemático bidimensional para la simulación del flujo en lámina libre y procesos de transporte en ríos y estuarios, desarrollado en colaboración por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidad de A Coruña, UDC) y el Instituto FLUMEN (Universitat Politècnica de Catalunya, UPC, y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE). Este modelo matemático puede resolver la simulación numérica necesaria para la elaboración de informes de peligrosidad y las propuestas de clasificación de las balsas.

2 OBJETIVOS

El objeto general de este Trabajo Fin de Carrera, es describir las pautas a seguir a la hora de realizar un estudio de clasificación de balsas usando la herramienta informática Iber para simular la rotura y así desarrollar una metodología de trabajo que solucione de manera eficiente la realización de dichos estudios considerando la evaluación de la peligrosidad según normativa actual nacional, mapas de inundación, elaboración de planes de emergencia etc...

Así mismo, también se pretende realizar una revisión de la legislación actual en la materia y presentar una interpretación aclaratoria de los criterios de clasificación.

El trabajo incluirá:

Revisión de la normativa actual sobre seguridad y clasificación de balsas y planes de emergencia.

Descripción de metodología para la realización de la simulación de la rotura de balsa usando Iber. Abordando todas las fases del estudio, desde la recopilación de datos topográficos, la correcta alimentación de datos de entrada en el software específico, interpretación de resultados arrojados por la aplicación, mapas de inundación.

Aplicación de la sistemática desarrollando un caso completo, calculando la rotura de la balsa, preparación de mapas de inundación, interpretación de los resultados.

3 REVISIÓN LEGISLACIÓN Y NORMATIVA EN MATERIA DE CLASIFICACIÓN Y SEGURIDAD EN BALSAS

3.1 Antecedentes legislación en materia de seguridad de presas y embalses

Toda la normativa de seguridad de embalses se había centrado exclusivamente en las presas. La evolución histórica de la normativa de presas proveniente de la Administración Hidráulica ha estado influenciada y dictaminada a lo largo de los tiempos por los tres aspectos siguientes:

- La evolución y desarrollo de la técnica y la tecnología.
- Por exigencias y condicionantes de la sociedad.
- Por acontecimientos catastróficos sufridos.

Como consecuencia directa de la PRSA de Ribadelago, Vega de de Tera, en 1.959 se creó la Unidad de Vigilancia de Presas así como la Comisión de Normas de Grandes Presas, la cual elaboró en 1.960 las Normas Transitorias para Grandes Presas que en 1.962 se transformaron en la Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas, la cual finalmente fue aprobada por Orden Ministerial del entonces Ministerio de Obras Públicas con fecha de 31 de marzo de 1967, y que aún sigue siendo vigente hoy en día para unas determinadas presas.

En 1.982 tras la rotura de la presa de Tous, se dió origen a la implantación del Programa de Seguridad de las Presas del Estado y más tarde, en 1.996, a la publicación del Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses (RTSPE), aprobado por O.M: de 12 de marzo de 1.996, texto también vigente hoy en día par unas determinadas presas y embalses.

Este Reglamento Técnico asume en su integridad todo lo dispuesto por la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones (DBPPCRI), aprobada por Acuerdo de Consejo de Ministros de 9 de diciembre de 1.994 y cuya resolución de 31 de enero de 1995 fue publicada en el BOE de 14 de febrero de 1995.

La Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones, da respuesta al Art. 8 de la Ley 2/1985, de 21 de enero sobre Protección Civil, en el que se había previsto la elaboración de la Norma Básica de Protección Civil, aprobada por l Real Decreto 407/1992, de 24 de abril.

En esta Directriz se introduce la planificación de emergencias ante el riesgo de rotura o avería grave de presas, y se dispone la obligatoriedad de proceder a la clasificación de las presas en función del riesgo potencial y la elaboración de Planes de Emergencia de Presas, para aquellas clasificadas en categorías A y B.

Finalmente el último texto vigente en la actualidad se encuentra en el Real Decreto 9/2008, de 11 de enero por el que se modifica el Reglamento de Dominio Público Hidráulico aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril (B.O.E. 16 enero 2008), en el cual se ha incorporado un nuevo Título VII dedicado a la seguridad de las presas, embalses y balsas.

Así pues, los textos vigentes en la actualidad son:

- Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de grandes presas (1967)
- Reglamento técnico sobre seguridad de presas y embalses (1996)
- Real Decreto 9/2008 por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (2008)
- Directriz básica de planificación de protección civil ante el riesgo de inundaciones (1995)

Cada presa y embalse, en función de su titularidad o año de construcción se encuentra sujeta a una u otra norma.

3.2 Normativa aplicable balsas

La LEY DE AGUAS (Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas) en el Artículo 123 bis dice que con la finalidad de proteger a las personas, al medio ambiente y a las propiedades, el Gobierno regulará mediante Real Decreto las condiciones esenciales de seguridad que deben cumplir las presas y embalses, estableciendo las obligaciones y responsabilidades de sus titulares, los procedimientos de control de la seguridad, y las funciones que le corresponden a la Administración pública.

Por medio del Real Decreto 9/2008, se añade un capítulo al Reglamento del Dominio Público Hidráulico en el que se determinan las condiciones esenciales de seguridad que deben cumplir las presas y embalses, y las balsas, estableciendo las obligaciones y responsabilidades de sus titulares, los procedimientos de control de la seguridad las funciones que corresponden a la Administración pública, con la finalidad de proteger a las personas, el medio ambiente y a las propiedades. Por primera vez se incluyen las balsas en este tipo de normativas

En este nuevo capítulo se dispone de la elaboración de unas Normas Técnicas de Seguridad de Presas y Embalses.

El artículo 364 dispone la elaboración de tres Normas Técnicas de Seguridad, a aprobar mediante Real Decreto, previo informe de la Comisión Técnica de Seguridad de Presas (aún no constituida) y de la Comisión de Normas para Grandes Presas (actualizada en 2011 y posteriormente creada en 2015)

Las Normas Técnicas deben establecer las exigencias mínimas de seguridad de las presas y balsas, graduándolas según su clasificación, y determinándose los estudios, comprobaciones y actuaciones a realizar y cumplimentar en cada una de las diversas fases de la vida de la presa o balsa. Serán de obligado cumplimiento para todo el territorio nacional, y sustituirán a la vigente Instrucción y al aún vigente Reglamento.

Son las siguientes:

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

Desde julio 2011 se dispone de los borradores correspondientes, tras un largo periodo de elaboración, consultas y participación, pero aún no se han aprobado

En temas de protección civil, la normativa aplicable a balsas es Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones.

3.3 Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril

En este capítulo se exponen los conceptos contenidos en el Real Decreto, necesarios para abordar el estudio de inundabilidad para el proceso de clasificación de las balsas.

3.3.1 Definiciones

BALSA

Obra hidráulica consistente en una estructura artificial destinada al almacenamiento de agua, situada fuera del cauce, y delimitada total o parcialmente por un dique de retención.

Quedan expresamente excluidas otras infraestructuras hidráulicas, como canales, depósitos, etc...

A efectos de seguridad, los diques de cierre de las balsas son presas, y las balsas son embalses.

ALTURA DE LA BALSA

La altura de la balsa (artículo 357) se define como la diferencia de cota entre el punto más bajo de la cimentación del talud exterior del dique de cierre y el punto más alto de la estructura resistente. Pero se pueden tener dudas sobre el concepto de lo que es el punto más bajo y cual es la estructura resistente. Porque lo que finalmente tenemos es un dique compuesto de tierras compactadas apoyadas sobre el terreno que también son tierras y el terreno en conjunto con el dique puede formar lo que estamos denominando estructura resistente.

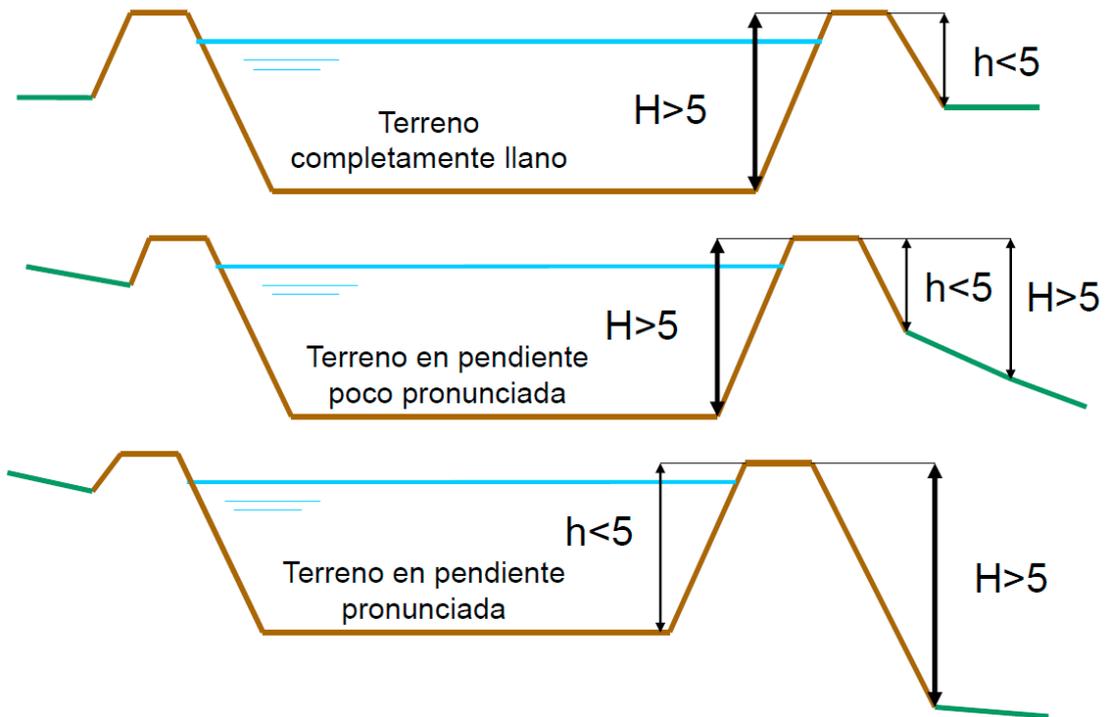


FIGURA 1. Casos de altura de la balsa en función del terreno

Debido a que las balsas son estructuras construidas mediante la acumulación de tierras sobre un terreno, se nos pueden presentar varios casos (FIGURA 1)

En el primer caso queda claro que la balsa no ha de ser clasificada puesto que $h < 5$.

El segundo caso genera dudas de por dónde podría romper y si podría producirse un deslizamiento del terreno por debajo del dique.

En el tercer caso se observa que la balsa sí ha de ser clasificada. La altura interior de la balsa es menor que 5 m, pero la exterior H , que es la que define en el Real Decreto como altura de balsa, es mayor de 5 m.

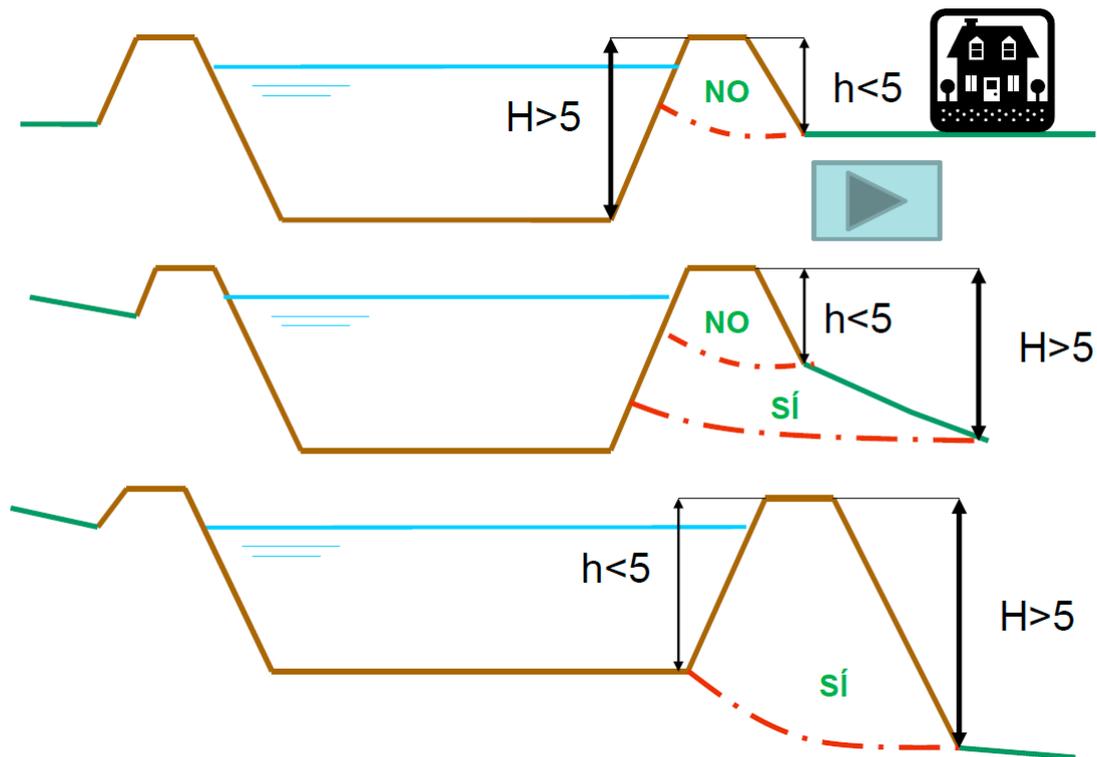


FIGURA 2: Casos especiales de consideración de altura de la balsa

El primer caso (FIGURA 2), aplicando la legislación del Reglamento Del Dominio Público Hidráulico, no debe ser clasificada, pues $h < 5$ m. Pero ¿qué pasa si hay viviendas que se pueden ver afectadas por la rotura del dique? Aunque en este caso no es necesario presentar una propuesta de clasificación frente a la Administración, no se debe olvidar legislación como el Código Civil o el Código Penal. En caso de rotura y de que se produjeran afecciones aguas abajo, el titular podría tener una responsabilidad civil, e incluso penal en caso de que se produjeran muertes. Por ello los titulares de las balsas no deben olvidar sus obligaciones en materia de seguridad aunque $h < 5$ m:

- Redacción de un proyecto de construcción.
- Ejecución correcta de las obras y control de calidad de la ejecución
- Durante la fase de explotación disponer de medios humanos, materiales y equipos mecánicos necesarios para mantener y conservar las instalaciones y explotar adecuadamente las instalaciones.

En el segundo caso, se deben estudiar todas las posibilidades de rotura, ya sea de la propia estructura o del terreno, y habría que considerar H como altura de balsa, incluyendo la parte de terreno por donde podría romper el conjunto formado por el dique y el terreno, puesto que no podemos desligar la parte de terreno que actúa reteniendo aguas de la estructura completa del dique.

El tercer caso, no tiene duda, la altura de la balsa sería H (mayúscula)

VOLUMEN DE LA Balsa Y VOLUMEN MOVILIZABLE

El volumen o capacidad de embalse, en el caso de balsas, según el criterio del Área de Seguridad de Infraestructuras, es el volumen correspondiente al Máximo Nivel Normal o Máximo Nivel de Explotación. Se adopta este criterio ya que el Real Decreto 9/2008 no presenta una definición clara de este concepto.

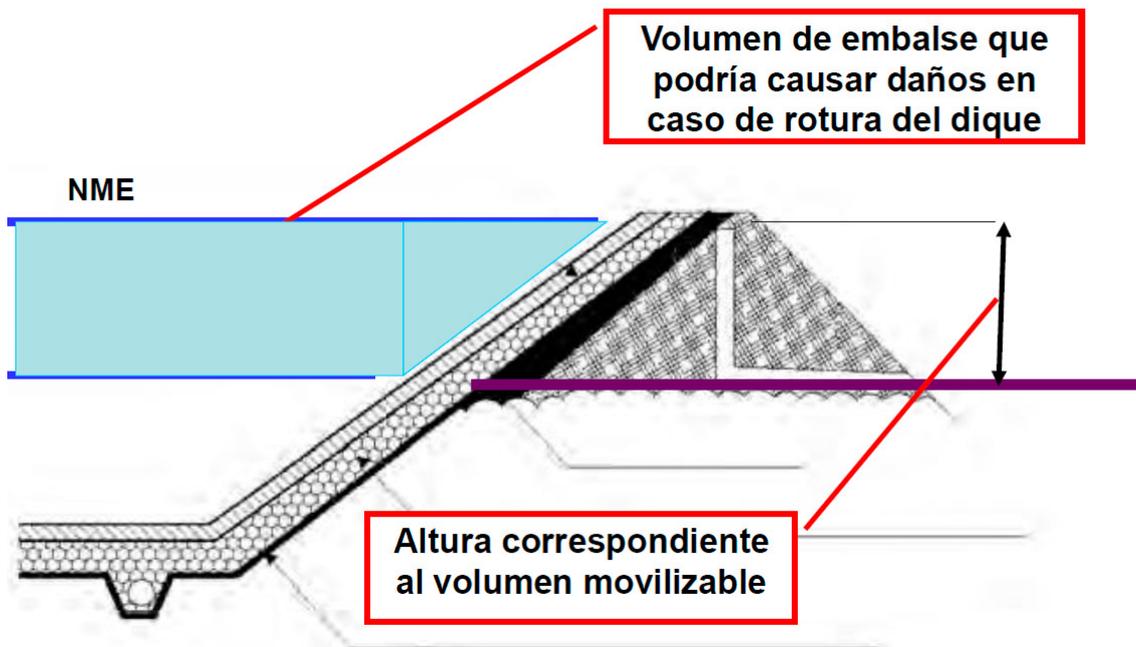


FIGURA 3: Volumen movilizable

Un concepto importante a la hora del cálculo de la avenida por rotura es el concepto de volumen movilizable (FIGURA 3). A efectos de aplicación a la rotura de balsas, solamente se computará el volumen de agua embalsada que se movilizaría en caso de fallo o rotura, siendo la altura a considerar la correspondiente a dicho volumen.

Si disponemos de un aliviadero en condiciones que es prácticamente imposible que se atasque por plásticos o ramas caídas en la balsa, podremos considerar una altura de volumen movilizable que sería igual al Máximo Nivel de Explotación (MNE) más la altura provocada por las máximas aportaciones de lluvia (habitualmente de periodo de retorno de 500 años).

En caso de que tengamos un aliviadero que nos genere dudas sobre su posible atascamiento deberemos considerar altura de volumen movilizable hasta coronación.

Para evitar dudas al respecto, la práctica habitual a la hora de analizar el volumen movilizable, es considerar siempre el volumen que se generaría por el llenado

3.3.3 Categorías

El artículo 358 del Reglamento del DPH sobre clasificación de las presas y embalses determina que las balsas se clasifican en las siguientes categorías en función del riesgo potencial que pueda derivarse de su posible rotura o funcionamiento incorrecto:

Categoría A: Balsas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede afectar gravemente a núcleos urbanos o servicios esenciales, así como producir daños materiales o medioambientales muy importantes

Categoría B: Balsas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede ocasionar daños medioambientales o materiales importantes o afectar a un número reducido de viviendas

Categoría C: Balsas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede producir daños materiales de moderada importancia y solo incidentalmente pérdida de vidas humanas.

Los criterios de clasificación son cualitativos, no cuantifican. El elemento esencial para la clasificación es relativo a la población y a las vidas humanas.

La Directriz y demás normativa definen a esta población en posible riesgo de una forma cualitativa, según la afección potencial sea de tipo grave a núcleos urbanos (categoría A), afecte a un número reducido de viviendas (categoría B) o pudiera afectar solo incidentalmente a vidas humanas (categoría C). Como consecuencia debe partirse de que el elemento principal es la afección potencial a las vidas humanas, por lo que este es el primer aspecto que debe ser considerado en el proceso.

Los criterios de clasificación definidos en las distintas normas (Directriz Básica de Planificación de Protección Civil, el Reglamento Técnico sobre Seguridad, el Reglamento del DPH) son idénticos y tienen un carácter descriptivo general, por lo que el Ministerio de Medio Ambiente desarrolló la **Guía Técnica para la Clasificación de Presas en Función del Riesgo Potencial** (apartado 3.4 de este Capítulo)

3.3.4 Ámbito competencial:

R.D: 9/2008 Artículo 360. Competencias en materia de seguridad.

La Administración General del Estado es competente en materia de seguridad en relación a las presas, embalses y **balsas situados en el Dominio Público Hidráulico**

en las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias, así como cuando constituyan infraestructuras de interés general del Estado, siempre que le corresponda su explotación.

Las Comunidades Autónomas designarán a los órganos competentes en materia de seguridad en relación con las presas, embalses y balsas situados en el Dominio Público Hidráulico cuya gestión les corresponda, y en todo caso en relación con las presas, embalses y balsas ubicados fuera del Dominio Público Hidráulico.

Nos encontramos con una realidad física y otra administrativa, teniendo cuencas intracomunitarias (FIGURA 5).



FIGURA 5: Cuencas hidrográficas y Comunidades Autónomas

Dentro de estas cuencas, además pueden encontrarse las balsas dentro o fuera del Dominio Público Hidráulico. En función de esto, se establece el órgano competente (FIGURAS 6 Y 7)

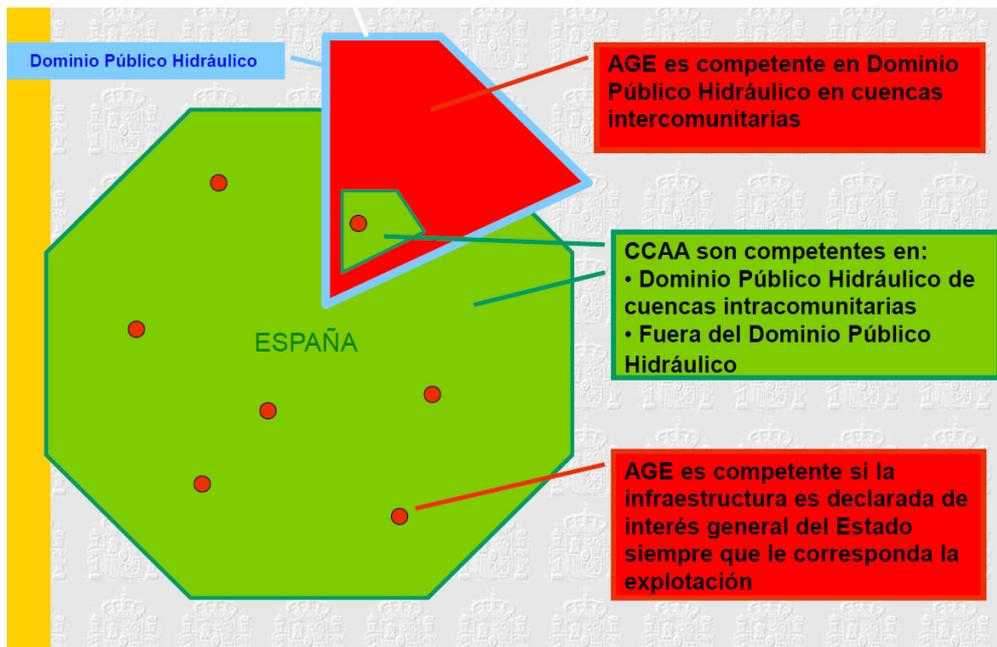


FIGURA 6: Competencias en función de la ubicación respecto del Dominio Público Hidráulico

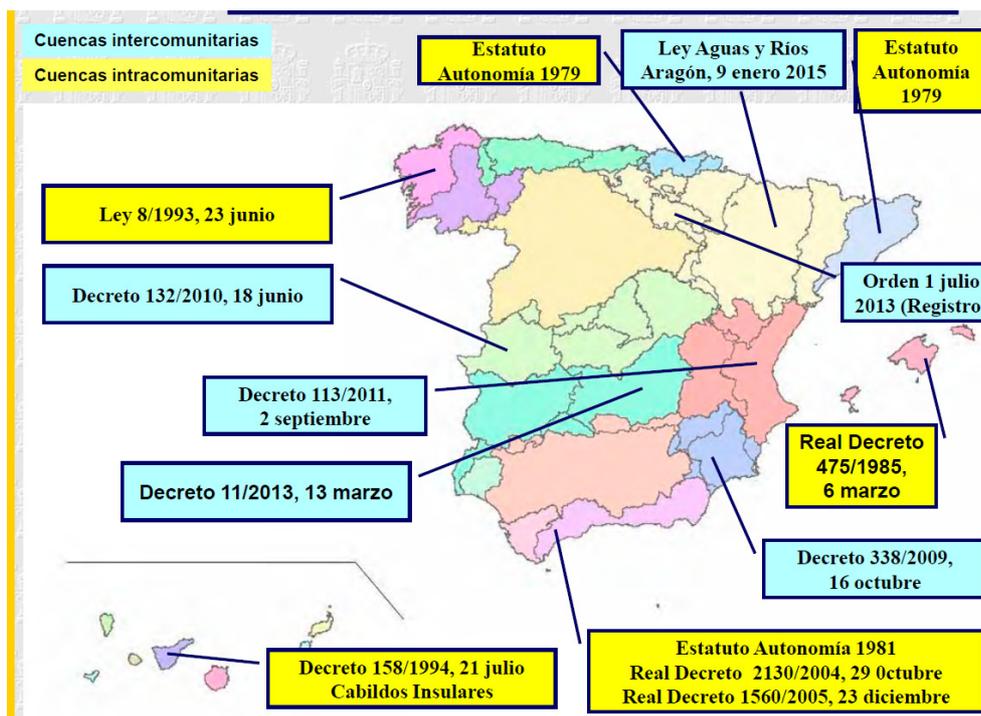


FIGURA 7: Competencias y Órganos Competentes por Comunidades Autónomas

3.3.5 Distribución de responsabilidades

El titular es el responsable de la seguridad de las balsas y de sus instalaciones.

Obligaciones del titular:

- Solicitar su clasificación y su registro (artículo 367)
- Disponer de los medios humanos y materiales necesarios para garantizar el cumplimiento de sus obligaciones en materia de seguridad (366.1)
- Cumplir las normas técnicas de seguridad (366.1)

A la administración competente le corresponde:

- El control de la seguridad de la balsa (conjunto de actuaciones que deben realizar las administraciones públicas competentes para verificar el cumplimiento por parte del titular de los diversos requisitos establecidos en materia de seguridad de presas y embalses)
- Aprobar la clasificación de la presa (artículo 362.2)

3.4 Guía Técnica para la Clasificación de Presas en Función del Riesgo Potencial

Los criterios de clasificación definidos en las distintas normas (Directriz Básica de Planificación de Protección Civil, el Reglamento Técnico sobre Seguridad, el Reglamento del DPH) son idénticos y tienen un carácter descriptivo general, por lo que el Ministerio de Medio Ambiente desarrolló la **Guía Técnica para la Clasificación de Presas en Función del Riesgo Potencial**. Con esta Guía se pretendía dar un desarrollo a los criterios que permitiera emitir las resoluciones de clasificación de presas con criterios más objetivos, de fácil aplicación y homogéneos para todas las presas. Se consideró también conveniente plantear con carácter orientativo una metodología general de aplicación que facilitase todo el proceso.

De aquí nacieron unos criterios que a día de hoy siguen vigentes y que siguen aplicándose para la determinación de las categorías de riesgo.

Pero desde aquel entonces (1996) las técnicas de modelización y simulación de eventos de rotura han avanzado sustancialmente, por lo que en algunos aspectos se ha quedado obsoleta.

Así mismo, las fórmulas planteadas en esta Guía se basan en el estudio de eventos ocurridos principalmente en grandes presas y que no tienen una aplicación tan clara en el caso de las balsas, que suelen por lo general poseer estructuras menos esbeltas. Además, las presas se encuentran ubicadas en un cauce y su cálculo está influido por el flujo hidráulico del río.

A pesar de todo ello, a día de hoy es el mejor instrumento oficial para intentar homogeneizar y tender hacia la objetividad de la clasificación de presas y balsas.

Los criterios para la clasificación se basan en afecciones a núcleos urbanos (vidas humanas), afecciones a servicios esenciales, daños materiales y daños medioambientales.

Afecciones a núcleos urbanos

Afección grave: afección a más de 5 viviendas habitadas y que represente un riesgo en función del calado y velocidad del agua

Afección a un número reducido de viviendas: cuando afecta entre 1 y 5 viviendas habitadas.

Pérdida incidental de vidas humanas: no se consideran a efectos de la clasificación

Se considerará también grave la afección a áreas de acampada estables, zonas en que se produzcan habitualmente aglomeraciones, etc...

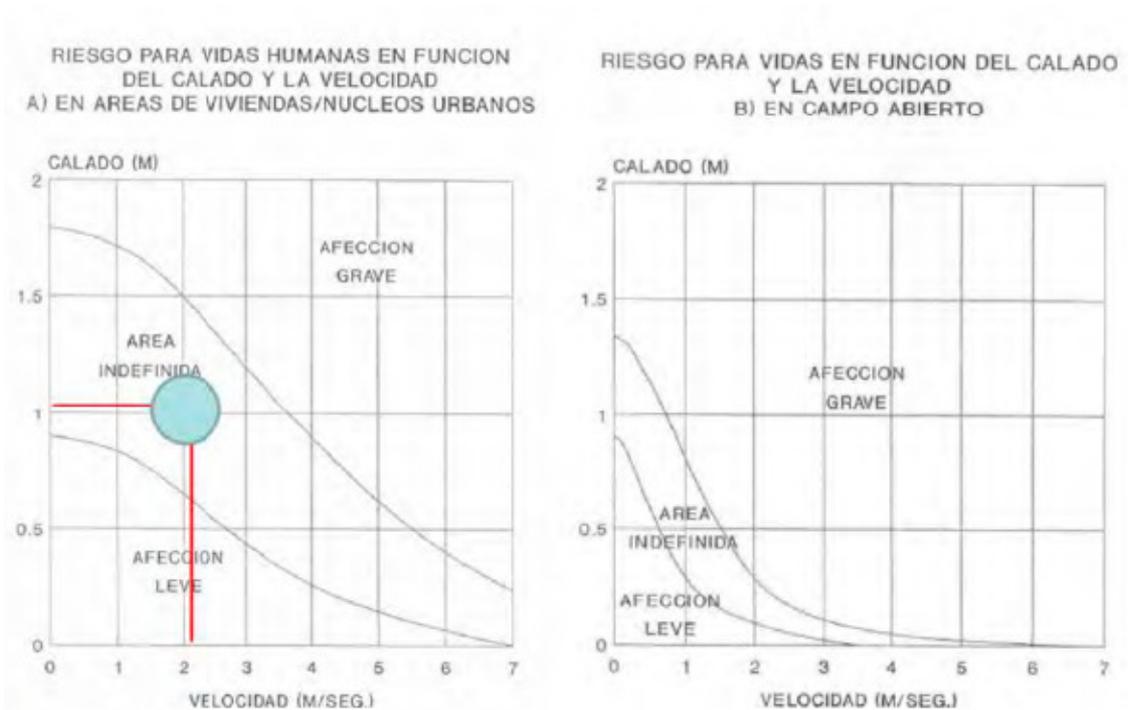


FIGURA 8: Gráficos en función del calado y la velocidad Guía Técnica

Estas figuras son un tanto confusas y no parece que sea un criterio aplicable de manera general.

Sería mejor aplicar el artículo 9 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico que define la zona donde se puedan producir graves daños durante una avenida sobre personas y los bienes cuando se cumpla alguna de estas condiciones:

Que el calado sea superior a 1.0 m
Que la velocidad sea superior a 1.0 m/s
Que el producto de ambas variables sea superior a 0.5 m²/s

Afecciones a servicios esenciales.

Aquellos de los que dependan al menos 10.000 habitantes y que no pueda ser reparado de forma inmediata)

- Abastecimiento y saneamiento
- Suministro de energía
- Sistema sanitario
- Sistema de comunicaciones
- Sistema de transportes

Daños materiales (FIGURA 9)

- Aquellos soportados por terceros cuantificables en términos económicos
- Daños a la industria y a polígonos industriales
- Daños a las propiedades rústicas
- Daños a cultivos
- Daños a las infraestructuras

CLASIFICACION DE LOS DAÑOS MATERIALES

ELEMENTO	DAÑOS POTENCIALES		
	MODERADOS	IMPORANTES	MUY IMPORTANTES
Industrias y poligonos industriales y propiedades rústicas ¹	n° de instalaciones < 10	10 < n° de instalaciones < 50	n° de instalaciones > 50
Cultivos de secano	Superficie < 3.000 Has	3.000Has < superficie < 10.000Has	Superficie > 10.000 Has
Cultivos de regadio	Superficie < 1.000 Has	1.000Has < superficie < 5.000Has	Superficie > 5.000 Has
Carretera		Red general de las CC.AA. u otras redes de importancia equivalente	Red general del estado y red básica de las CC.AA.
Ferrocarriles		ff.cc. via estrecha	ff.cc. via ancha y alta velocidad

TABLA 1 Tabla orientativa de la Guía Técnica para valorar los daños

Respecto a las carreteras, como regla general que una carretera nacional del estado con una alta IMD, una autovía, que sea seriamente afectada, será categoría A o B.

La red ferroviaria de Alta Velocidad, que es un elemento muy sensible, cuando se ve afectada, clasificamos como A. El resto de la red ferroviaria será A, B o C en función de frecuencias de trenes y viajeros y los daños previstos en las estructuras.

Daños medioambientales

Bienes declarados de Interés Cultural, Parques Nacionales, Parques Naturales, especies protegidas...etc

En la Guía se indican además las formulaciones para el estudio de la onda de avenida, los datos básicos para el estudio, así como los documentos a incluir en la propuesta de clasificación.

3.5 Normativa y legislación en la Comunidad Autónoma de Aragón en materia de seguridad de embalses, presas y balsas.

3.5.1 Ley 10/2014 de Aguas y Ríos de Aragón.

La ley 10/2014 de 27 de noviembre, de Aguas y Ríos de Aragón tiene por objeto regular las competencias de la Comunidad Autónoma sobre las aguas y ríos de Aragón, tanto las de carácter exclusivo, como aquellas otras que puedan ser ejercidas por la Comunidad Autónoma mediante transferencia, en las que se incluye el registro de seguridad de presas y embalses y balsas de Aragón.

Esta ley prevé la creación de un Registro en el que se inscribirán todas las presas, embalses y balsas cuya competencia corresponda a la Comunidad Autónoma y remite la determinación de su contenido, organización y normas de funcionamiento al desarrollo en vía reglamentaria, asignando la competencia para su gestión al Instituto Aragonés del Agua.

3.5.2 Borrador Decreto del Gobierno de Aragón por el que se aprueba el Reglamento regulador de clasificación y registro de presas, embalses y balsas competencia de la Administración de la Comunidad Autónoma de Aragón

El Decreto (sin aprobar) tiene como objeto regular la clasificación, registro y acreditación de entidades colaboradoras para el ejercicio de las competencias de la Comunidad Autónoma de Aragón en materia de seguridad de presas embalses y balsas.

Las competencias que corresponden a la Comunidad Autónoma se atribuyen al Instituto Aragonés del Agua que ejercerá sobre las instalaciones las funciones de aprobación de la clasificación, inspecciones, aprobación de las normas de explotación y planes de emergencia y velar por el cumplimiento de las normas, entre otras funciones.

La necesidad de coordinar la normativa autonómica con la estatal y simplificar la regulación, este Decreto no incluye definiciones de conceptos (presa, balsa, embalse, altura, titular, clasificación de presas, normas técnicas de seguridad, sujetos obligados...etc) remitiendo expresamente al Reglamento de Dominio Público Hidráulico.

En el Decreto se indica que a la solicitud de clasificación, acompañarán los documentos que fundamenten la propuesta conforme a la “Guía Técnica de Clasificación de presas en función del riesgo potencial”

Respecto a los planes de emergencia y normas de explotación, las balsas clasificadas como A o B deberán presentar una vez obtenida la correspondiente clasificación, un Plan de Emergencia conforme a lo previsto en el Epígrafe7 del Plan Especial de Protección Civil de Emergencias por Inundaciones en la Comunidad Autónoma de Aragón, aprobado por Decreto 237/2006, de 4 de diciembre, del Gobierno de Aragón.

Se inscribirán en el Registro de Seguridad de Presas, Embalses y Balsas de Aragón las instalaciones de esta naturaleza con una altura superior a 5 metros o una capacidad de embalse superior a 100.000 m³, de titularidad pública o privada, ubicadas fuera del dominio público hidráulico y a las que, en virtud de transferencia, encomienda o convenio, se atribuya su gestión a la Comunidad Autónoma de Aragón por la Administración General del Estado

Las infracciones en esta materia y el régimen sancionador se regirá por lo establecido en la Ley 10/2014 de Aguas y Ríos de Aragón.

4 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA ELABORACIÓN DE LOS ESTUDIOS DE AVENIDA DE ONDA DE ROTURA DE Balsa PARA SU CLASIFICACIÓN

4.1 Esquema general

En la FIGURA 10 se esquematiza el proceso propuesto por la Guía Técnica para obtener una propuesta de clasificación de balsa. Estos pasos, podemos realizarlos con las herramientas ingenieriles que consideremos más adecuadas para cada caso

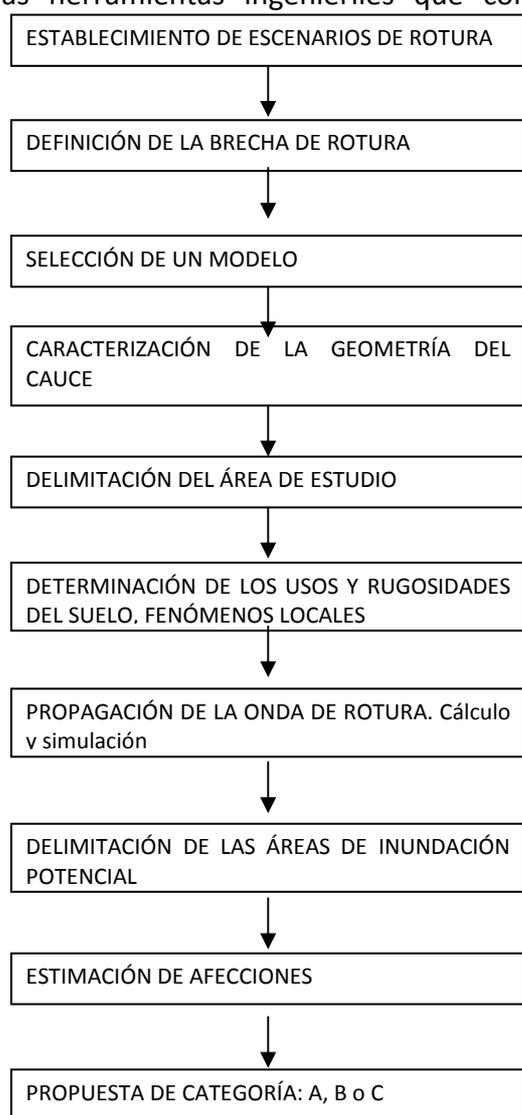


FIGURA 9. Esquema general proceso obtención propuesta de clasificación

4.2 Selección del método de modelización

Es importante seleccionar bien el método de estudio de la formación y propagación de la onda de avenida para obtener resultados fiables. La Guía Técnica propone los siguientes métodos:

- Método completo. Modelos hidráulicos completos.
- Método simplificado de modelización.
- Método mixto hidrológico –hidráulico
- Método simplificado de métodos envolventes
- El buen juicio ingenieril

El método completo con modelos hidráulicos completos, es muy preciso y considera las características reales del movimiento en régimen variable de la propagación de onda de rotura, así como los posibles efectos de las secciones hidráulicas agua abajo en la propagación agua arriba del movimiento. Por ello, en general, es el método recomendable para un análisis detallado.

Tenemos que tener en cuenta que si nuestro caso requiere de alta precisión, deberemos asistir a los métodos completos de modelización. Si requiere menos precisión, los métodos simplificados nos pueden resultar válidos. Pero hoy en día, la capacidad de cálculo de nuestros equipos informáticos y la disponibilidad de diferentes modelos en el mercado, tanto de pago como gratuitos, hacen el uso de estos mucho más fácil y recomendable.

Dentro de estos modelos completos encontramos:

Modelos unidimensionales 1-D

Para cauces bien definidos modelos unidimensionales. En un modelo 1D, la definición geométrica en función del número y trazado de las secciones. Los resultados dependen de la pericia del usuario.

Un río se representa como una serie de secciones repartida a lo largo de un eje, de manera que en un modelo 1D el flujo se supone en la dirección del eje (perpendicular a la sección) y se obtiene un único valor de cota de agua y velocidad en toda la sección. (FIGURA 11)

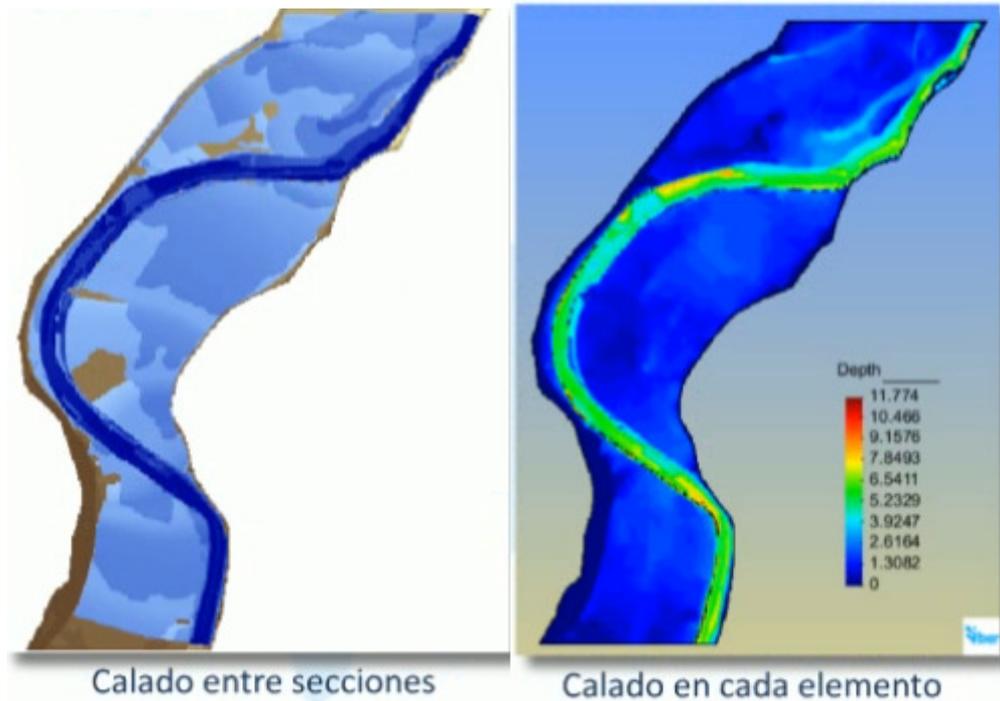


FIGURA 10: Modelo 1-D a la izquierda. Modelo 2-D a la derecha

Modelos bidimensionales 2-D

Para llanuras de inundación, valles sinuosos, etc es recomendable usar modelos bidimensionales. En caso de cambios muy bruscos en las secciones o llanuras de inundación amplias, donde exista un flujo bidimensional acusado y sea necesario estudiar con más detalle las condiciones de propagación de onda.

En los modelos 2D, la geometría se representa en 3D mediante archivos MDT o definidos por el usuario. Los resultados dependen menos de la discretización utilizada.

Los resultados básicos son cota de agua y la velocidad del agua en las dos direcciones horizontales del espacio (x,y) (FIGURA 11) . El desarrollo de los modelos bidimensionales se justifica para superar algunas limitaciones de los modelos unidimensionales.

Hay disponibles diferentes aplicaciones informáticas para tal propósito (modelos unidimensionales y bidimensionales), además tienen implementadas la formación y evolución de la brecha de rotura.

En la metodología propuesta en este Trabajo Fin de Carrera seleccionamos el método completo realizando una modelización hidráulica completa con la aplicación Iber, que se describe en el siguiente capítulo.

4.3 Iber

Iber es una herramienta de modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas, es decir, para calcular niveles de agua y velocidades en ríos, estuarios, canales, llanuras de inundación, obras hidráulicas...

Resuelve el calado y la velocidad con un módulo de cálculo de hidrodinámica. Algunas de las capacidades de este software son el uso de mallas irregulares para poder optimizar la representación geométrica y el tiempo de cálculo, la importación de geometrías y mallas de gran variedad de formatos.

Emplea esquemas numéricos robustos, sin problemas de convergencia, que permiten calcular flujos con resaltos hidráulicos y frentes de onda.

Permite considerar rugosidad variable y puede considerar el efecto de distintos tipos de estructuras como compuertas, vertederos, puentes, obras de drenaje...

Además se puede simular la formación de una brecha en una presa o dique (FIGURA 12)

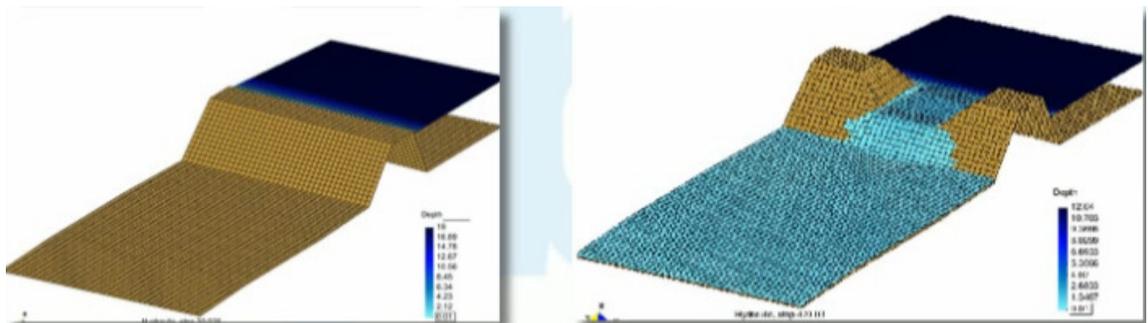


FIGURA 11: formación de la brecha de rotura con deformación de la malla

El módulo de hidrodinámica para obtener el calado y la velocidad, resuelve unas ecuaciones que se deducen de dos leyes físicas de conservación elementales:

- Conservación de la masa
- Conservación de la cantidad de movimiento (la segunda ley de Newton aplicada a un fluido)

Estas leyes físicas se traducen en unas expresiones matemáticas que son las ecuaciones de Navier – Stokes, que gobiernan el movimiento de un fluido en las tres dimensiones del espacio. De las ecuaciones de Navier-Stokes se deducen las ecuaciones de aguas someras, también conocidas como ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones, que son las ecuaciones básicas que resuelve el módulo hidrodinámico de Iber..

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{\partial}{\partial x} (h \overline{u_x' u_x'}) - \frac{\partial}{\partial y} (h \overline{u_x' u_y'})$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{\partial}{\partial x} (h \overline{u_x' u_y'}) - \frac{\partial}{\partial y} (h \overline{u_y' u_y'})$$

Las variables que intervienen son las siguientes:

- h: calado o profundidad de la lámina de agua
- q_x: caudal específico en dirección X
- q_y: caudal específico en dirección Y
- z_b: cota de fondo
- g: constante universal gravitatoria
- τ_{b,x}: componente X de la tensión tangencial que ejerce el fondo
- τ_{b,y}: componente Y de la tensión tangencial que ejerce el fondo
- ρ densidad del agua

Siendo S la pendiente (variación de la cota de fondo) y por otro lado, la disipación de energía por fricción con el fondo se puede obtener a partir de la pendiente motriz Sf como:

$$\frac{\partial z_b}{\partial x} = -S_{ox} \qquad \frac{\partial z_b}{\partial y} = -S_{oy}$$

$$\frac{\tau_{b,x}}{\rho} = ghS_{fx} \qquad \frac{\tau_{b,y}}{\rho} = ghS_{fy}$$

Estas ecuaciones de forma compacta sin considerar el efecto de las tensiones turbulentas quedarían de la siguiente manera:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) = g h (S_{ox} - S_{fx})$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) = g h (S_{oy} - S_{fy})$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) = g h (S_{ox} - S_{fx})$$

← ← → →
inercia presión gravedad rozamiento

La primera ecuación indica que si los caudales cambian de un punto a otro, el calado en un punto fijo deberá variar con el tiempo.

La segunda y la tercera ecuaciones indican como varían los caudales en función de las fuerzas que actúan, que son:

- Fuerzas de inercia
- Fuerzas de presión
- Fuerzas de gravedad (a través de la pendiente de fondo)
- Fuerzas de rozamiento con los contornos

Estas ecuaciones son un sistema de ecuaciones diferenciales, en derivadas parciales, hiperbólico y no lineal. Para resolverlas se requiere una geometría con su rugosidad de fondo, unas condiciones iniciales y unas condiciones de contorno

Conviene recordar que las velocidades calculadas representan las componentes horizontales de la velocidad promediada en la profundidad, es decir, Iber no aporta información sobre la componente vertical de la velocidad ni información sobre la distribución vertical de velocidades.

Las fuerzas de rozamiento se incluyen a través del término de pendiente motriz, y esta se evalúa con la fórmula de Manning. Una buena estimación de n es fundamental para obtener unos buenos resultados:

$$S_{fx} = \frac{u \sqrt{u^2 + v^2} n^2}{h^{4/3}} \quad ; \quad S_{fy} = \frac{v \sqrt{u^2 + v^2} n^2}{h^{4/3}}$$

Donde:

u y v son las componentes de la velocidad en las direcciones x e y respectivamente

n el coeficiente de rugosidad de Manning

h la altura del agua

S pendiente motriz

Se requieren conocimientos básicos de hidráulica, dominando conceptos como la fórmula de Manning, el número de Froude, régimen supercrítico y subcrítico, expresiones de cálculo de compuertas vertedero., etc... para modelizar los sistemas e interpretar de manera correcta los resultados.

El análisis teórico de estas ecuaciones se puede encontrar en libros de hidráulica como Chaudhry (2007).

4.3.1 Esquema del proceso con Iber

Elegido el modelo Iber, resolveremos los pasos para los estudios de clasificación con esta herramienta, quedando el esquema del proceso tal y como se muestra en la siguiente figura (FIGURA 13):

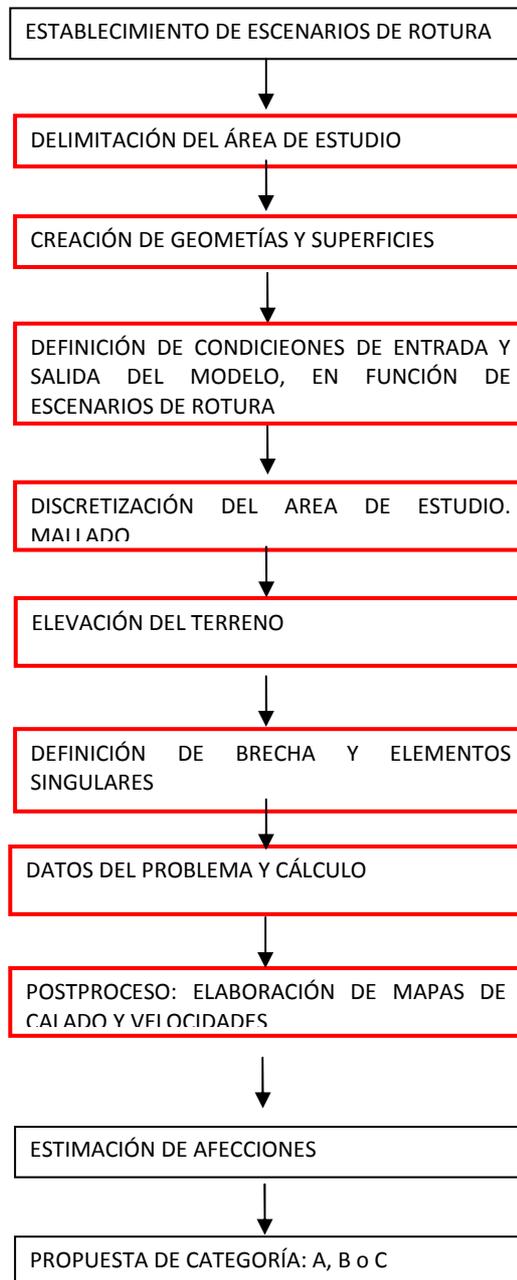


FIGURA 12: Esquema proceso de elaboración de estudio para la clasificación de balsa con Iber

Los pasos en rojo, serán resueltos dentro del entorno de la aplicación. El establecimiento de escenarios de rotura, la estimación de afecciones y la propuesta de categoría se realizarán a criterio del calculista o proyectista.

En los siguientes apartados, se describen los pasos a seguir y la información, datos y criterios de cálculo necesarios. No se abordarán los aspectos concretos de manejo del software, por existir manual de usuario propio de la aplicación y quedar fuera del objeto de este Trabajo Fin de Carrera.

4.4 Establecimiento de escenarios de rotura

Se contemplan tres escenarios de rotura. En general será suficiente considerar dos escenarios extremos, denominados H1 y H2:

Rotura sin avenida (H1).

Nivel de embalse en su máximo nivel normal de explotación.

Rotura en situación de avenida (H2).

Nivel del embalse en coronación Situación de avenida para balsas se considera que está entrando el máximo caudal de aportación por la obra de entrada ya sea un bombeo, un canal, una tubería de descarga..., coincidente con las máximas precipitaciones esperadas.

En función de los riesgos, y de su valoración económica, habría que escoger un tiempo de periodo de retorno para el fenómeno tormentoso, pero lo habitual es tomar el correspondiente a un período de retorno de 500 años.

Para el cálculo del escenario H2 en el caso de balsa, sumariamos al caudal generado por la rotura el caudal máximo de aportación en forma de hidrograma plano. Si usamos un modelo completo, indicaremos la entrada de agua en el punto del embalse.

Rotura encadenada (no procede para balsas).

La rotura encadenada de balsas es un caso extraño que rara vez se presenta. En caso de darse, habría que calcular la avenida producida por la rotura encadenada. En la balsa de aguas arriba supondríamos los dos escenarios de rotura H1 y H2 calculándose las ondas de rotura y su propagación hasta la balsa de aguas abajo, que supondremos llena hasta su nivel normal de explotación.

Se pueden dar dos casos, que la balsa de abajo absorba la avenida producida por la rotura o que se desborden las aguas por coronación produciéndose también la rotura de la segunda. Habría que sumar el efecto de la avenida primera y los volúmenes de agua acumulados.

En un primer lugar, calcularíamos la onda de propagación para el escenario H1. Si en este caso, se obtiene categoría A, la clasificación ya está fundamentada.

Si simulando el escenario H2, la clasificación no sube de categoría, la categoría es la resultante.

En el caso de subir de categoría, se considerará la máxima categoría.

Para balsas no es necesario calcular los daños incrementales (la diferencia de daños de la onda de rotura respecto a los producidos por la máxima avenida ordinaria del río) por no encontrarse la instalación en el cauce de un río.

DATOS NECESARIOS:

Localización, geometría, dimensiones del embalse para analizar posible punto de rotura.

Volumen evacuable por rotura.

Nivel de coronación y de nivel normal de explotación.

Caudal de entrada (tubería de llenado, canal...).

4.5 Delimitación de la zona de estudio

Para delimitar la zona de estudio, es importante la inspección del terreno con visitas a campo y la observación de imágenes aéreas, cartografía y registros de instalaciones y servicios de la zona. El límite de estudio debe ser justificado. Podemos acotar la zona de estudio si nos encontramos elementos afectados que directamente conducen a categoría A, si encontramos la desembocadura en el mar u otro embalse que absorba la onda de avenida, o si aguas abajo ya no encontramos viviendas ni bienes ni servicios.

Se recomienda en esta fase, elaborar un listado de posibles afecciones, en este orden de importancia:

- Afecciones a núcleos urbanos, viviendas y vidas humanas
- Afecciones a servicios esenciales
- Daños materiales
- Daños medioambientales

Es primordial también estudiar las obstrucciones del cauce y fenómenos locales, tipo una carretera en mitad de la llanura de inundación en la que se quedan retenidas las aguas debido a que su obra de drenaje transversal no está diseñada para esos eventos.

DATOS NECESARIOS

Imagen aérea georreferenciada. Para la zona de Aragón podemos descargarlas en el portal de IDEARAGON (idearagon.aragon.es) del Gobierno de Aragón

Listado de posibles afecciones a través de inspecciones de campo, inspecciones de las imágenes y otros registros de infraestructuras e instalaciones en la zona

PROCESO EN Iber

Cargaremos la imagen georreferenciada a tamaño natural y observaremos hasta donde dibujaremos las geometrías que definirán el área de estudio.

4.6 Definición de la geometría: Creación de geometrías y superficies y mallado.

Para definir la geometría de la zona de estudio usaremos información topográfica e información de diferenciación de zonas, estructuras, edificios, infraestructuras etc...

Para modelizar toda esta información en Iber podemos optar por varias opciones

Tenemos que:

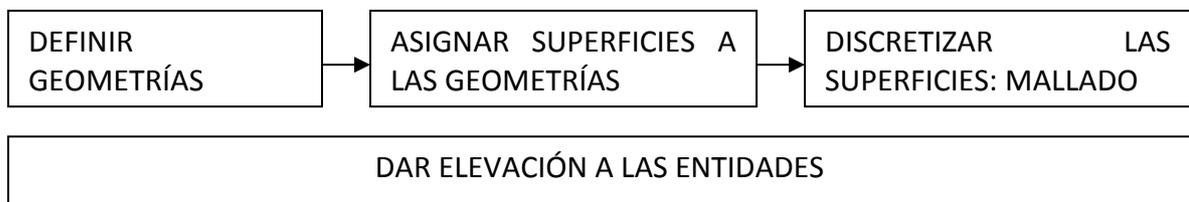


FIGURA 13: Modelización de la geometría de la zona de estudio

Modelizaremos el terreno a través de las siguientes entidades:

GEOMETRÍAS: Las geometrías son delimitaciones de espacios que nos permiten diferenciar zonas (diferentes usos del suelo, infraestructuras, elementos...). Las geometrías deben ser polígonos cerrados formados por puntos unidos por líneas. Una zona puede estar definida por una geometría o bien ya discretizada cuando coincida la geometría con la malla

SUPERFICIES basadas en las geometrías. Las geometrías se transforman en superficies. Según el método usado, generaremos las geometrías y las superficies al

mismo tiempo, o bien tendremos que asignar las superficies de las geometrías expresamente.

MALLA: La malla es una discretización del modelo, que se genera a partir de la geometría, dividiendo el dominio en una serie de elementos (triangulares o cuadriláteros) planos. Si las esquinas de estos elementos les asignamos elevación, se convierten en planos inclinados y todos juntos pueden representar la curvatura en el espacio del terreno.

Todas las condiciones que asignemos en la geometría (coeficientes de fricción, condiciones de contorno, condiciones iniciales,...) serán importadas automáticamente a la malla únicamente en el momento de creación de la malla.

Las ecuaciones hidráulicas se resolverán para cada una de la celdas de la malla. Cuanto más fina es la malla, los cálculos son más precisos porque la malla se parecerá más a la geometría real del terreno, pero el tiempo de cálculo y el tamaño de los archivos de resultados se incrementan.

Las propiedades asignadas a la geometría dibujada las hereda la malla, pero también es posible cambiar las propiedades de malla.

El mallado puede ser:

Malla ESTRUCTURADA: elementos regulares.

Malla NO ESTRUCTURADA: la malla cuyos elementos no siguen un orden establecido y claro entre filas y columnas ni una orientación concreta.

ELEVACION DEL TERRENO: En algún momento, daremos información de elevación del terreno, generalmente a partir de ficheros GIS o raster de modelo digital de elevado (raster MDE)

Al final, tenemos que obtener un terreno discretizado en pequeñas superficies en 3D, y cada uno de estas retículas, podrán tener asignadas características como rugosidad o condiciones de nivel de cota de agua, o condiciones de entrada o salida.

En primer lugar, en el caso de modelo de rotura de balsa, definiremos la geometría de la balsa.

Podemos obtener esta modelización de diferentes maneras:

- Crear geometrías, superficies, mallado y elevar la malla a través del raster de MDE.
- Crear superficies RTIN a través del raster de MDE y mallado coincidente con esta geometrías .
- Crear superficies directamente del raster de MDE y mallado coincidente con este raster (importar GDAL.)

4.6.1 Crear geometrías y superficies para zonas,, mallado y elevar la malla a través del raster de MDT

GEOMETRÍAS Y SUPERFICIES

En primer lugar se crean geometrías con la herramienta de dibujo construyendo polígonos cerrados cuidando de no duplicar líneas ni puntos que encierren las diferentes zonas del área de estudio (zonas de campo de cultivo, zona urbana, edificios, bosque...) que deseemos diferencias por:

- **que tengan diferente rugosidad
- **que queramos más detalle de cálculo (mas celdas de mallado para el cálculo) un agujero en el mallado de cálculo (por ejemplo un edificio o algo por lo que no vaya a pasar el agua por encima)

También dibujaremos geometrías para infraestructuras especiales para definir por ejemplo la presa o dique de la balsa o para representar un puente, pilones.....

Estas geometrías pueden dibujarse directamente o bien importar un dibujo CAD a través de un archivo *. dxf con coordenadas georreferenciadas (FIGURA 15).

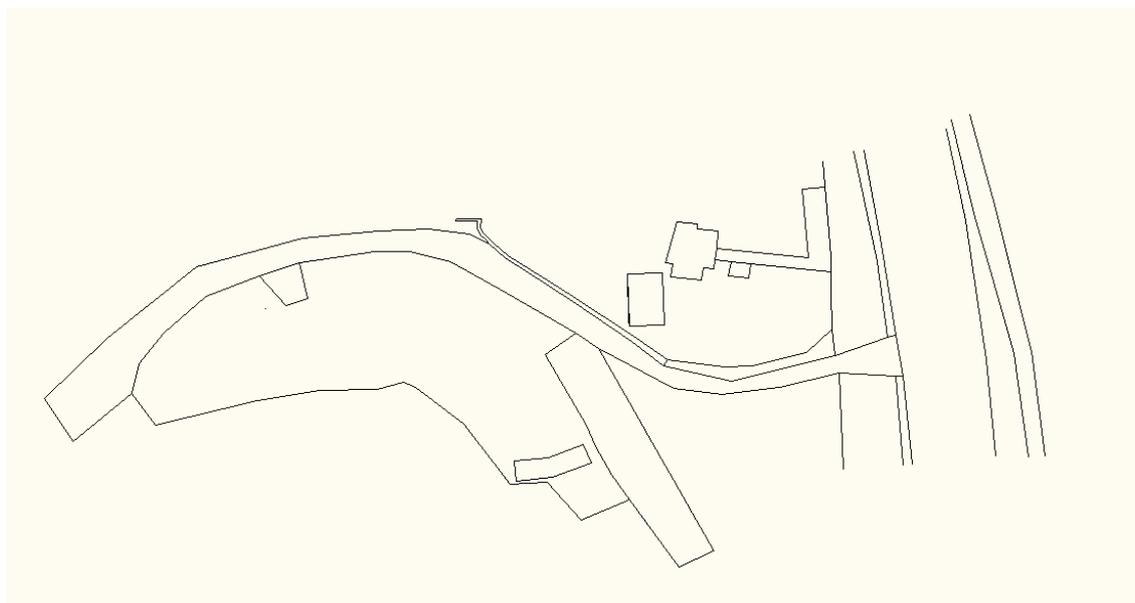


FIGURA 14. Plano de zona de inundación en Autocad, zonas y edificios.

Estos polígonos que crean geometrías deben ser depurados y colapsados para no tener duplicidades

En base a estos polígonos, se crearán las superficies.

En la FIGURA 16 se observa los polígonos importados de CAD y los añadidos y retocados para representar las zonas.

En la FIGURA 17 se observa los polígonos con sus superficies representados sobre la ortofoto. En fucsia se dibujan las superficies asociadas (este trazo es representativo de que en ese espacio hay una superficie, la superficie cubre todo el interior del polígono representado en azul).



FIGURA 15. Zonas definidas mediante polígonos cerrados (geometrías)



FIGURA 16. Geometrías y superficies sobre ortofoto

GEOMETRÍA Y SUPERFICIES DE LA BALSA

Para modelar la balsa definiremos el talud interior (zona mojada) y talud exterior de la zona de salida a través de polígonos cerrados a los que les asignaremos superficies para luego mallarlas.

Los polígonos que la definan, podemos dibujarlos manualmente o importar la geometría de un archivo dxf . Será necesario un retoque del dibujo de los polígonos, colapsar puntos y líneas etc para adecuar una buena generación de superficies y mallado. Con el fin de no tener superficies demasiado curvas que, una vez malladas, que pueden dar problemas de condicionamiento, dividiremos los taludes internos mediante líneas para definirlos con superficies mas pequeñas

Si las líneas se importan con cota, podremos mallar estas superficies y tendremos modelada la balsa en 3D.

MALLADO

Una vez definidas las superficies, se debe discretizar el dominio de cálculo, mallando dichas superficies.

Todas las condiciones que asignemos en la geometría (coeficientes de fricción, condiciones de contorno, condiciones iniciales,...) serán importadas automáticamente a la malla únicamente en el momento de creación de la malla.

A cada una de las zonas se les puede asignar un tamaño y criterios de mallado diferente. En zonas más sensibles de afecciones o de detalle asignaremos tamaño de elementos de la malla más pequeños y en zonas con menos detalle, más grandes.

Para esta forma de modelizar, se recomienda hacer un mallado no estructurado triangular variando el tamaño por zonas (FIGURA 18). El tamaño del mallado debe ser coherente con el tamaño de resolución del MDE que usemos.

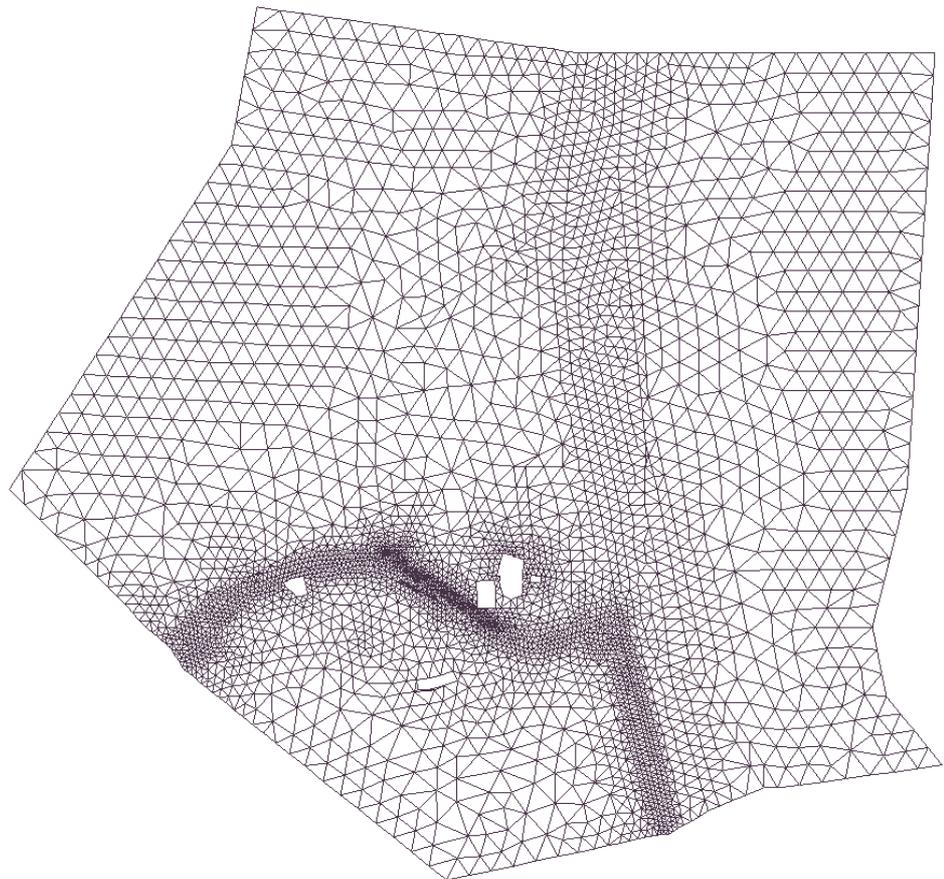


FIGURA 17. Mallado no estructurado triangular con diferentes tamaños de malla según zonas

ELEVACIÓN DE LA MALLA

Se asigna cota a los elementos de malla a través de un fichero raster MDE. Podemos combinar diferentes raster MDE con diferentes resoluciones. Por ejemplo una resolución de 5 m para la zona de inundación y otro de 1 m para la zona de la balsa y dique o para las zonas de población.

Si la geometría dibujada tiene cota, por ejemplo indicada manualmente o que las líneas importadas del archivo *.dxf sean 3D, la malla tomará esta información y la heredará de las superficies. Esto puede ser útil para superficies con pendiente uniforme.

Podemos combinar información de elevación del terreno de las líneas 3d de un archivo dxf que defina por ejemplo la balsa, con la importación de información del raster MDE para el terreno de inundación, tratando cada información en capas diferentes.

DATOS NECESARIOS:

-Geometría dibujada bien manualmente o importada de un fichero *.dxf georreferenciado.

-Rasters del Modelo Digital de Elevación.

Para el terreno de la Comunidad Autónoma de Aragón, tenemos disponible la descarga de estos ficheros con resolución 5 metros en el portal de IDEARAGON (idearagon.aragon.es) del Gobierno de Aragón.

Podemos obtener MDE con resolución 1 m, o generar nuestros propios MDE con herramientas GIS .

Se pueden combinar diferentes raster MDE en el mismo modelo, con diferentes resoluciones.

ALGUNAS INDICACIONES PARA EL USO DE IBER

Usaremos las herramientas de dibujo de Iber y la herramienta de importar dxf para dibujar los polígonos de las zonas

Crearemos superficies NURBS dentro de esos polígonos

Se indica el tamaño de malla superficie por superficie y se aplica la herramienta generar malla.

Si la malla no hereda cotas de las superficies, elevaremos la malla con la herramienta Malla: elevar malla desde archivo. (Archivo MDE)

4.6.2 Crear superficies RTIN a través del raster de MDT y mallado estructurado coincidente con el RTIN

Se crea la geometría compuesta por puntos, líneas y superficies automáticamente a partir del modelo digital de elevación. Para ello se utiliza la metodología RTIN que consiste en dividir la superficie del terreno en triángulos rectángulos de diferentes tamaños. Estos triángulos son planos inclinados.

A mayor número de triángulos es mayor la aproximación de la geometría con la topografía, pero mayor tiempo de cálculo y simulación.

Los triángulos RTIN (FIGURA 19) se acomodan adecuadamente para representar la topografía del terreno. En este caso se crean cientos de superficies (en el caso anterior se crean unas cuantas superficies “a mano”)

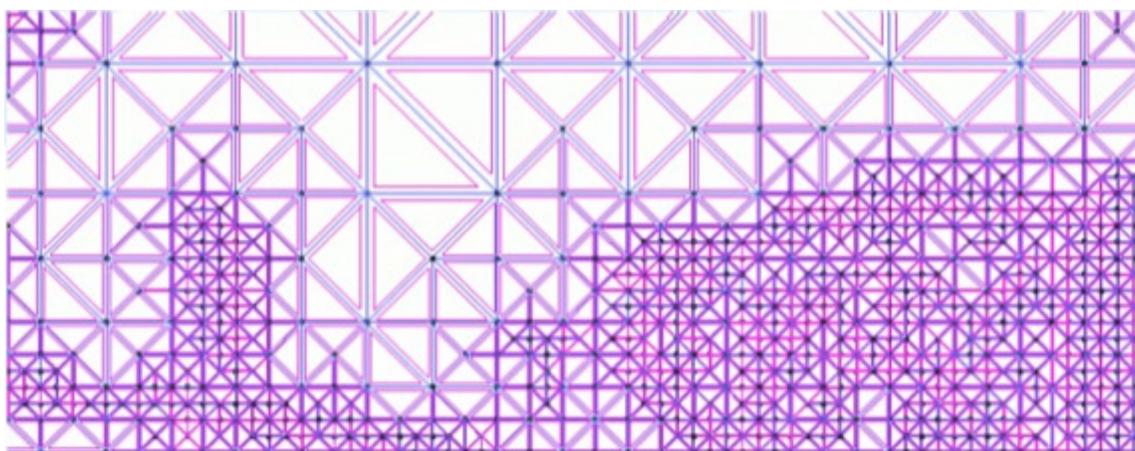


FIGURA 18. Geometrías RTIN

La desventaja de este método está en que se forman triángulos de tamaños muy diferentes y puede dificultar que no de más detalle de cálculo en zonas que nos interesen. Por este motivo no es recomendable para el estudio de rotura de balsa

MALLADO: Generaremos un mallado coincidente con la geometría RTIN. Queremos que cada triángulo sirva como elemento de malla. La malla será estructurada ya que cada superficie tendrá una sola división en cada lado.

DATOS NECESARIOS:

-Raster del Modelo Digital de Elevación.

Para el terreno de la Comunidad Autónoma de Aragón, tenemos disponible la descarga de estos ficheros con resolución 5 metros en el portal de IDEARAGON (idearagon.aragon.es) del Gobierno de Aragón.

Podemos obtener MDE con resolución 1 m, o generar nuestros propios MDE con herramientas GIS

ALGUNAS INDICACIONES PARA EL USO DE IBER

Usaremos la herramienta Iber: RTIN Crear RTIN

Debemos indicar los siguientes parámetros :

	Tolerancia	Tamaño máx.	Tamaño min.
Definición	<i>Es la diferencia máxima que debe haber entre el MDE y la geometría que se va a crear.</i>	<i>Es la longitud máxima del triángulo más grande que puede haber en la geometría creada.</i>	<i>Es la longitud mínima que pueden tener los triángulos de la geometría</i>
Valores recomendados	<i>Entre 0.1 y 0.3, según el tamaño del proyecto.</i>	<i>Según el usuario</i>	<i>Según el usuario</i>
Observaciones	<i>Cuan más grande sea este valor se crearán triángulos más grandes, pero la geometría será menos parecida al MDE.</i>	<i>Se crean primero los triángulos mayores, si cumplen la tolerancia, se reduce su tamaño hasta que no la cumpla.</i>	<i>El tamaño de los triángulo de la geometría no puede disminuir a un tamaño menor que el "tamaño mínimo" que pongamos aunque no se cumpla la condición de la "tolerancia"</i>

El RTIN se queda almacenado en un archivo .dxf

Para generar la malla, usaremos la herramienta Iber : Generar Malla por Superficie

4.6.3 Crear superficies directamente del raster de MDT y mallado coincidente con este raster (importar GDAL)

Con la herramienta GDAL se genera la geometría y una malla estructurada automáticamente. Se utiliza la malla de cálculo regular de elementos cuadrados (FIGURA 20)

GDAL es una librería destinada a importar geometrías y mallas directamente de una gran variedad de formatos habituales de los Modelos Digitales del Terreno.

También se pueden importar raster en formato ArcGis (*.adf) , sin necesidad de convertirlo a texto previamente.

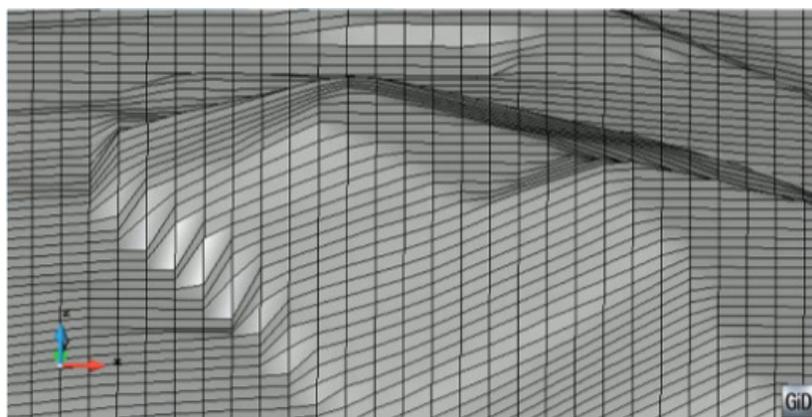


FIGURA 19. Mallado coincidente con el raster MDE con herramienta GDAL

DATOS NECESARIOS:

-Raster del Modelo Digital de Elevación.

Para el terreno de la Comunidad Autónoma de Aragón, tenemos disponible la descarga de estos ficheros con resolución 5 metros en el portal de IDEARAGON (idearagon.aragon.es) del Gobierno de Aragón.

Podemos obtener MDE con resolución 1 m, o generar nuestros propios MDE con herramientas GIS

ALGUNAS INDICACIONES PARA EL USO DE IBER

Podemos indicar el incremento para indicar la precisión. Si doblamos el valor de la precisión del raster, disminuimos una cuarta parte el número de elementos de malla. Es decir, una precisión de raster de 1 m, si indicamos incremento 2, disminuimos la precisión y pero también disminuimos el número de elementos (mayor velocidad de cálculo).

4.7 Condiciones iniciales

La condición inicial es la cantidad de agua que hay en el modelo cuando se inicia la simulación,

Hay que indicar la altura del agua que hay en el modelo al iniciar la simulación.

En las superficies internas de la balsa, debemos configurar una condición inicial de cota igual a la cota de agua igual al nivel de agua en la balsa en el escenario de rotura que queremos analizar.

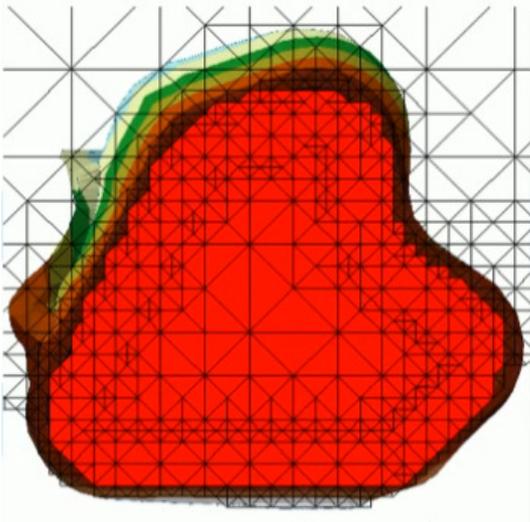


FIGURA 20. Condición inicial cota en el interior de la balsa

DATOS NECESARIOS

-Nivel del agua en la balsa el escenario a analizar

ALGUNAS INDICACIONES PARA EL USO DE Iber

Iber, si no indicamos nada, tomará como nivel de agua inicial 0 (terreno seco)

Podemos introducir este valor como cota (cota de la lámina de agua) o nivel (altura respecto del suelo)

4.8 Condiciones de contorno (entrada y salida)

Iber, por defecto, siempre considera a todas las líneas de borde como paredes verticales de altura indefinida por donde no puede entrar ni salir agua. Para que entre agua al modelo, es necesario asignar una o más líneas de contorno la condición de entrada. Es posible asignar más de una condición de entrada y en más de un lugar.

De la misma manera, para que salga el agua del modelo es necesario asignar una o más líneas de contorno la condición de salida.

4.8.1 Condicion de entrada

Se puede incorporar la condición de entrada de 3 formas:

- caudal total: caudal en forma de hidrograma. Se asigna esta condición a las líneas de contorno donde consideremos entra el caudal
- caudal específico: el caudal se introduce por unidad de ancho (m³/s/m)
- cota de agua: se asigna una condición de cota de agua cuando la entrada de agua viene condicionada por el nivel n una zona adyacente

También hay que definir el régimen del flujo cuando entra en el modelo: crítico/subcrítico o supercrítico.

Froude>1	Flujo SUPERCRÍTICO	Régimen rápido
Froude=1	Flujo CRÍTICO	
Froude<1	Flujo SUBCRÍTICO	Régimen lento

Para la simulación de onda de avenida por rotura de balsa, no tenemos condiciones de entrada, a no ser que se incorpore agua en la zona de inundación por medio de barrancos o cauce de río o cualquier otro tipo de aporte de agua a la zona.

El agua que se incorpora al modelo, vendrá dada por la herramienta brecha que calculará el caudal generado por la rotura del dique.

Si queremos analizar el escenario de rotura, considerando además el caudal de llenado de la balsa, podemos entonces configurar una condición de entrada en la zona de llenado de la balsa con el caudal de llenado constante a lo largo del tiempo de simulación (hidrograma plano).

4.8.2 Condiciones de salida

Es necesario indicar por donde saldrá el agua del modelo, de lo contrario se almacenará como si fuera un depósito.

Hay dos opciones de configuración:

- Régimen *supercrítico/crítico*: las condiciones hidráulicas en las salida dependerán de lo que ocurre aguas arriba (dentro del modelo), por lo que no hay que asignar ningún parámetro
- Régimen *subcrítico*: se necesita definir la condición de salida, esto es necesario porque hay influencia del tramo aguas abajo. La salida puede ser:
 - vertedero para cuando queramos representar una estructura hidráulica de laminación

- nivel dado: la cota del agua en la línea de salida del modelo
- curva de gasto o una curva de gasto Q cuando en la salida del modelo hay una estructura hidráulica y conocemos el caudal de salida en función del calado

Para la salida del modelo en la simulación de onda de avenida, lo habitual será una salida del modelo supercrítica/crítica asignada a todo el contorno de la zona de estudio (FIGURA 22), a no ser que la salida del modelo sea la entrada al mar u otro gran embalse.

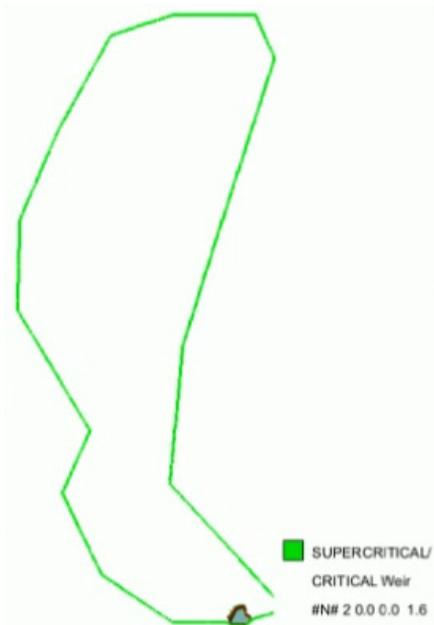


FIGURA 21 Condición de salida del modelo en el contorno de la malla

4.9 Rugosidad y usos del suelo

La rugosidad del cauce o llanura de inundación dependerá principalmente del terreno, suelo que lo forma, pendiente y vegetación. La rugosidad en Iber, se asigna a través del coeficiente de Manning. Asignaremos a cada superficie o elemento de malla el valor el coeficiente de Manning correspondiente

Tenemos varias guías o documentos técnicos oficiales a los que asistir para estimar un valor (Ven Te Chow, 1998) además de unos valores sugeridos por Iber en función de usos de suelo (FIGURA 23).

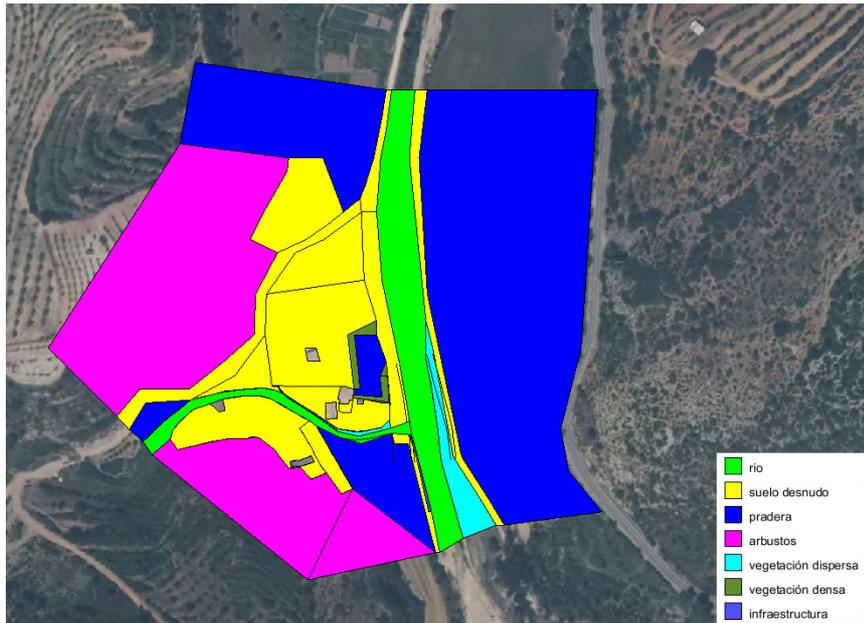


FIGURA 22 Asignación de usos de suelo

DATOS NECESARIOS

Estudio de los usos del suelo de la zona. Habrá que diferenciar cultivos, terreno de materiales, bosque, suelo desnudo, urbano.....y asignar a cada uso de suelo un valor de coeficiente de Manning

ALGUNAS INDICACIONES PARA EL USO DE IBER

Podemos asignar de manera automática el coeficiente de Manning para estudios de gran extensión y detallados, si tenemos esta información en un SIG. Iber tiene herramientas para importar esta información y aplicar el valor del coeficiente en cada punto X,Y almacenado en el GIS.

4.10 Definición de la brecha de rotura

En las presas de materiales sueltos, como suele ser en las balsas, la rotura se produce de forma progresiva en el tiempo (FIGURA 24).



FIGURA 23 .Rotura de forma trapezoidal progresiva

La Guía Técnica para estos casos, propone una geometría de rotura trapezoidal, con las siguientes fórmulas para calcular el tiempo de rotura y el ancho medio (Froehlich, D.C. 1987):

$$b \text{ (m)} = 20 \left(V \text{ (Hm}^3\text{)} - h \text{ (m)} \right)^{0,25}$$

Dónde:

b (m) anchura media de la brecha

V(Hm3) Volumen embalsado

h(m) profundidad de la brecha, hasta el contacto con el cauce en el pie del talud.

$$T \text{ (horas)} = 4,8 \cdot V^{0,5} \text{ (Hm}^3\text{)} / h \text{ (m)}$$

Dónde:

T (horas) tiempo de formación de la brecha (tiempo que tardará en generarse)

V(Hm3) Volumen embalsado

h(m) profundidad de la brecha, hasta el contacto con el cauce en el pie del talud.

Las fórmulas están basadas en experiencias de grandes presas, que tienen en cuenta solo variables de altura de presa y el volumen embalsado. Se echa en falta un análisis más profundo de este aspecto pues habría que tener en cuenta factores tan importantes como los materiales que compone el dique y su forma constructiva. Pero a día de hoy es el único documento técnico oficial del que disponemos. También podemos afirmar que estos son unos parámetros conservadores y que nos dan una fiabilidad frente a las medidas preventivas frente a posibles riesgos.

La formación de la brecha que se realiza por la Guía Técnica sigue el siguiente esquema (FIGURA 25):

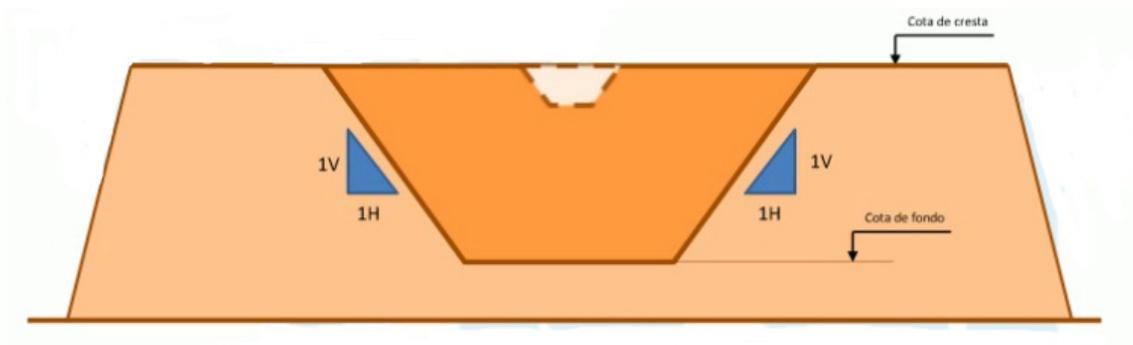


FIGURA 24. Esquema brecha de rotura geometría trapezoidal Guía Técnica

En la actualidad existen diversos modelos que simulan el fenómeno de formación y progresión de la brecha con forma trapezoidal así como los caudales generados. Para aplicar estos modelos necesitaremos la altura de la brecha, el volumen, y también la definición del un eje generatriz de la misma. (FIGURA 26)

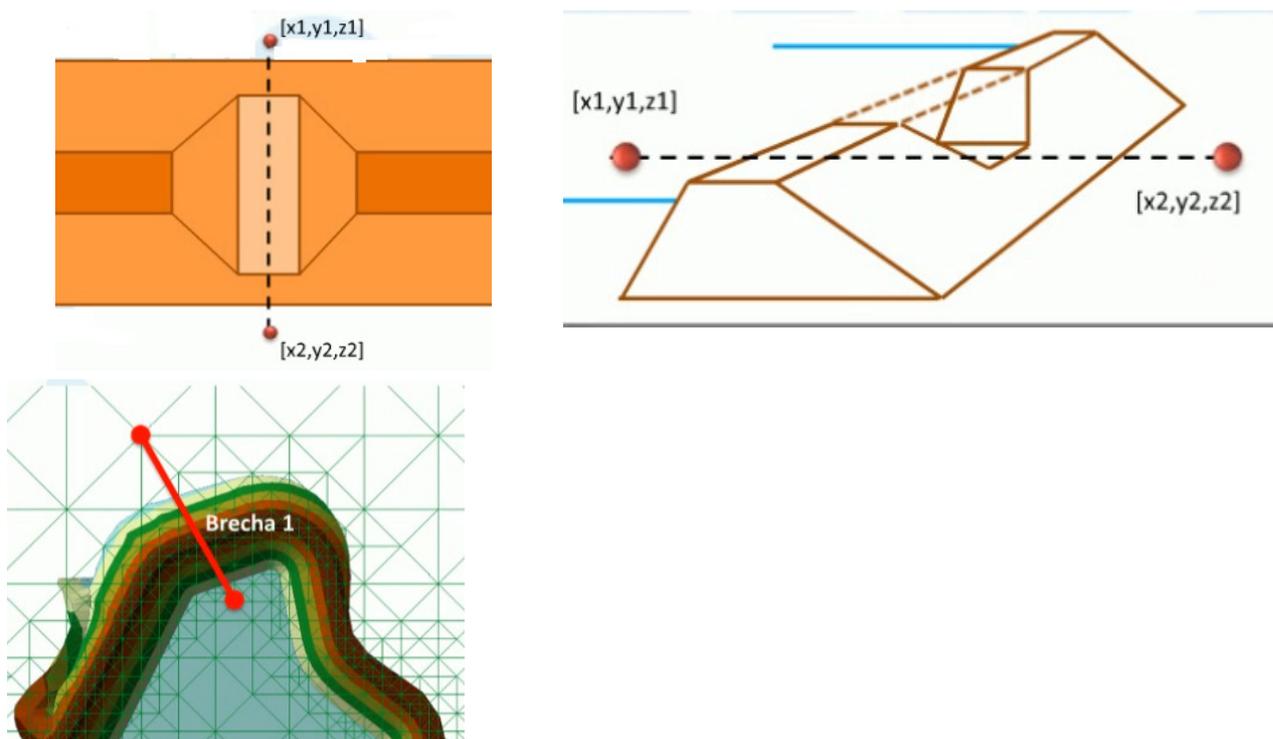


FIGURA 25. Esquema geometría brecha y eje generatriz. Representación en Iber

La elección del eje de rotura queda a criterio del usuario, pero el punto más crítico siempre será en la dirección preferente del flujo en la zona de estudio

Iber tiene incorporado un módulo de rotura de balsa que sigue la metodología de la Guía Técnica Española (Clasificación de presas en función del riesgo potencial) y que nos permite analizar la ola de avenida y la formación de la brecha en la malla (FIGURA 27)

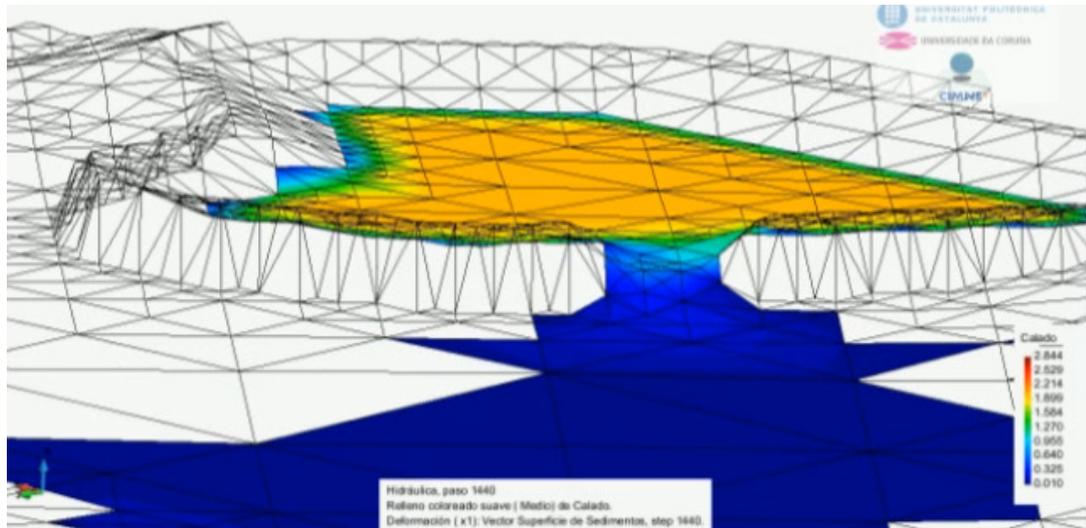


FIGURA 26. Deformación de la malla de cálculo para la evolución de la formación de la brecha

El método incorporado consiste en resolver las ecuaciones de Saint Venant considerando una geometría variable, a partir de unas condiciones iniciales. Las condiciones iniciales se impondrán el nivel de agua en el embalse. La malla de cálculo irá evolucionando con el tiempo para reproducir la deformación del terreno al formarse la brecha.

DATOS NECESARIOS

- Volumen evacuable en el escenario de simulación
- Cotas de coronación y base de la balsa (h de la brecha)
- Línea generatriz (dos puntos, interior y exterior de la balsa)

4.11 Propagación de la onda de rotura. Cálculo y simulación

4.11.1 Datos del problema

Antes de iniciar la simulación, debemos indicar los datos del problema. Las opciones de cálculo son relativas a los esquemas numéricos.

Los parámetros de tiempo (opciones relativas a la integración temporal de las ecuaciones de St.Venant y a la salida de resultados) son:

- **Instante inicial:** fija el valor de la variable tiempo al comenzar la simulación. Simplemente implica un Offset en el valor de dicha variable, pero no afecta al proceso de cálculo ni a los resultados
- **Tiempo máximo de simulación:** es el valor de la variable tiempo para el cual se finaliza el cálculo. El tiempo total de simulación será la diferencia entre el tiempo máximo de simulación y el instante inicial
- **Intervalo de resultados:** indica cada cuánto tiempo se escriben resultados en el fichero de resultados, Iber no escribe el valor de las variables de cálculo en cada paso de tiempo de cálculo, ya que generaría ficheros de un tamaño excesivamente grande.
- **Incremento de tiempo máximo:** Fija el máximo valor del incremento de tiempo que utiliza el programa para integrar en tiempo las ecuaciones de flujo. Esto es simplemente un valor máximo. El valor que realmente utiliza el programa es el mínimo entre este valor y el valor calculado a partir de la condición CFL.

Otros parámetros:

- **Numero de procesadores:** numero de procesadores que ejecutará el cálculo.
- **Esquema numérico:** se puede elegir entre esquemas numéricos para realizar la discretización espacial de las ecuaciones de flujo (orden 1, orden 2 e hidrológico) El esquema de primer orden es más estable pero menos preciso que el esquema de orden 2. En la misma malla, el esquema de orden 2 proporciona resultados más precisos
- **CFL Condición de Courant – Friedrichs-Levy.** Este parámetro establece una restricción sobre el paso de tiempo utilizado para realizar la integración temporal de las ecuaciones de flujo. Este valor debe ser inferior a 1. Cuanto mayor sea el valor de CFL menos tiempo tardará en ejecutarse el cálculo pero

pueden aparecer problemas de convergencia en el proceso de resolución de ecuaciones.

$$\Delta t_{\text{CFL}} = \text{CFL} \frac{\Delta x}{U + \sqrt{g \cdot h}} \qquad \Delta t_{\text{calculo}} = \min(\Delta t_{\text{CFL}}, \Delta t_{\text{max}})$$

Si se usa orden 2, se aconseja un valor de CFL=0.45. Si se observan problemas de convergencia en la solución se puede disminuir el valor del CFL. Si los problemas persisten bajando por debajo de 0.3, probablemente la causa sea otra.

Intervalo de tiempo, será el valor menor entre el intervalo máximo y el obtenido con esta fórmula.

- **Límite seco-mojado:** Fija el umbral que determina cuál es el calado límite a partir del cual se considera que un elemento está seco. La definición de elementos secos permite reducir el tiempo de cálculo ya que en los elementos secos se realizan muchas menos operaciones que los elementos que ya hay agua. También evitamos inestabilidades numéricas derivadas de la existencia de calados próximos a cero. Un valor pequeño proporcionará resultados más precisos, pero en geometrías muy irregulares con mallas gruesas pueden surgir inestabilidades. Un valor razonable para problemas de ingeniería fluvial es 0.01 metros.
- **Método de secado:** Hace referencia al algoritmo utilizado cuando un elemento pasa de tener un valor de calado superior al límite seco-mojado o a un valor inferior. Si en un paso de tiempo un elemento de la malla tiene un calado muy pequeño podría, en el siguiente paso de tiempo, pasar a tener un calado negativo. Este problema es más probable que se produzca a medida que disminuimos el valor de la tolerancia seco-mojado. Para evitar esto podemos incrementar el límite seco-mojado pero no es conveniente puesto que puede introducir errores importantes en la solución. Otro recurso es hacer igual a cero el calado en todos los elementos en los que en algún momento del cálculo se produzca un calado negativo. Esta solución tampoco es conveniente ya que se estaría introduciendo agua de manera artificial en el dominio de cálculo, por lo que se perdería la propiedad de la conservación de la masa. Para ello Iber tiene implementados tres métodos de secado diferentes, todos ellos garantizan la conservación de la masa de agua.
 - *Por defecto:* si en un elemento el calado es negativo, se considera seco y se guarda el valor de calado negativo como un déficit de volumen de agua. Para que dicho elemento vuelva a estar mojado, debe de llenarse previamente ese déficit de volumen de agua proveniente de los elementos adyacentes

- *Hidrológico*: recomendado para problemas de transformación lluvia-escorrentía.
- *Estricto*: impide que se produzcan calados negativos disminuyendo el paso del tiempo utilizado en la integración temporal. Preciso y conserva la masa de agua, pero el tiempo de cálculo puede incrementarse considerablemente.

DATOS NECESARIOS

Precalcular los parámetros de tiempo necesarios.

ALGUNAS INDICACIONES PARA EL USO DE IBER

Para que Iber modelice la brecha de rotura hay que activar la opción formación de brecha.

Marcar las opciones en resultados de “vector de calado” y “peligrosidad RD/9 2008 “ (esta nos permitirá elaborar mapas automáticamente con los criterios de peligrosidad indicados el el Real Decreto).

4.11.2 Cálculo y simulación

Una vez lanzado el cálculo, el tiempo de resolución puede variar en función del caso y del equipo informático desde unos pocos minutos, hasta horas.

Conforme va calculando, podemos seguir la evolución en una ventana que va mostrando algunas variables del proceso muestra el proceso

ALGUNAS INDICACIONES PARA EL USO DE IBER

Observar las variables del proceso mientras se va ejecutando. Si vemos anomalías podemos abortar el proceso antes de consumir tiempo de cálculo sin resultados fiables.

4.12 Postproceso. Visualización de resultados

4.12.1 Mapas de inundación y peligrosidad

A partir de los resultados de calados y velocidad se pueden obtener los mapas de inundación, que son la representación gráfica de los valores de estas dos variables en distintos instantes de tiempo. (FIGURA 28)

Estos mapas de inundación se pueden ver directamente en la interfaz de Iber o se pueden exportar los resultados para tratarlos en un entorno SIG.

Para la obtención de los mapas de peligrosidad los resultados hidráulicos (calados y velocidades) deben ser procesados con algún criterio de peligrosidad. Iber incorpora herramientas para este proceso, aunque se puede realizar mediante otro programa a partir de los resultados exportados

Según el Real Decreto 9/2008, establece como zona en la que se pueden producirse daños graves sobre las personas y los bienes, aquella que se cumple uno o más de los siguientes criterios: (FIGURA 29)

- que el calado sea superior a 1 m
- que la velocidad sea superior a 1 m/s
- que velocidad x calado sea superior a 0.5 m²/S

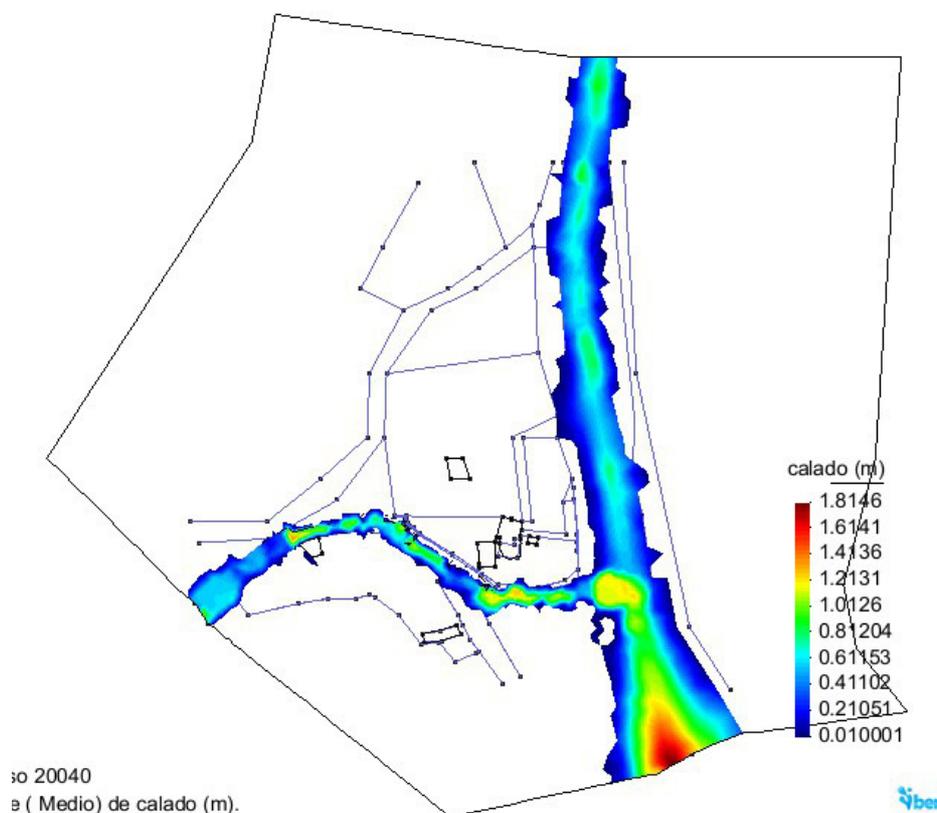


FIGURA 27 Ejemplo de mapa generado con iber de calados máximos

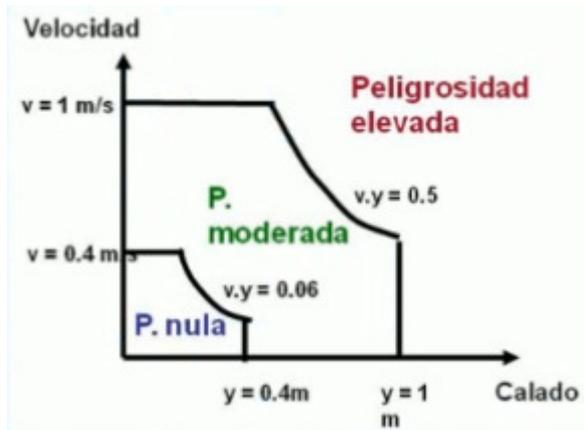
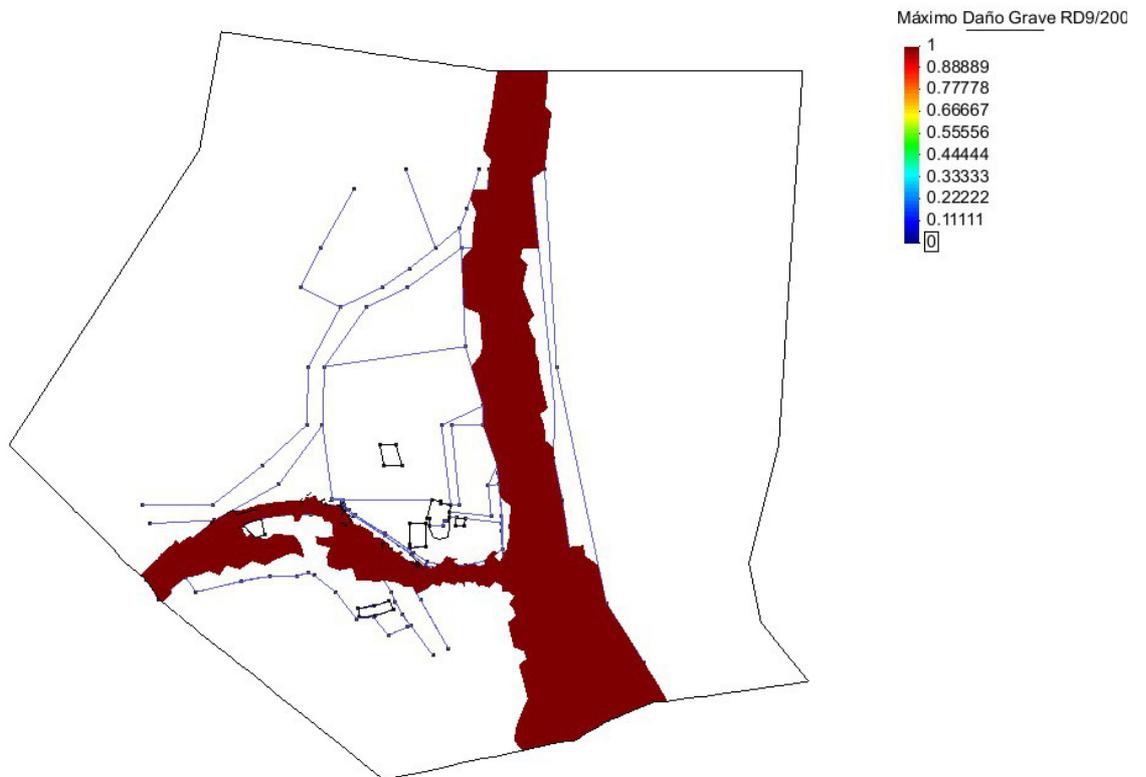


FIGURA 28. Criterios de peligrosidad

Iber crea el mapa de peligrosidad automáticamente según este criterio del Real Decreto. (FIGURA 30)



Mapas de Peligrosidad, paso 20040
Relleno coloreado suave (Medio) de Máximo Daño Grave RD9/2008.



FIGURA 29: Ejemplo de mapa de peligrosidad según RD9/200

4.12.2 Secciones, sondas de evolución en el tiempo en un punto dado, hidrogramas.

Este tipo de gráficos nos servirán para documentar las afecciones en los puntos conflictivos.

EL gráfico de secciones (perfiles transversales), podemos representar el nivel máximo de agua en una sección del terreno, ilustrando así la afección del calado de agua en un determinado lugar. (FIGURA 31)

Las sondas de evolución del nivel en el tiempo (FIGURA 32), nos indican como ha evolucionado e nivel de agua en el tiempo en un determinado punto de la malla. Con este gráfico podemos estimar los tiempos que tarda en llegar la avenida, útiles en la elaboración de los planes de emergencia.

Los hidrogramas (figura 33) nos indican la evolución del caudal en una sección, sirviendo para obtener caudales punta y tiempos de avenida.

También podemos graficar perfiles longitudinales a través de la herramienta “corte poligonal 2D”

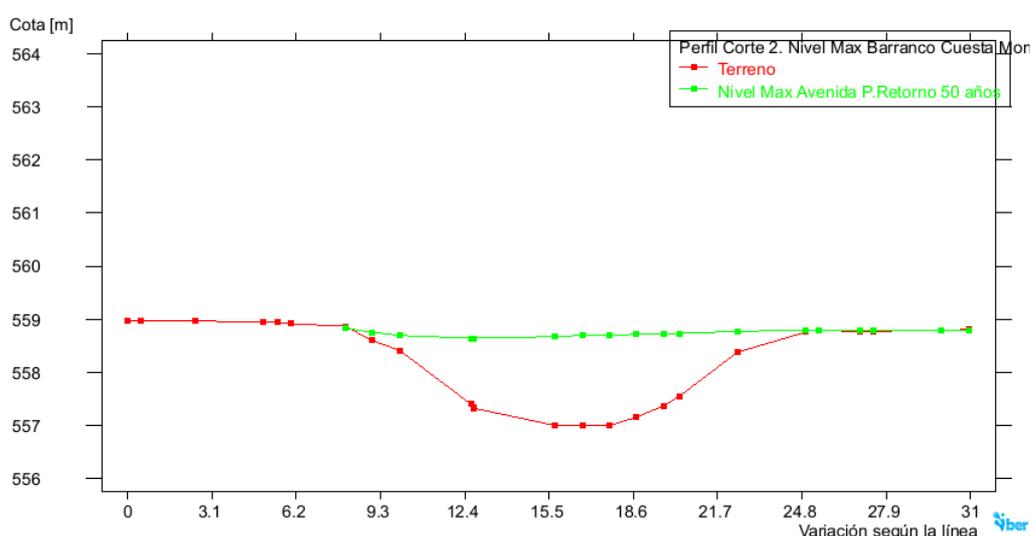


FIGURA 30. Ejemplo de gráfico de máximos de nivel de agua en una sección

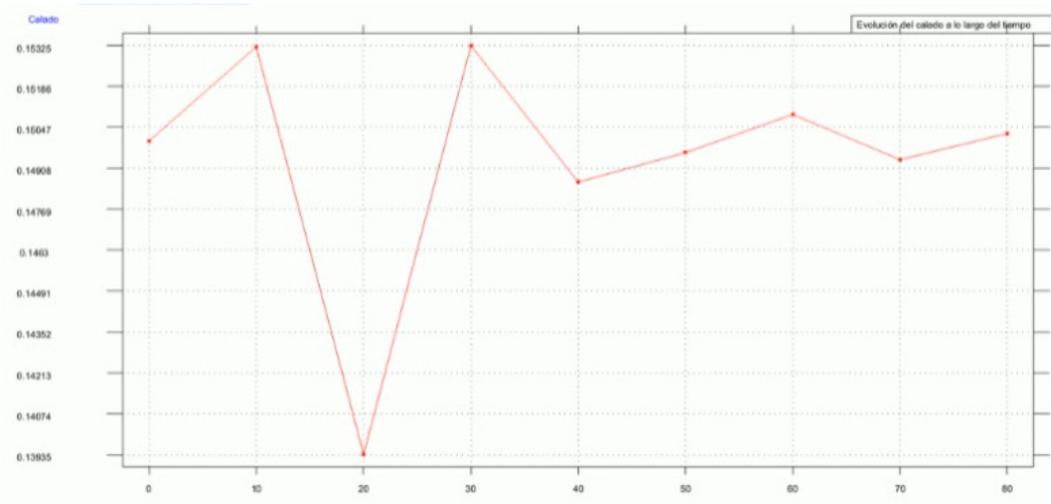


FIGURA 31. Sonda de evolución de calado a lo largo del tiempo en un punto

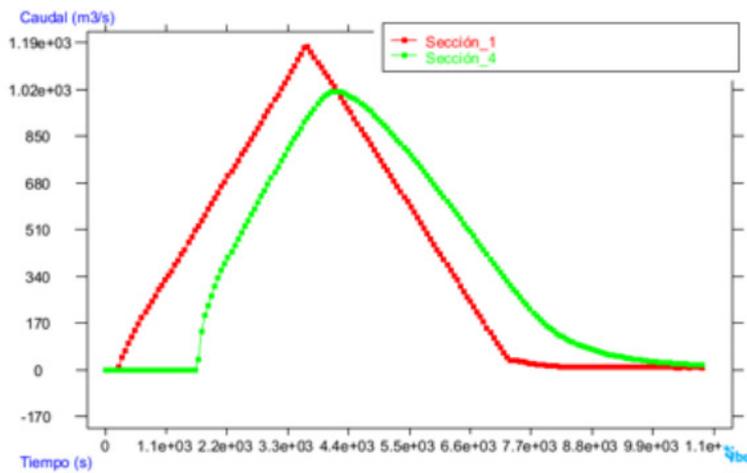


FIGURA 32 Hidrogramas en dos secciones diferentes del terreno

4.12.3 Exportación de resultados en formato RASTER

Iber elabora mapas automáticamente, pero podemos además exportar los resultados en formato raster para elaborar mapas con herramientas SIG y así poder usar esta información con otra que tengamos almacenada o por ejemplo mapear resultados de otros indicadores calculados.

Para los mapas de afecciones en detalle, deberemos hacer un tratamiento detallado de las variables en el terreno, y disponer de esta información en formato raster será muy útil.

5 EJEMPLO DE APLICACIÓN: SIMULACIÓN DE LA ONDA DE AVENIDA POR ROTURA DE LA Balsa DE RIEGO

Como ejemplo de aplicación de las estrategias para solucionar el estudio de avance de frente de onda por rotura para la clasificación de las balsas, se ha desarrollado un caso completo de con el programa Iber.

Se trata de una balsa de riego con una capacidad de 70.000 m³ , represada por materiales sueltos con altura de 8 m desde el fondo del barranco de evacuación hasta el nivel de máximo de explotación.

Puesto que la altura es mayor a cinco metros, es susceptible de ser registrada y obligación del titular de realizar una propuesta de clasificación (según Real Decreto 8/2009)

La balsa se encuentra próxima a un núcleo urbano, localizándose zonas de huertos y casetas de recreo cerca, así como una carretera nacional, por lo que se debe analizar las afecciones en estas zonas.

La balsa se encuentra en la Comunidad Autónoma de Aragón y además:

- en la cuenca del Ebro (intracomunitaria)
- no se encuentra en el Dominio Público Hidráulico
- la gestión y propiedad no es pública

Por todo esto, el órgano competente en cuanto al control de la seguridad en presas y embalses y responsable del registro es el Gobierno de Aragón (según Real Decreto 8/2009).

El Decreto que regula estas competencias y obligaciones en la Comunidad Autónoma de Aragón, está en fase de borrador pendiente de aprobación. EL registro y clasificación, por ahora, no es obligatorio para esta balsa, pero la tomamos como ejemplo de aplicación de la metodología, como anticipo a la aprobación del borrador.

La estrategia de elaboración del análisis de rotura de balsa sería la misma, si por ejemplo, la balsa se encontrar en Dominio Publico Hidráulico y el registro y clasificación fuera responsable la Administración General del Estado. En este caso, si sería obligatorio su registro y clasificación según el Real Decreto 8/2009.

El ejemplo se desarrolla en el ANEXO I de este Trabajo Fin de Carrera.

6 CONCLUSIONES

El cálculo del avance de frente de onda con modelos bidimensionales más fiable y preciso que otros métodos para casos de llanuras de inundación irregulares

El aprovechamiento de datos cartográficos y SIG, junto con la disponibilidad de software y equipos informáticos, hace que el uso de esos modelos sea más factible.

El software Iber incorpora las herramientas necesarias para la elaboración de los estudios para la propuesta de clasificación de embalses, presas y balsas.

Es de gran importancia la comprensión de los métodos de cálculo y formulaciones que resuelve Iber para llegar a unos resultados fiables, así como la capacidad de interpretación de los mismos

El mallado del dominio de estudio, será clave a la hora de hacer una simulación eficiente. Tamaños de malla inadecuados nos arrojarán resultados no fiables y pueden no hacer eficiente nuestro trabajo de simulación.

Tanto por la novedad de la normativa como por los variados métodos, y herramientas y datos disponibles, abordar la elaboración de los estudios para la clasificación de balsas en función de su peligrosidad, puede ser una tarea confusa y que nos haga perder tiempo.

La exposición de la normativa, la descripción de las estrategias y metodología propuesta, junto con un estudio y práctica del uso del programa Iber nos facilitan el proceso de elaboración de los informes para las propuestas de clasificación.

7 BIBLIOGRAFÍA

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J. , Vázquez-Cndón, M.E.; Dolz, J., Coll, A. (2014). *Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos*. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, VOL. 30 (1) pp. 1-10.

Chaudhry, M.H. (2007). *Open-Channel Flow, Second Edition*. Springer, New York

Fread, DL (1998, reise 1991). *Breach: An erosion model for earthn dam failures*. National Weather Service, Office of Hydrology, Silber Spring

Froehlich, D.C: (1997). *Embankment-Dam Breach Parameters, Proc. Of the 1987 National Conf. on Hydraulic Engr. ASCE, New York, August, 99 570-575*

Guía Técnica. Clasificación de presas en función del riesgo potencial. Ministerio de Medio Ambiente. (1996) Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas

ICOLD *Dam-Brek Flood Analysis*.Bulletin 11 (1998)

Manual Básico de Usuario Iber. (2012) GEAMA-Instituto FLUMEN

Manual de Referencia hidráulico Iber. (2014) GEAMA-Instituto FLUMEN

Ven Te Chow (1998). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill.

REFERENCIAS LEGISLATIVAS

Borrador Decreto nº /2016, de de , del Gobierno de Aragón, por el que se aprueba el Reglamento regulador de la clasificación y registro de presas, embalses y balsas competencia de la Administración de la Comunidad Autónoma de Aragón. *Recuperado de*
http://www.aragon.es/estaticos/GobiernoAragon/Organismos/InstitutoAragonesAgua/Documentos/Areas_Tematicas/15_Seguridad_Balsas/02_BorradorDecretoPresas.pdf

LEY 10/2014, de 27 de noviembre, de Aguas y Ríos de Aragón. *Boletín Oficial de Aragón* num 241, 2014, 10 de diciembre.

Orden de 12 de marzo de 1996 por la que se aprueba el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses. *Boletín Oficial del Estado* num 78, 1996, 30 de marzo (páginas 12244 a 12254)

Orden de 31 de marzo de 1967 por la que se aprueba la «Instrucción para proyecto, construcción y explotación de grandes presas». *Boletín Oficial del Estado* num 257, 1967, 27 de octubre

Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril. *Boletín Oficial del Estado* num 14, 2008, 16 enero.

Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas. *Boletín Oficial del Estado* num 176, 2001, 24 de julio.

Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas.(Real Decreto 849/1986, de 11 de abril). *Boletín Oficial del Estado* num 103, 1986, 30 abril.

Resolución de 31 de enero de 1995, de la Secretaría de Estado de interior, por la que se dispone la publicación del Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones. *Boletín Oficial del Estado* num 38, 1995 14 de febrero (páginas 4846 a 4858)