

Trabajo Fin de Máster

Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Propuesta de clasificación en función del riesgo potencial de rotura de la presa Tejarejos según R.D. 264/2021

Autora: Estrella Mena Costa

Tutores: Cristina Torrecillas Lozano, Eduardo Vázquez López

Dpto. Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Máster
Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

**Propuesta de clasificación en función del riesgo
potencial de rotura de la presa Tejarejos según R.D.
264/2021**

Autora:

Estrella Mena Costa

Tutores:

Cristina Torrecillas Lozano

Profesor titular

Eduardo Vázquez López

Profesor asociado

Dpto. de Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Trabajo Fin de Máster: Propuesta de clasificación en función del riesgo potencial de rotura de la presa
Tejarejos según R.D. 264/2021

Autora: Estrella Mena Costa

Tutora: Cristina Torrecillas Lozano

Tutor: Eduardo Vázquez López

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

Este trabajo no es solo un trabajo fin de máster, es la representación del final de una etapa, unos años en los que he aprendido lo que a día de hoy es mi profesión y gracias a los que he vivido muchas experiencias y aprendizajes que me han convertido en los que soy. Aprovecho este trabajo para agradecer a todas las personas que han formado parte de mi vida de alguna forma durante estos años.

Agradezco a mi familia la paciencia y el apoyo, porque siempre han estado conmigo, tanto en los mejores como en los peores momentos. A mis amigos de siempre, por aguantarme durante años poniendo excusas para hacer planes y por celebrar aún más que yo haber finalizado mis estudios, creyendo más que nadie en mí. A los amigos que he hecho estos años de carrera, por todos los momentos compartidos. A Civile, especialmente Antonio Pablo y Javier, por haber confiado siempre en mí y darme la oportunidad de crecer dentro de esta profesión. A Isa y Agustín, amigos que me acompañan desde los primeros días de grado y con los que formo el mejor equipo de agua que pueda existir.

Agradezco a Eduardo todo el tiempo invertido en este trabajo para que finalmente sea lo que es y a Cristina, porque además de haber compartido sus conocimientos como profesora y tutora en grado y máster, es un ejemplo, cuya ambición por crecer profesionalmente le motiva a seguir investigando y trabajando.

Estrella Mena Costa

Sevilla, 2022

El presente documento contiene la propuesta de clasificación en función del riesgo potencial de rotura de la presa Tejarejos, según el Real Decreto 264/2021, de 13 de abril, por el que se aprueban las normas técnicas de seguridad para las presas y sus embalses. Se plantea este estudio como prueba de un requisito de obligación actual para los titulares de presas en fase de proyecto, en construcción o en explotación.

Para llevar a cabo la clasificación, se toma como base el procedimiento descrito en la Guía Técnica para la clasificación de presas elaborada por la Dirección General del Agua del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Sobre la misma, se desarrolla en este documento una metodología general de elaboración para obtener la propuesta de clasificación. En el mismo se detalla el procedimiento de cálculo hidrológico e hidráulico con los que se obtendrán los resultados a analizar que, permitirán determinar la clasificación de la presa en función de sus dimensiones y del riesgo potencial derivado de su rotura y, será aplicado posteriormente a la presa objeto de estudio.

Como inicio del proceso, se describen los diferentes datos y posibles fuentes que se van a emplear a lo largo de la metodología. En este sentido se distinguen dos tipos de datos: en primer lugar, los datos necesarios para los cálculos hidrológicos y, en segundo lugar, los datos necesarios para la elaboración del modelo hidráulico. En el caso de estudio, los datos se han obtenido de los recursos libres que se encuentran a disposición de la población por parte de los organismos públicos.

Respecto a la metodología, para la realización de los cálculos hidrológicos se define la cuenca de aportación al embalse, a la que se le han determinado los parámetros hidrológicos que permitirán obtener los hietogramas e hidrogramas de cálculo. Este hidrograma se introducirá en el modelo hidráulico, obteniéndose los mapas de calados y velocidades máximas en los posibles puntos de afección que darán lugar a la clasificación final de la presa. Se examinan posibles afecciones a núcleos de población o viviendas aisladas, servicios esenciales, daños materiales y aspectos medioambientales, histórico-artísticos o culturales. Se evalúan los daños potenciales para cada uno de estos grupos, correspondiendo la categoría de la presa a la categoría máxima asignada a cada uno de los aspectos individuales, sin estudiar posibles combinaciones de ellos. En base a esta clasificación, se determina si la presa requiere la elaboración de un plan de emergencia.

Como aplicación de esta metodología, se realiza un caso de uso con la clasificación de la presa Tejarejos. Para la misma, los resultados del proceso llevado a cabo en el presente trabajo han sido unos mapas de calados y velocidades correspondientes a las diferentes llanuras de inundación asociados a los diferentes escenarios planteados, para una avenida de 1000 años de periodo de retorno, estudiando los posibles puntos de afección en base a la gravedad de los mismos según las evaluaciones listadas en la Guía, que son las posibles afecciones siguientes: Núcleos de población o viviendas aisladas; Servicios esenciales; Daños materiales y Aspectos medioambientales, histórico-artísticos o culturales. De esta forma, aunque en un inicio se estiman dos posibles puntos de afección, se determina finalmente que tan solo se produce un punto de afección, correspondiente al Camino del Jabuguillo. En esta afección, se obtienen calados de 1,39 m y velocidades de 3,03 m/s para el escenario de rotura sin avenida y calados de 1,6 m y velocidades de 3,56 m/s para el escenario límite.

Como conclusión, se obtiene que la presa se clasifica como pequeña presa dentro de la clase C, por lo que su rotura o funcionamiento incorrecto puede producir daños materiales de moderada importancia y sólo incidentalmente pérdida de vidas humanas, no siendo necesaria la elaboración de un plan de emergencia.

This document contains the classification proposal based on the Tejarejos dam potential rupture risk, according to Royal Decree 264/2021, April 13, which approves the technical safety standards for dams and their reservoirs. This study is proposed as a requirement for the real dam classification, an obligation for the dam owner in the project phase, under construction or in operation.

To carry out the classification, the procedure described in Technical Guide for the dams classification prepared by *Dirección General del Agua* of *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*. This document develops a general methodology for the classification proposal elaboration, detailing the hydrological and hydraulic calculation procedure with which the results to be analyzed will be obtained that allow the dam classification to be determined based on its dimensions and potential risk derived from its breakage, which will be applied later to the dam under study.

As the beginning of the process, the different data that will be used throughout the methodology to be followed for the dam classification process are obtained. In this sense, two types of data are distinguished; firstly, data necessary for the hydrological calculations, and, secondly, data necessary for the hydraulic model elaboration. In the case under study, the data has been obtained from the resources that are available to the population by public organisms.

In order to carry out the hydrological calculations, the reservoir's inflow basin is defined, to which the hydrological parameters that will allow the calculation hyetograms and hydrographs to be obtained are determined. This hydrograph will be introduced in the hydraulic model, obtaining the maximum depths and velocity maps in the possible affection points that will give rise to the final dam classification. Possible effects on population centers or isolated dwellings, essential services, material damage and environmental, historical-artistic or cultural aspects are examined. The potential damages for each of these groups are evaluated, the dam category corresponding to the maximum category assigned to each of the individual aspects, without studying possible combinations of them. Based on this classification, it is determined whether the dam requires an emergency plan development.

As an application of this methodology, the Tejarejos dam classification is carried out, characterizing both the dam and its reservoir and describing the fundamental area characteristics in which its location is detailed, giving special importance to the hydrographic and orographic elements, as well as the surroundings hydraulic conditions. The hydrological and hydraulic calculations explained in the general methodology in the calculation area for the case study are particularized.

The results carried out in the present work have been depths and velocities maps corresponding to the different floodplains associated with the different proposed stages, for a 1000 return period years flood, studying the possible effects based on their severity according to the evaluations listed in the Guide, which are the following possible conditions: Population centers or isolated dwellings; Essential services; Property damage; Environmental, historical-artistic or cultural aspects. In this way, although initially two possible affection points are estimated, it is finally found that there is only one affection point, corresponding to the Camino del Jabuguillo. In this condition, depths of 1,39 m and velocities of 3,03 m/s are obtained for the failure without flooding stage, and depths of 1,6 m and velocities of 3,56 m/s for the limit stage.

As a conclusion, it is obtained that the dam is classified as a small dam within class C, so its breakage or incorrect operation can cause material damage of moderate importance and only incidentally loss of human lives, not being necessary to develop an emergency plan.

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	i
Índice	i
Índice de Tablas	i
Índice de Figuras	i
1 Introducción	1
1.1. <i>Clasificación de la seguridad en presas</i>	1
1.2. <i>Normativa</i>	2
1.3. <i>Objeto del trabajo</i>	3
2 Datos de partida	5
2.1. <i>Datos necesarios para los cálculos hidrológicos</i>	5
2.1.1. Modelo Digital del Terreno	5
2.1.2. Precipitaciones máximas	6
2.1.3. Parámetro de escorrentía	7
2.2. <i>Datos necesarios para la elaboración del modelo hidráulico</i>	7
2.2.1. Modelo Digital del Terreno	7
2.2.2. Usos del suelo	8
3 Metodología	9
3.1. <i>Cálculos hidrológicos</i>	9
3.1.1. Definición de la cuenca	10
3.1.2. Análisis pluviométrico	10
3.1.3. Caracterización de la escorrentía	13
3.1.4. Cálculo de caudales e hidrogramas	14
3.2. <i>Cálculos hidráulicos</i>	19
3.2.1. Software: HEC-RAS 2D	19
3.2.2. Definición del límite aguas abajo del estudio	21
3.2.3. Escenarios de rotura	21
3.2.4. Modelización del terreno	23
3.2.5. Modelización del embalse	23
3.2.6. Modelización de la rugosidad	23
3.2.7. Condiciones del modelo	23
3.2.8. Parámetros de la simulación	24
3.2.9. Forma y dimensiones de la brecha	25
3.2.10. Tiempo de rotura	26
3.3. <i>Proceso de clasificación</i>	27
3.3.1. Clasificación en función de las dimensiones	27
3.3.2. Clasificación en función del riesgo potencial	27
4 Caso de estudio: la presa Tejarejos	33
4.1. <i>Características de la presa y el embalse</i>	33
4.1.1. Identificación	33

4.1.2	Localización	34
4.1.3	Características de la presa	38
4.1.4	Características del embalse	39
4.2	<i>Características del cauce aguas abajo afectado por la onda de rotura</i>	40
4.2.1	Precipitación máxima diaria	42
4.2.2	Parámetro de escorrentía	43
4.2.3	Contorno de la simulación	43
4.2.4	Modelización del terreno	44
4.2.5	Modelización del embalse	44
4.2.6	Modelización de la rugosidad	45
4.2.7	Parámetros de la simulación	46
5	Caso de estudio: Resultados	49
5.1.	<i>Cálculos hidrológicos</i>	49
5.1.1	Definición de la Cuenca	49
5.1.2	Precipitación de diseño	50
5.1.3	Hietograma de diseño	50
5.1.4	Caracterización de la escorrentía	52
5.1.5	Caudales e hidrogramas	53
5.2.	<i>Cálculos hidráulicos</i>	54
5.2.1.	Escenario sin avenida	54
5.2.2.	Escenario límite	57
5.2.3.	Avenida en regimen natural	59
5.3.	<i>Clasificación de la presa</i>	60
5.3.1.	En función de sus dimensiones	60
5.3.2.	En función del riesgo potencial de rotura	60
5.3.3.	Propuesta de clasificación	61
6	Conclusiones	63
	Apéndice I. Hietogramas e hidrogramas	67
	<i>Hietograma de diseño</i>	67
	<i>Hidrograma de diseño</i>	77
	Apéndice II. Metodología para el cálculo de la rugosidad	81
	<i>Introducción</i>	81
	<i>Rugosidad en la llanura de inundación</i>	83
	<i>Rugosidad del cauce</i>	90
	Referencias	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Valores del hidrograma unitario adimensional del SCS.	17
Tabla 3-2. Parámetros generales de la simulación.	24
Tabla 4-1. Características de la presa.	38
Tabla 4-2. Características del embalse.	39
Tabla 4-3. Curva característica del embalse.	39
Tabla 4-4. Parámetros generales de la simulación.	46
Tabla 4-5. Parámetros de tiempo de la simulación.	47
Tabla 5-1. Características morfológicas de la cuenca de aportación al embalse.	49
Tabla 5-2. Valores medios de precipitación máxima diaria en la cuenca de estudio para los periodos de retorno de análisis.	50
Tabla 5-3. Factor reductor K_A .	50
Tabla 5-4. Número de curva medio en las cuencas hidrológicas del estudio.	52
Tabla 5-5. Resultados del Método Racional Modificado.	53
Tabla 5-6. Caudal unitario del hidrograma de la cuenca de estudio para el periodo de retorno considerado obtenido por el Método del Hidrograma Unitario.	53
Tabla 5-7. Tabla resumen de caudales punta de diseño.	54
Tabla 5-8. Parámetros de la brecha.	54
Tabla 1. Hietograma de diseño de la cuenca de aportación al embalse para la avenida de 1000 años de periodo de retorno.	67
Tabla I-2. Hidrograma de diseño de la cuenca de aportación al embalse para la avenida de 1000 años de periodo de retorno.	77
Tabla II-1. Formulación de S_f según diversos autores.	81
Tabla II-2. Valores del coeficiente de rugosidad de Manning asignados a los usos del suelo del SIOSE y CLC2000.	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Modelo Digital del Terreno para la escala hidrológica (Fuente: MDT05 del Centro Nacional de Información Geográfica, 2008-2015).	6
Figura 2-2. Modelo Digital del Terreno para la escala hidráulica (Fuente: ficheros LiDAR del Centro Nacional de Información Geográfica, 1ª cobertura 2008-2015, 2ª cobertura 2015-actualidad).	8
Figura 3-1. Esquema general del proceso de clasificación de la presa.	9
Figura 3-2. Esquema general de cálculos hidrológicos	10
Figura 3-3. Factor de torrencialidad en España.	11
Figura 3-4. Esquema del proceso de obtención del hietograma de bloques alternos.	12
Figura 3-5. Esquema del modelo de pérdidas de precipitación.	13
Figura 3-6. Esquema de caracterización de escorrentía.	14
Figura 3-7. Esquema de elección del método de cálculo de caudales según el tiempo de concentración.	14
Figura 3-8. Esquema del proceso de cálculo hidráulico.	19
Figura 3-9. Ejemplo de flujo en canales pequeños circulando por celdas de gran tamaño.	21
Figura 3-10. Proceso de clasificación según la Guía Técnica.	22
Figura 3-11. Evaluación de la gravedad de las afecciones en núcleos de población y en viviendas aisladas.	28
Figura 3-12. Evaluación de la gravedad de las afecciones del tipo servicios esenciales.	29
Figura 3-13. Evaluación de la gravedad de las afecciones del tipo daños materiales.	30
Figura 3-14. Evaluación de la gravedad de las afecciones del tipo aspectos medioambientales, histórico-artísticas y culturales.	31
Figura 3-15. Evaluación de la gravedad de otras afecciones relacionadas en el PRTR.	31
Figura 4-1. Presa Tejarejos (fuente: PNOA).	33
Figura 4-2. Localización del T.M. La Granada de Río Tinto en la provincia de Huelva.	34
Figura 4-3. Localización del área de estudio en el T.M. de la Granada de Río Tinto.	34
Figura 4-4. Localización de detalle del área de estudio.	35
Figura 4-5. Ámbito orográfico de la zona de estudio (Fuente: MDT05 del Centro Nacional de Información Geográfica, 2014-2015).	35
Figura 4-6. Demarcaciones Hidrográficas de España.	36
Figura 4-7. Localización del área de estudio respecto a la demarcación hidrográfica Tinto, Odiel y Piedras.	36
Figura 4-8. Red hidrográfica en la zona según datos del CNIG-DH TOP.	37
Figura 4-9. Fotografía tomada en campo del vado inundable.	37
Figura 4-10. Situación de las obras de drenaje en la zona de estudio.	38
Figura 4-11. Curva característica del embalse.	40
Figura 4-12. Identificación de posibles afecciones.	41
Figura 4-13. Delimitación de la cuenca hidrográfica del Río Odiel en el punto de confluencia con el Arroyo de Mímbra en CARTODES.	41

Figura 4-14. Caudales asociados a la cuenca delimitada en CARTODES para el Río Odiel.	42
Figura 4-15. Mapa de precipitación máxima diaria para 500 años de periodo de retorno (Fuente: REDIAM).	42
Figura 4-16. Mapa de parámetro de número de curva (Fuente: REDIAM).	43
Figura 4-17. Contorno de la simulación hidráulica.	43
Figura 4-18. Modelo Digital del Terreno en la zona de estudio (Fuente: ficheros LiDAR del Centro Nacional de Información Geográfica, 2020).	44
Figura 4-19. Mapa de usos del suelo en la zona de estudio.	45
Figura 4-20. Condiciones de contorno del modelo de cálculo hidráulico en los tres escenarios planteados: escenario de rotura, escenario límite, escenario en régimen natural (sin presa).	46
Figura 4-21. Malla de cálculo hidráulica.	47
Figura 5-1. Delimitación de las cuencas de aportación.	49
Figura 5-2. Factor de torrencialidad en la zona de estudio.	51
Figura 5-3. Hietograma de diseño de la cuenca de aportación para 1000 años de periodo de retorno. Precipitación efectiva.	51
Figura 5-4. Hietograma de diseño de la cuenca de aportación para 1000 años de periodo de retorno. Precipitación total y abstracciones.	52
Figura 5-5. Valor del Número de Curva en la cuenca de aportación al embalse.	52
Figura 5-6. Hidrograma de diseño de la cuenca de aportación para 1000 años de periodo de retorno.	53
Figura 5-7. Mapa de calados máximos en el escenario de rotura sin avenida.	55
Figura 5-8. Mapa de velocidades máximas en el escenario de rotura sin avenida.	56
Figura 5-9. Hidrograma de rotura del escenario sin avenida.	56
Figura 5-10. Mapa de calados máximos en el escenario límite.	57
Figura 5-11. Mapa de velocidades máximas en el escenario límite.	58
Figura 5-12. Hidrograma de rotura del escenario límite.	58
Figura 5-13. Mapa de calados máximos en el escenario de avenida en régimen natural.	59
Figura 5-14. Mapa de velocidades máximas en el escenario de avenida en régimen natural.	60

1 INTRODUCCIÓN

España es un país con un régimen de precipitaciones irregular, tanto en tiempo como en espacio, lo que ha derivado en la construcción de multitud de presas y embalses a lo largo de los años con el objetivo de satisfacer las demandas de abastecimiento a poblaciones, industrias, regadíos y demás usos del agua. En la actualidad, la cantidad de presas construidas en su territorio supera las mil trescientas, la mayor parte de ellas construidas entre 1955 y 1970, lo que conlleva a la necesidad de su mantenimiento y vigilancia, con el objetivo de asegurar que cumplen con el servicio para el que fueron realizadas y con los criterios de seguridad necesarios. Durante el proyecto, construcción y explotación de estas presas se tiene en especial importancia su seguridad, de forma que se minimicen, en la medida de lo posible, los riesgos que se generen aguas abajo de ellas durante la vida de las obras. La clasificación de su seguridad y la normativa asociada, entre ella el nuevo decreto de 2021, se explica en este tema para justificar el objetivo de este trabajo.

1.1. Clasificación de la seguridad en presas

La Directriz Básica de Planificación Civil ante el riesgo de inundaciones, aprobada por Acuerdo del Consejo de Ministros el 9 de diciembre de 1994 y, posteriormente, el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses, aprobado por Orden Ministerial el 12 de marzo de 1996, introducen la obligatoriedad de clasificar las presas en función del riesgo potencial derivado de su posible rotura o funcionamiento incorrecto en tres categorías, en función de las posibles afecciones a la población, a servicios esenciales y a bienes materiales y medioambientales. En función de la clasificación resultante, se determina que presas deberán implantar un Plan de Emergencia y las diferentes exigencias de seguridad que se deben definir en los criterios de diseño y en las condiciones de explotación e inspección.

La Guía Técnica para la clasificación de Presas en función del riesgo potencial, publicada en 1996 por el Ministerio de Medio Ambiente, se redacta con el objetivo de facilitar la aplicación de la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el riesgo de inundaciones y el Reglamento Técnico sobre Seguridad de presas y embalses. Esta Guía empezó a utilizarse para iniciar el proceso de clasificación de todas las presas españolas.

Posteriormente a la publicación de esta Guía, entraron en vigor una serie de Reales Decretos que serán explicados en la sección de Normativa de este trabajo, lo que, unido al hecho de que en los últimos años han desarrollado una evolución importante los métodos hidráulicos para el cálculo de propagación de la onda de avenida que provoca la rotura de una presa, hicieron necesario revisar y adaptar la Guía Técnica para la Clasificación de Presas en función del riesgo potencial, actualizada en noviembre de 2021.

En el ámbito de la Administración General del Estado, a fecha de publicación de las Normas Técnicas de Seguridad de presas y sus embalses, se tienen los siguientes datos:

- 2.000 presas y balsas clasificadas, 915 A o B
 - 1.350 presas clasificadas, 750 A o B, 350 pequeñas presas C aproximadamente.

- 435 planes de emergencia aprobados (incluyendo balsas)
- 130 planes de emergencia implantados (incluyendo balsas)

1.2. Normativa

El día 9 de diciembre de 1994 el Consejo de Ministros aprobó la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones, que incluía por primera vez la obligación de clasificar las presas en función del riesgo potencial derivado de su rotura o funcionamiento incorrecto en España. Esta Directriz establecía la clasificación en tres categorías (A, B o C) en su Artículo 3.5.1.3, e incluía a su vez la obligación de aprobar e implantar Planes de Emergencia en el caso de las presas que resultasen clasificadas dentro de las categorías A y B.

En 1996, se aprobó el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses por el Ministerio de Medio Ambiente, en el que se establecía que los titulares o concesionarios de las presas que se encontrasen en servicio debían presentar la propuesta razonada de clasificación a la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas¹. Como consecuencia, los titulares de las presas que se encontrasen en fase de proyecto, construcción o explotación, debían presentar una propuesta de clasificación razonada en función del riesgo potencial de rotura o funcionamiento incorrecto ante la Administración.

Con el objeto de que se pudieran establecer unos criterios objetivos, homogéneos y de fácil aplicación en todas las presas, ese mismo año la Dirección General de Obras Hidráulicas publicó la Guía Técnica para la Clasificación de Presas en función del riesgo potencial, con la finalidad de plantear una metodología de carácter general y orientativo para la aplicación de estos criterios de clasificación de presas, estableciendo el contenido mínimo que debía incluir la propuesta de clasificación.

El Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, introduce un nuevo título dedicado a la seguridad de presas, embalses y balsas, que incluye novedades como la implantación de las Normas Técnicas de Seguridad, la creación de un Registro de Seguridad de Presas y Embalses o la incorporación de obligaciones a los titulares de las presas como la de solicitar el establecimiento de la clasificación de presas y balsas cuya altura supere los 5 metros o cuya capacidad de embalse sea superior a 100.000 m³ (Art. 367.1 del RDPH), en función del riesgo potencial y de sus dimensiones.

El día 14 de abril de 2021 se publica en el Boletín Oficial del Estado el Real Decreto 264/2021, de 13 de abril, por el que se aprueban las Normas Técnicas de Seguridad para las presas y sus embalses, en cuyo Artículo 4 se establece la obligatoriedad de solicitar la clasificación por parte de los titulares de las presas y embalses encuadrados en las definiciones del Art.367.1 del RDPH en función de sus dimensiones y del riesgo potencial derivado de su rotura o funcionamiento incorrecto, debiendo estar justificada con los criterios que establece la 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 (NTS1) incluida en el Anexo I de este Real Decreto. El Capítulo II de la NTS1 está dedicado a la clasificación de las presas, en el que se desarrollan los criterios básicos para llevar a cabo dicha clasificación.

El Art. 358 del RDPH establece que las presas se clasificarán en función de sus dimensiones y en función del riesgo potencial que pueda derivarse de su rotura o funcionamiento incorrecto.

En función de sus dimensiones, se clasifican como:

- Gran presa: aquellas cuya altura sea superior a 15 metros o las que, teniendo una altura comprendida entre 10 y 15 metros, tengan una capacidad de embalse superior a 1 hm³.
- Pequeña presa: las presas que no cumplen la condición de gran presa.

En función del riesgo potencial que pueda derivarse de su rotura o funcionamiento incorrecto, se clasifican en:

- Categoría A: presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto pueda afectar gravemente a núcleos urbanos o servicios esenciales, o producir daños materiales o medioambientales muy importantes.
- Categoría B: presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto pueda ocasionar daños materiales o

¹ Actualmente Dirección General del Agua

medioambientales importantes o afectar a un reducido número de viviendas.

- Categoría C: presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto pueda producir daños materiales de moderada importancia y sólo incidentalmente pérdida de vidas humanas. Pertenecerán a esta categoría las presas no incluidas en las Categorías A o B.

Tal como establece el Real Decreto 264/2021, por el que se aprueban las normas técnicas de seguridad para las presas y sus embalses, las presas y embalses que se encuentren clasificados dentro de las categorías A o B deben contar con un Plan de Emergencia de la presa, que será elaborado e implantado de acuerdo con las prescripciones contenidas en la 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.

Asimismo, los titulares de pequeñas presas que resulten clasificadas dentro de la categoría C se ven obligados a valorar cada cinco años si procede revisar su clasificación según nuevos condicionantes de peligrosidad aguas abajo de las mismas y comunicar la conclusión de dicha valoración a la Administración competente en materia de seguridad de presas.

Corresponde a la Administración competente en materia de seguridad de presas y embalses, de acuerdo con lo establecido en el Artículo 362.2.a) del Reglamento del Dominio Público Hidráulico dictar la resolución administrativa por la que se clasifica la presa atendiendo a su dimensión y al riesgo potencial derivado de su rotura. Es potestad de la Administración también la posibilidad de exigir al titular de la presa la revisión de la clasificación de esta.

Adicionalmente, tras la ocurrencia de situaciones consideradas extraordinarias, como pueden ser seísmos, avenidas o en el caso de que tengan lugar otras circunstancias que puedan comprometer la seguridad de la presa o el embalse, se realizará una revisión extraordinaria por parte del equipo encargado de la seguridad de la presa o podrá ser realizado por un equipo competente para ello.

Los criterios básicos de valoración de las afecciones incluidos en la Guía Técnica se desarrollan a lo largo del presente trabajo.

1.3. Objeto del trabajo

El objeto del presente trabajo tiene como objetivos:

- Establecer una metodología para la clasificación de presas que siga los criterios y recomendaciones establecidos en la nueva Guía Técnica para la clasificación de Presas en función del riesgo potencial, de aplicación, según el Artículo 367.1 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RDPH), a todas las presas situadas en cauces y a sus diques de collado, que presenten una altura superior a 5 metros o a las que tengan una capacidad de su embalse superior a 100.000 m³, siendo públicas o privadas, en construcción o que se vayan a construir.
- La realización de una propuesta de clasificación, en función del riesgo potencial derivado de su rotura, de una presa existente en el territorio nacional mediante la aplicación de la Norma Técnica de presas actualizada mediante el Real Decreto 264/2021, de 13 de abril, por el que se aprueban las normas técnicas de seguridad para las presas y sus embalses. Para ello, esta Norma Técnica será aplicada a la evaluación de la presa Tejarejos, ubicada en el término municipal de La Granada de Río Tinto, Huelva.

2 DATOS DE PARTIDA

En este capítulo se van a mostrar los diferentes datos que se van a emplear como partida a lo largo de la metodología a seguir para el proceso de clasificación de la presa. En este sentido, se distinguen dos tipos de datos: en primer lugar, los datos necesarios para los cálculos hidrológicos, y, en segundo lugar, los datos necesarios para la elaboración del modelo hidráulico.

2.1. Datos necesarios para los cálculos hidrológicos

Los datos necesarios para la realización de los cálculos hidrológicos son el modelo digital del terreno a escala hidrológica², precipitaciones máximas y parámetro de escorrentía.

2.1.1 Modelo Digital del Terreno

Para la obtención de la cartografía, se emplean los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE), que son estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la cota del terreno en relación a un sistema de referencia altimétrico concreto, generalmente al nivel del mar en Alicante.

Estos modelos digitales de elevaciones se encuentran disponibles en el Centro de Descarga del Centro Nacional de Información Geográfica del Instituto Geográfico Nacional del Ministerio de Fomento del Gobierno de España (página web: https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/locale?request_locale=en acceso noviembre 2022)



A escala de cuenca (escala hidrológica), se utiliza el modelo digital del terreno disponible con un paso de malla de 5 m, con la misma distribución de hojas que el MTN50. El formato de archivo es ASCII matriz ESRI® (asc). El sistema geodésico de referencia es ETRS89 (en Canarias REGCAN95, compatible con ETRS89) y proyección UTM en el huso correspondiente a cada hoja; en Canarias el huso UTM es el 28. Según la hoja de que se trate, el MDT05 se ha obtenido de una de las dos siguientes formas: por estereocorrelación automática de vuelos fotogramétricos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) con resolución de 25 a 50 cm/píxel, revisada e interpolada con líneas de ruptura donde fuera viable, o bien por interpolación a partir la clase terreno de vuelos LiDAR del PNOA³. El PNOA se inicia en el año 2004 con el objetivo de obtener ortofotografías aéreas digitales de todo el territorio español, actualizándose periódicamente cada tres años en la actualidad.

² Hablamos de escala hidrológica cuando hacemos referencia a un ámbito del terreno a nivel de cuenca hidrológica, generalmente una zona amplia en la que se precisa una resolución de menor detalle.

³ Plan Nacional de Ortofotografía Aérea.

El modelo digital del terreno disponible con paso de malla de 5 metros se muestra en la Figura 2-1.

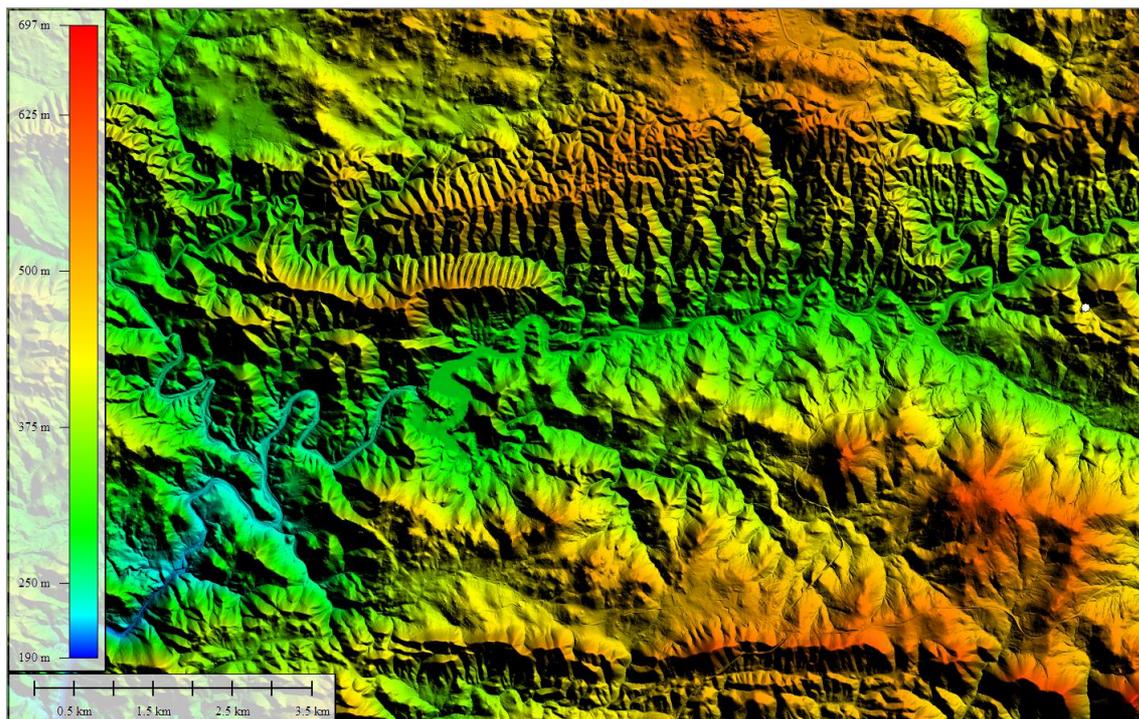


Figura 2-1. Modelo Digital del Terreno para la escala hidrológica (Fuente: MDT05 del Centro Nacional de Información Geográfica, 2008-2015).

2.1.2 Precipitaciones máximas

Para la determinación de la precipitación máxima en función del periodo de recurrencia se utilizan los ráster disponibles en las siguientes coberturas:

- Cobertura ráster de precipitación máxima diaria de la aplicación CAUMAX® desarrollada por el MAPAMA⁴ y el CEDEX⁵ basados en la metodología expuesta en la publicación del Ministerio de Fomento “Máximas Precipitaciones Diarias en la España Peninsular” (1999), que abarca todo el territorio español, desarrollada dentro del ámbito del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables por el CEDEX.
- Análisis estadístico de los datos proporcionados por la Agencia Estatal de METeorología (AEMET) de España, seleccionando las estaciones pluviométricas pertinentes por posible afección en la zona de estudio, obteniendo el valor de precipitación máxima diaria para cada año de registro y aplicando distribución de probabilidad para obtener los valores de precipitaciones asociados a los distintos periodos de retorno en cuestión.
- Cobertura de la REDIAM⁶, elaborada en 2006 por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. Dicha fuente parte de 2324 estaciones meteorológicas del territorio andaluz, que se completan con series en un periodo elegido de 20 años (1984-2004). Esta capa usa datos por estaciones, años y meses y en los casos de haber valores nulos, se le realiza una ponderación mediante la metodología del inverso de la distancia. La capa incluye 11 Estaciones corona (virtuales) a las que se les fuerza a tener datos ponderados para tener cubierta toda la superficie estudiada. Completadas las series, se obtiene una tabla de datos completa, que se puede analizar geoestadísticamente mediante el módulo Geoestadística de ArcGIS®. A partir de los modelos de pluviometría media, máxima diarias y siguiendo la metodología del Ministerio de Fomento (SQRT-ETmax), se obtienen las mallas para los diferentes periodos de retorno. Con todo lo comentado anteriormente, se han elaborado modelos

⁴ Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y Ministerio para la Transición Ecológica.

⁵ Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.

⁶ Red de Información Ambiental de Andalucía. Tiene como objetivo la integración de toda la información que sobre el medio ambiente se produce con referencia espacial en Andalucía.

digitales de Periodos de Retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años en Andalucía. Se trata de 8 mallas, uno por cada valor de periodo de retorno, y se obtienen a partir de los datos de 469 estaciones de diferentes redes (COMP, EMA, INM, RAIF, RIA, SIVA, EARM) con series históricas de datos de 20 años (1984-2004). El objetivo de dicha cobertura es crear modelos digitales de los periodos de retorno indicados que doten al Subsistema Aguas de esta información para su posterior aplicación a otras problemáticas relacionadas, siendo apto de aplicación también en otros sectores.

2.1.3 Parámetro de escorrentía

Para la obtención del parámetro característico de escorrentía, bien sea información referente al umbral de escorrentía con el que posteriormente se obtendrá el número de curva o una capa que incluya el propio valor del número de curva, se pueden consultar las siguientes coberturas:

- La cobertura ráster de umbral de escorrentía de la aplicación CAUMAX, realizada en mayo de 2014 por el CEDEX.
- La cobertura ráster de número de curva de la REDIAM, realizada en 2006 por la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía. Se trata de una malla o Grid del número de curva en condición antecedente de humedad II⁷ para el cálculo de la escorrentía por el método propuesto por el SCS. Ha sido realizado a partir del Mapa de suelos de Andalucía a escala 1:400.000, y del Mapa de usos y coberturas vegetales del suelo de Andalucía a escala 1:25.000 de año 2007. Fue generado en abril de 2012.

En lo que se refiere al Mapa de cultivos y aprovechamientos del área (usos de suelo) de la Conserjería de Medioambiente Andalucía, cabe destacar que, en los últimos años, la cartografía de usos de suelo de la Unión Europea ha realizado un importante avance con la puesta en marcha del Proyecto Corine Land Cover (CLC). El establecimiento de equivalencias entre los usos de suelo de la cartografía CLC y el Umbral de Escorrentía (P_0) no es nuevo y las distintas Administraciones han venido adaptando su cartografía a esta nueva fuente de datos.

2.2. Datos necesarios para la elaboración del modelo hidráulico

En el caso del modelo hidráulico, los datos necesarios para su elaboración son el modelo digital del terreno a escala hidráulica⁸ y los usos del suelo.

2.2.1. Modelo Digital del Terreno

A escala de la zona concreta de estudio (escala hidráulica), se utilizan los ficheros LiDAR, que son ficheros digitales con información altimétrica de la nube de puntos LiDAR, distribuidos en ficheros de 2x2 km de extensión. El formato de descarga es un archivo LAZ (formato de compresión de ficheros LAS). Las nubes de puntos han sido capturadas mediante vuelos con sensor LiDAR con una densidad de 0,5 puntos/m², y posteriormente clasificadas de manera automática y coloreadas mediante RGB obtenido a partir de ortofotos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) con tamaño de pixel de 25 ó 50 cm. El sistema geodésico de referencia es ETRS89 en la Península, Islas Baleares, Ceuta y Melilla, y REGCAN95 en las Islas Canarias (ambos sistemas compatibles con WGS84), y proyección UTM en el huso correspondiente a cada fichero. Se representan alturas ortométricas. El modelo digital del terreno obtenido de los ficheros LiDAR se muestra en la Figura 2-2.

⁷ Condiciones de humedad previa normal.

⁸ Hablamos de escala hidráulica cuando hacemos referencia a un nivel de detalle más específico que a nivel hidrológico, con una resolución más elevada.

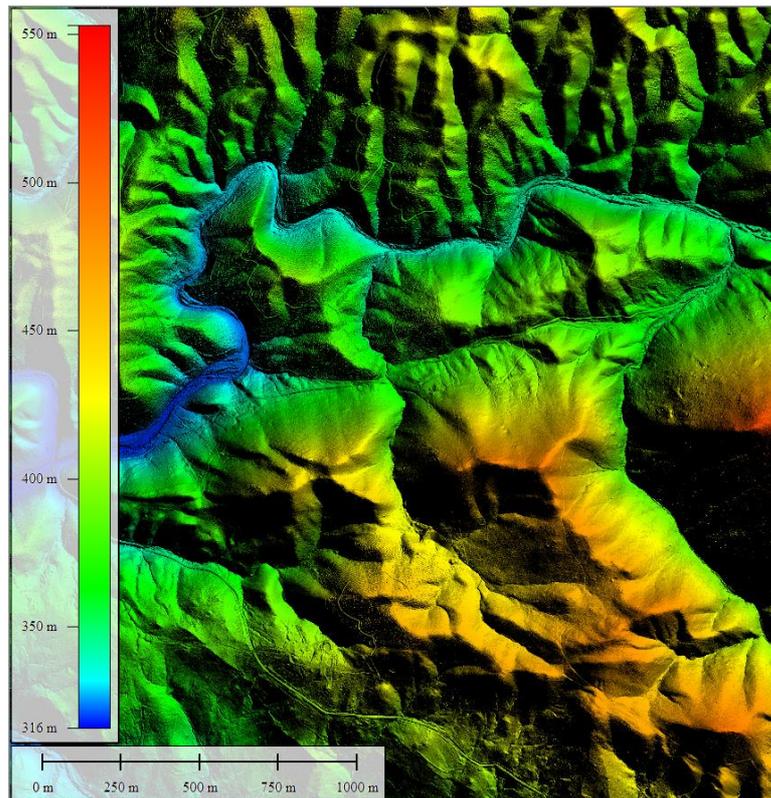


Figura 2-2. Modelo Digital del Terreno para la escala hidráulica (Fuente: ficheros LiDAR del Centro Nacional de Información Geográfica, 1ª cobertura 2008-2015, 2ª cobertura 2015-actualidad).

2.2.2. Usos del suelo

La determinación de la rugosidad del terreno se realiza en base a los usos del suelo recogidos en el Sistema de Información de Ocupación del Suelo de España (SIOSE- 2013) llevado a cabo por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). De esta forma, se obtiene la cobertura de usos del suelo dentro del dominio de cálculo.

Los valores de los coeficientes de rugosidad de Manning aplicados se han obtenido de la tabla expuesta en la Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables del Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino.

3 METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología seguida para la realización de la propuesta de clasificación de la presa de estudio. Para ello, se llevarán a cabo los cálculos hidrológicos e hidráulicos necesarios para la obtención de los resultados hidráulicos que darán lugar a la clasificación de la presa en función de calados y velocidades.

El planteamiento general seguido es el mostrado en la Figura 3-1.

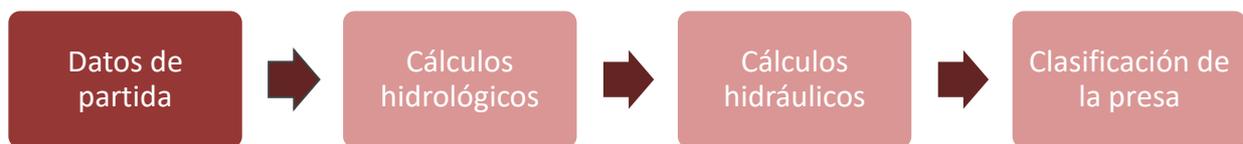


Figura 3-1. Esquema general del proceso de clasificación de la presa.

Para la realización de los cálculos hidrológicos se define la cuenca de aportación al embalse, a la que se determinan los parámetros hidrológicos que permitirán obtener los hietogramas e hidrogramas de cálculo. Este hidrograma se introducirá en el modelo hidráulico, cuya definición y planteamiento se presenta a lo largo del presente apartado.

3.1 Cálculos hidrológicos

El estudio hidrológico determina los caudales de avenida que se producen como consecuencia de la generación de un evento tormentoso de carácter extremo en la cuenca de aportación. Conceptualmente, la caracterización hidrológica se compone de dos procesos: la determinación del régimen de precipitaciones extremas y el proceso de formación de escorrentía.

El **estudio de las precipitaciones extremas** aborda dos cuestiones fundamentales: por un lado, se define cuál es la cantidad máxima de precipitación en función de la probabilidad de ocurrencia y, por otro lado, se estima cuál va a ser la distribución temporal a lo largo de la duración del evento tormentoso. En resumen, el estudio de precipitaciones responde a cuánta lluvia cae y cómo se reparte en el tiempo.

El proceso de **formación de la escorrentía** dependerá de las características geométricas de la cuenca y de la cobertura de ésta, es decir, de los usos del suelo presentes en su extensión. La generación de escorrentía se estima en base a la metodología propuesta en 1972 por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales de los EE. UU. (NRCS), denominada el “Método del Número de Curva” (Kent, 1968; SCS, 1972)

Se analizan las precipitaciones para todos los periodos de retorno disponibles por la cobertura, con el fin de extrapolar los datos a periodos de retorno superiores para obtener la avenida correspondiente al llenado del embalse desde el Nivel Máximo Normal, hasta coronación.

En la Figura 3-2 se muestra el esquema general del procedimiento a seguir para la realización de los cálculos hidrológicos.

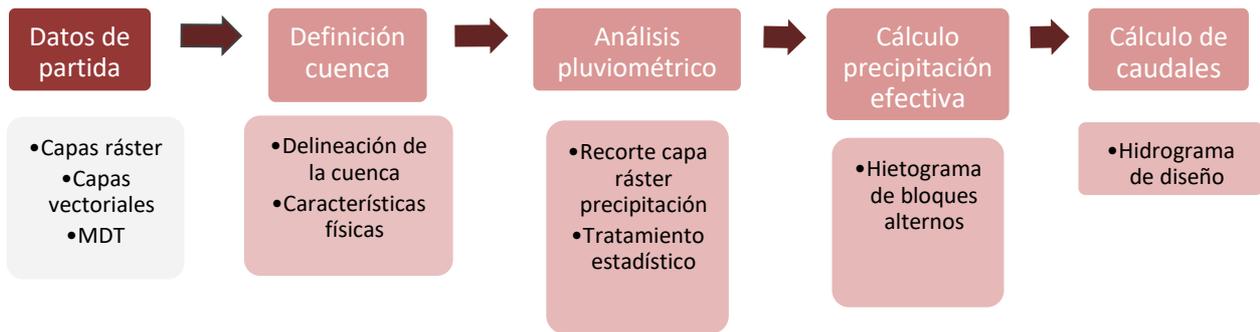


Figura 3-2. Esquema general de cálculos hidrológicos

3.1.1 Definición de la cuenca

Para la definición de las cuencas se realiza un análisis del MDT con herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica), fijando como punto de control las bifurcaciones entre ríos y arroyos. Como resultado, se obtiene:

- Delineación de la cuenca por su divisoria.
- Características físicas de la cuenca: superficie, cota máxima, cota mínima, longitud del recorrido más largo, pendiente, etc.

3.1.2 Análisis pluviométrico

En el análisis pluviométrico tienen lugar dos etapas: cálculo de la precipitación de diseño y determinación del hietograma de diseño.

El cálculo de la precipitación de diseño se ha realiza mediante la consulta de la cobertura ráster de precipitación máxima diaria elegida. La metodología seguida para obtener el valor medio en la cuenca hidrográfica de estudio ha sido la siguiente:

- 1) Recorte de la capa ráster completa dentro de los límites de la cuenca hidrográfica que drena a través de la zona de estudio.
- 2) Tratamiento estadístico del recorte resultante para la obtención de un valor medio en toda la superficie de la cuenca.

La mayor parte de los trabajos hidrológicos requieren la estimación de la lluvia sobre una determinada área, que evidentemente será igual o menor que el correspondiente valor puntual calculado, debido al efecto de la no simultaneidad.

La obtención de valores areales suele efectuarse mediante el uso de un factor reductor por el que se multiplican los valores puntuales previamente estimados. En España se emplea la expresión propuesta por Témez, en la que el factor reductor K_A es igual a:

$$K_A = 1 - \frac{\text{Log}(A)}{15} \quad \text{si } A > 1 \text{ km}^2 \quad (3-1)$$

$$K_A = 1 \quad \text{si } A < 1 \text{ km}^2 \quad (3-2)$$

Siendo A el área de la cuenca en km^2 .

La determinación del hietograma de diseño comprende dos pasos: un primer paso destinado a la definición de la distribución temporal de la precipitación, y un segundo paso en el que se establece el modelo de pérdidas de precipitación con el que se caracteriza el proceso de formación de escorrentía.

Con el valor obtenido de la precipitación máxima diaria corregido arealmente se ha realizado un diagrama

sintético de bloques alternos, suponiendo una **duración de la tormenta de 24 horas e incrementos de tiempo de 5 minutos**. Se ha tomado esta duración de la tormenta ya que el volumen acumulado durante la misma es igual al valor de precipitación máximo calculado.

En primer lugar, se ha obtenido la intensidad para cada duración a partir de la **curva Intensidad-Duración-Frecuencia de Temez**, cuya expresión es la siguiente:

$$I_t = I_{24} \left(\frac{I_1}{I_{24}} \right)^{\frac{28^{0,1} - t^{0,1}}{28^{0,1} - 1^{0,1}}} \quad (3-3)$$

dónde:

I_t es la intensidad media máxima asociada a la tormenta, en mm/h.

t es la duración de la lluvia, en horas.

I_{24} es la intensidad media diaria en mm/h, calculada como:

$$I_{24} = \frac{P_{24}}{24} = \frac{P_{DC}}{24} \quad (3-4)$$

I_1/I_{24} es el factor de torrencialidad, dado por el mapa que se muestra en la Figura 3-3 y se determinará calculando el valor medio en la zona de estudio

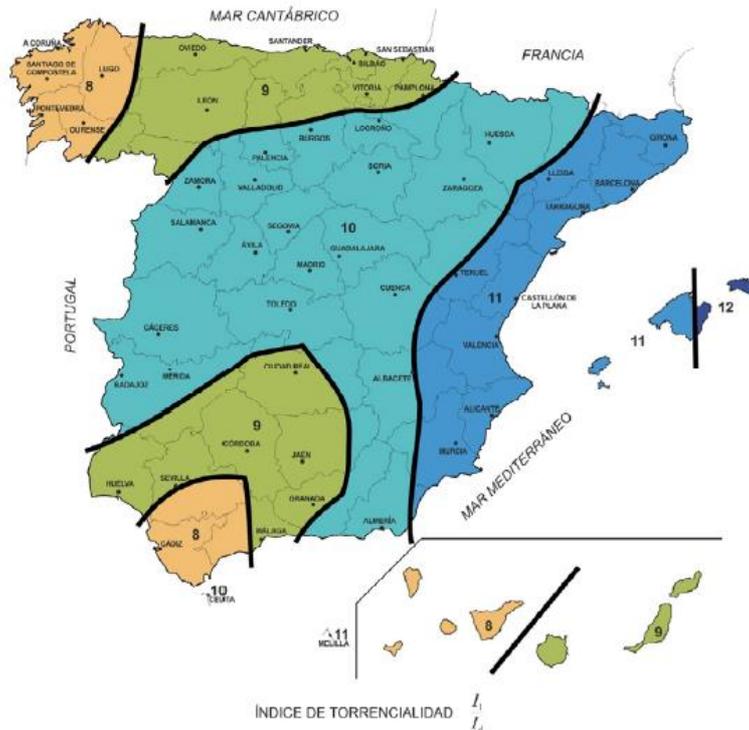


Figura 3-3. Factor de torrencialidad en España.

En segundo lugar, se ha obtenido el volumen de precipitación acumulado, multiplicando para ello la intensidad obtenida en cada duración por el valor de ésta última.

Finalmente, se ha calculado el volumen incremental en cada bloque a partir de los valores de precipitación acumulados, obteniendo así el hietograma de bloques alternos.

El esquema del procedimiento general a seguir para la obtención del hietograma de bloques alternos es el mostrado en la Figura 3-4.



Figura 3-4. Esquema del proceso de obtención del hietograma de bloques alternos.

A continuación, se pasa a definir un modelo de pérdidas de precipitación que permita conocer la porción de precipitación que finalmente se convierte en escorrentía, lo que se denomina precipitación efectiva o precipitación neta.

El modelo de pérdidas de precipitación usado es el **método del US SCS (1972)**, para el cual se necesita, en primer lugar, el número de curva de la cuenca. Determinado el número de curva para cada cuenca (se ha visto su valor anteriormente), se calcula a partir del mismo otros dos parámetros que intervendrán en el método del SCS y, que son:

$$\text{Retención potencial máxima} \rightarrow S(\text{mm}) = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3-5)$$

$$\text{Abstracción inicial} \rightarrow I_a = 0,20 \cdot S \quad (3-6)$$

Con esto, ya se conocen todos los parámetros del método, el cual sigue el siguiente proceso:

- 1) Obtención de la precipitación acumulada a partir del hietograma de bloques alternos de precipitación total calculado anteriormente.
- 2) Cálculo de la abstracción inicial por bloques, que en los primeros bloques es igual a la precipitación total y, una vez se supera el umbral de escorrentía, igual al valor máximo calculado.
- 3) Cálculo de la retención acumulada (F_a) a partir de la hipótesis fundamental del método, que sigue la siguiente expresión:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_{EFECTIVA}}{P_{TOTAL} - I_a} \quad \rightarrow \text{sustituyendo } P_{EFECTIVA} \text{ según:} \quad (3-7)$$

$$P_{TOTAL} = P_{EFECTIVA} + F_a + I_a \rightarrow P_{EFECTIVA} = P_{TOTAL} - F_a - I_a \quad (3-8)$$

donde:

F_a = Retención acumulada

S = Retención potencial máxima

I_a = Abstracción inicial

$P_{EFECTIVA}$ = Precipitación efectiva

P_{TOTAL} = Precipitación total

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_{EFECTIVA}}{P_{TOTAL} - I_a} = \frac{P_{TOTAL} - F_a - I_a}{P_{TOTAL} - I_a}$$

$$F_a(P_{TOTAL} - I_a) = S(P_{TOTAL} - F_a - I_a)$$

$$F_a(P_{TOTAL} - I_a) = S(P_{TOTAL} - I_a) - S \cdot F_a$$

$$F_a(P_{TOTAL} - I_a + S) = S(P_{TOTAL} - I_a)$$

$$F_a = S \frac{P_{TOTAL} - I_a}{P_{TOTAL} - I_a + S} \quad (3-9)$$

4) Cálculo de la precipitación efectiva acumulada en cada bloque como:

$$P_{EFECTIVA} = P_{TOTAL} - I_a - F_a \quad (3-10)$$

5) Cálculo de la precipitación efectiva incremental, así como de las abstracciones (diferencia entre la precipitación total y efectiva en cada bloque).

En la Figura 3-5 se puede observar el esquema del planteamiento del modelo de pérdidas de precipitación.

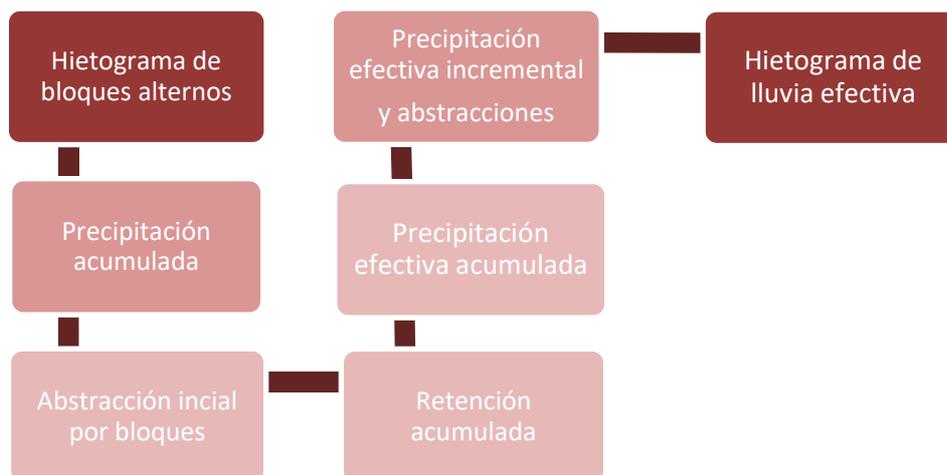


Figura 3-5. Esquema del modelo de pérdidas de precipitación.

3.1.3 Caracterización de la escorrentía

La metodología seguida para el cálculo del número de curva está basada en la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales permiten trabajar con datos de muy diversa índole que se den en una misma localización geográfica. La generación de mapas a escala regional del número de curva se realiza mediante la aplicación de tablas de reclasificación y operaciones de superposición de las distintas capas de información de las que depende.

La escorrentía se caracteriza, generalmente, a partir del umbral de escorrentía o a partir del número de curva, parámetros que se relacionan según las siguientes expresiones:

$$P_0 = \frac{5000}{CN} - 50 \rightarrow CN = \frac{5000}{P_0 + 50} \quad (3-11)$$

La metodología seguida para obtener el valor medio en cada una de las cuencas del estudio consiste en:

- 1) Recorte de la capa ráster completa dentro de los límites de la cuenca hidrográfica que drena a través de la zona de estudio.

- 2) Tratamiento estadístico del recorte resultante para la obtención de un valor medio en toda la superficie de la cuenca.

En la Figura 3-6 se muestra la metodología seguida para obtener el valor medio del número de curva para caracterizar la escorrentía según la capa de entrada de las distintas coberturas a emplear.

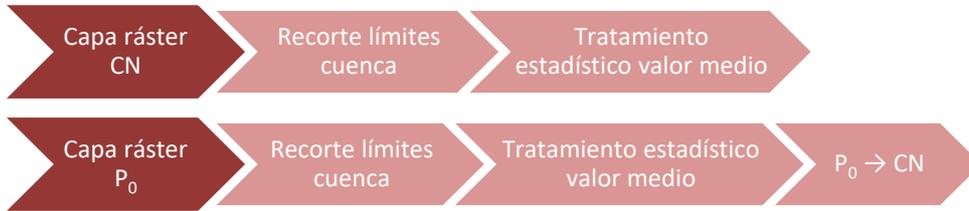


Figura 3-6. Esquema de caracterización de escorrentía.

3.1.4 Cálculo de caudales e hidrogramas

La precipitación efectiva calculada anteriormente dará lugar a un caudal de escorrentía que se corresponderá con la salida de la cuenca. Para el cálculo de caudales, se siguen los siguientes criterios, cuyo esquema de elección se muestra en la Figura 3-7:

- Si el tiempo de concentración (T_c) es menor a 6 horas, el método empleado para el cálculo del caudal es el Método Racional o el Método Racional Modificado, donde la precipitación es constante en el espacio y en el tiempo.
- Si el tiempo de concentración (T_c) se encuentra entre 6 y 24 horas, se utiliza para el cálculo del caudal el Método Racional Modificado o el Método del Hidrograma Unitario, dando mayor o menor peso a cada método según se obtenga un valor más cercano a las 6 horas. En este caso, la precipitación es constante en el espacio y variable en el tiempo.
- Si el tiempo de concentración es mayor a 24 horas, el método a utilizar es el Método del Hidrograma Unitario o el Método de Circulación del Hidrograma Unitario, dando mayor o menor peso a cada método según se obtenga un valor más cercano a las 24 horas. En este caso la precipitación es variable en el espacio y en el tiempo:

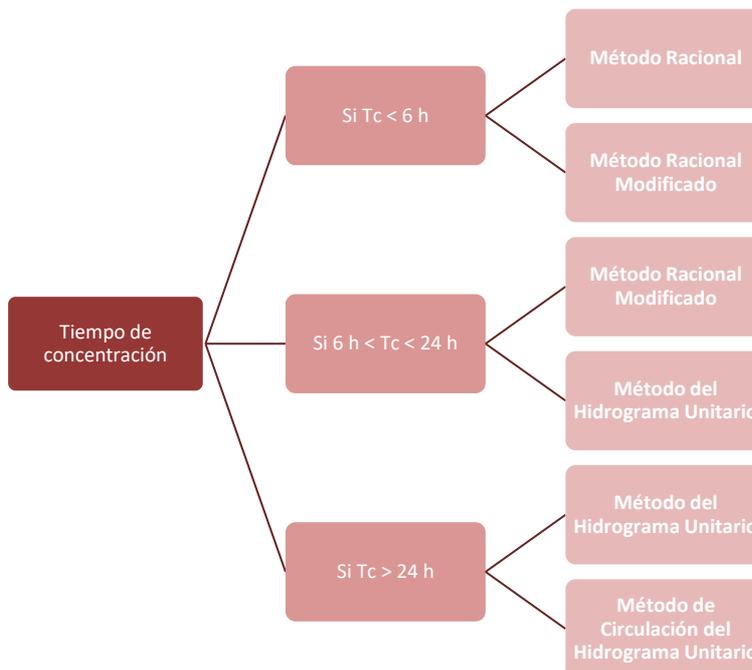


Figura 3-7. Esquema de elección del método de cálculo de caudales según el tiempo de concentración.

En este apartado se muestra el cálculo realizado a tal efecto, exponiendo en primer lugar el método racional para el cálculo del caudal punta, en segundo lugar, el modelo de hidrograma unitario considerado y, por último, el hidrograma de salida de la cuenca.

3.1.4.1 Método Racional Modificado

El método racional mejorado y generalizado por J.R. Témez Peláez (1982) fue elaborado para la Dirección General de Carreteras de España.

La fórmula considerada es la siguiente:

$$Q = \frac{C \times I \times A}{3,6} \times K \quad (3-12)$$

donde:

- Q (m³/s): Caudal punta en el punto de desagüe correspondiente a un periodo de retorno dado.
- C: Coeficiente de escorrentía de la cuenca drenada.
- I (mm/h): Intensidad media de precipitación correspondiente al periodo de retorno considerado y a un intervalo igual al tiempo de concentración.
- A (km²): Superficie de la cuenca.
- K: Coeficiente de uniformidad.

El coeficiente de escorrentía se calcula de acuerdo con la fórmula que se indica en el método hidrometeorológico propuesto por la Instrucción 5.2-IC:

$$C = \frac{(P_d - P_0) \cdot (P_d + 23P_0)}{(P_d + 11P_0)^2} \quad (3-13)$$

Dónde P_d es la máxima precipitación total diaria para el periodo de retorno considerado y P₀ es el umbral de escorrentía correspondiente a las características de las cuencas.

Para el estudio del valor del umbral de escorrentía se toma un coeficiente corrector de 1 para estar del lado de la seguridad, ya que de esta forma se obtienen caudales más conservadores.

El tiempo de concentración se define como el necesario para que las precipitaciones caídas en las zonas más alejadas de la cuenca puedan llegar al punto de desagüe. Este tiempo es independiente de la configuración y magnitudes del aguacero, dependiendo sólo de las características morfológicas de la cuenca. Para estimarlo se emplean las siguientes fórmulas obtenidas de la Guía Técnica *Recomanacions tècniques per als estudis d'inundabilitat d'àmbit local* (Març 2003), de la Agència Catalana de l'Aigua.

- **Cuencas rurales**, con un grado de urbanización no superior al 4% del área de la cuenca:

$$T_c = 0,3 \left(\frac{L}{J^{0,25}} \right)^{0,76} \quad (3-14)$$

- **Cuencas urbanizadas**, con un grado de urbanización superior al 4% del área de la cuenca y con urbanizaciones independientes que tengan un alcantarillado de pluviales no unificado o completo. Curso principal no revertido de material impermeable y de escasa rugosidad como el hormigón:

$$T_c = \frac{1}{1 + \sqrt{\mu(2 - \mu)}} 0,3 \left(\frac{L}{J^{0,25}} \right)^{0,76} \quad (3-15)$$

- **Cuencas urbanas**, con un grado de urbanización superior al 4% del área de la cuenca, con alcantarillado

completo y/o curso principal canalizado, impermeable y de escasa rugosidad:

$$T_c = \frac{1}{1 + 3\sqrt{\mu(2 - \mu)}} 0,3 \left(\frac{L}{J^{0,25}} \right)^{0,76} \quad (3-16)$$

donde:

- T_c : Tiempo de concentración expresado en horas.
- L : Longitud del curso principal expresado en km.
- J : Pendiente media del curso principal expresado en tanto por uno, m/m.
- μ : Grado de urbanización de la cuenca expresado en tanto por uno, km²/km².

La intensidad de precipitación se obtiene a partir de la **curva Intensidad-Duración-Frecuencia de Témez**, cuya expresión es la siguiente:

$$I_t = I_{24} \left(\frac{I_1}{I_{24}} \right)^{\frac{28^{0,1} - t^{0,1}}{28^{0,1} - 1^{0,1}}} \quad (3-17)$$

Dónde:

- I_t es la intensidad media máxima asociada a la tormenta, en mm/h.
- t es la duración de la lluvia, en horas, que en este caso se considera igual al tiempo de concentración.
- I_{24} es la intensidad media diaria en mm/h, calculada como:

$$I_{24} = \frac{P_{24}}{24} = \frac{P_{DC}}{24} \quad (3-18)$$

- I_1/I_{24} es el factor de torrencialidad mostrado en el mapa de la Figura 3-3

Es un factor corrector del supuesto reparto uniforme de la escorrentía dentro del intervalo del cálculo de duración T_c .

El coeficiente de uniformidad varía de un aguacero a otro, pero su valor medio en una cuenca concreta depende principalmente del valor de su tiempo de concentración. Según los trabajos realizados por J.R. Témez (1982), promovidos por la Dirección General de Carreteras, y expuestos en el XXIV Congreso Internacional de la IAHR, el valor de K puede estimarse de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$K = 1 + \frac{T_c^{1,25}}{T_c^{1,25} + 14} \quad (3-19)$$

3.1.4.2 Método del Hidrograma Unitario

La precipitación efectiva calculada anteriormente dará lugar a un caudal de escorrentía que se corresponderá con la salida de la cuenca. En este apartado se muestra el cálculo realizado a tal efecto, exponiendo en primer lugar el modelo de hidrograma unitario considerado y posteriormente el hidrograma de salida de la cuenca.

El hidrograma unitario representa la escorrentía directa causada por una lluvia efectiva de valor unitario de intensidad constante a lo largo de la duración de la lluvia y distribuida uniformemente sobre la cuenca. Suponiendo una respuesta lineal de la cuenca, se pueden aplicar los principios de proporcionalidad y superposición para obtener el hidrograma debido a una precipitación mayor.

Se tiene en consideración el hidrograma unitario del SCS (definido para una lluvia efectiva de 1 cm), en el que

los parámetros que lo definen son los siguientes:

- Relación entre el caudal punta (Q_P) y el tiempo a la punta (T_P), la cual viene dada por la siguientes expresión:

$$Q_P = C \cdot \frac{A}{T_P} \quad (3-20)$$

Dónde C es un parámetro de conversión de unidades (2,08 para unidades en el sistema internacional), y A es el área de la cuenca en km^2 . Introduciendo el tiempo a la punta T_P en horas, se obtiene el caudal punta Q_P en m^3/s .

- Tiempo a la punta, T_P** , que es el tiempo en el que se produce el caudal máximo del hidrograma; su valor se puede estimar mediante la siguiente expresión:

$$T_P = \frac{\Delta t}{2} + T_{lag} \quad (3-21)$$

Dónde Δt es la duración de un bloque de lluvia (duración de un bloque del hietograma) y T_{lag} es el tiempo de retardo, calculado según la siguiente expresión (propuesta por Témez para cuencas españolas):

$$T_{lag} = 0,35 \cdot T_c \quad (3-22)$$

Dónde T_c es el tiempo de concentración de la cuenca, calculado de la siguiente forma (dónde L es la longitud del cauce principal en km, y J es la pendiente del cauce principal en tanto por uno):

$$T_c = 0,3 \cdot \left(\frac{L}{j^{0,25}} \right)^{0,76} \quad (3-23)$$

Así, conocidos los parámetros característicos del hidrograma (caudal punta Q_P y tiempo a la punta T_P), es posible obtener el hidrograma unitario multiplicando por el hidrograma unitario adimensional que se define en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1. Valores del hidrograma unitario adimensional del SCS.

t/T_P	Q/Q_P
0,0	0,000
0,1	0,030
0,2	0,100
0,3	0,190
0,4	0,310
0,5	0,470
0,6	0,660
0,7	0,820

t/T_P	Q/Q_P
0,8	0,930
0,9	0,990
1,0	1,000
1,1	0,990
1,2	0,930
1,3	0,860
1,4	0,780
1,5	0,680
1,6	0,560
1,7	0,460
1,8	0,390
1,9	0,330
2,0	0,280
2,2	0,207
2,4	0,147
2,6	0,107
2,8	0,077
3,0	0,055
3,2	0,040
3,4	0,029
3,6	0,021
3,8	0,015
4,0	0,011
4,5	0,005
5,0	0,000

3.2 Cálculos hidráulicos

Los cálculos hidráulicos se realizan mediante **HEC-RAS 2D® (versión 5.0.7)**, del inglés *Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*. Este modelo matemático es una versión actualizada del modelo HEC-2, “*Water Surface Profiles*”, desarrollado en el “*Hydrologic Engineering Center*” del “*U.S. Army Corps of Engineers*”. Se desarrolla un modelo bidimensional de toda la zona de cálculo, utilizando como datos de entrada los hidrogramas de caudales anteriormente expuestos.

Se han de realizar las siguientes simulaciones hidráulicas correspondientes a los escenarios de rotura propuestos en la Guía para Clasificación de Presas vigente:

- **Escenario sin avenida:** rotura de la presa en ausencia de avenida y con el embalse situado en su NMN.
- **Escenario límite:** embalse en su NMN y desagüe de un hidrograma que pueda llenarlo hasta la coronación de la presa, manteniendo ésta todos sus elementos de desagüe abiertos, produciéndose a continuación la rotura de la presa.
- **Escenario de avenida en régimen natural:** entrada de hidrograma empleado en el escenario límite, sin tener en cuenta la existencia de la presa y, por tanto, su efecto laminador.

A lo largo del presente apartado se detallan los diferentes aspectos de los modelos desarrollados (escenarios de rotura, parámetros, tipos de modelización realizados, condiciones, etc.). El esquema del proceso de elaboración de los cálculos hidráulicos es el mostrado en la Figura 3-8.

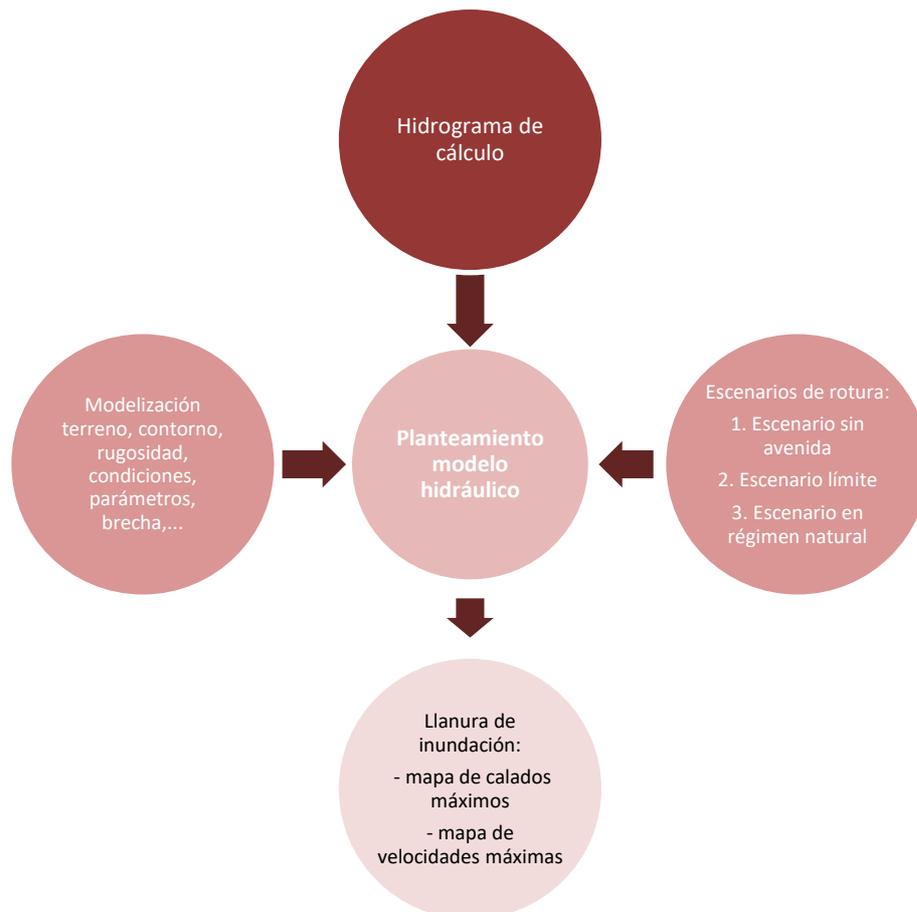


Figura 3-8. Esquema del proceso de cálculo hidráulico.

3.2.1 Software: HEC-RAS 2D

Las capacidades en las que se basa el flujo bidimensional en HEC-RAS han sido desarrolladas para permitir trabajar de manera combinada en modelizaciones 1D/2D. El algoritmo de modelización de flujo 2D presenta las siguientes características:

- **Puede efectuar simulaciones 1D, 2D y combinaciones de ambas.** HEC-RAS puede realizar simulaciones unidimensionales, bidimensionales y combinar ambas posibilidades. Poder efectuar modelizaciones combinadas en el mismo modelo en régimen no permanente facilita el trabajo en ríos de cierta longitud usando la modelización 1D y modelizar en 2D las zonas que requieran una mayor precisión en la computación hidrodinámica.
- **Resolución en 2D por ecuaciones completas de Saint Venant o por onda difusiva.** El programa resuelve en 2D indistintamente a través de las ecuaciones completas de Saint Venant o mediante las de onda difusiva. En general las ecuaciones de la onda difusiva computan más rápidamente y presentan mayor estabilidad. Las ecuaciones completas de Saint Venant pueden aplicarse a una gama más amplia de situaciones, requiriendo un mayor esfuerzo computacional.
- **Solución de algoritmo implícito de volúmenes finitos.** Para la solución de las ecuaciones de flujo 2D no permanente el programa usa un algoritmo implícito de volúmenes finitos que permite mayores intervalos computacionales que los métodos explícitos, y ofrece mayor estabilidad respecto de otros más tradicionales como, por ejemplo, el de elementos finitos, consiguiendo que la determinación de mojado o secado de un elemento 2D sea muy fiable. De este modo, las zonas de flujo 2D pueden iniciarse completamente secas y resolver una situación de crecida, ya sea mediante régimen subcrítico, supercrítico o mixto.
- **Resolución sincronizada 1D y 2D del algoritmo.** En la computación paso a paso la resolución de los algoritmos 1D y 2D se encuentran íntimamente conectados, con la opción de iteración de transferencia de flujo 1D a 2D en un mismo paso computacional, de manera que siempre existe una sincronización y correlación directa entre elementos 1D y 2D en cada paso de cálculo.
- **Mallas estructuradas y no estructuradas.** El software está diseñado para resolver tanto mallas estructuradas como no estructuradas, ya que su tratamiento es idéntico, pero la eficiencia es mayor si las celdas son ortogonales entre sí. Las celdas pueden ser triangulares, cuadradas, rectangulares o poligonales hasta un máximo de 8 lados. Estas mallas están perimetralmente delimitadas por un polígono en cuyo interior se distribuyen celdas de diferente tamaño y forma.
- **Clasificación de características hidráulicas detalladas para celdas y sus aristas.** Las celdas no tienen por qué conformar una superficie plana, ni sus aristas ni bordes tiene por qué ser líneas rectas con una sola cota o elevación. Al contrario, cada celda y aristas se amoldan al terreno que yace bajo ella. A este tipo de modelos se les suele referir en la literatura como “modelos de subentramado de alta resolución”. El término subentramado significa que se usa una información detallada subyacente o de “fondo” del terreno para establecer mediante un pre-proceso unas tablas de propiedades geométricas e hidráulicas que caractericen las celdas y sus aristas basándose en el terreno. El pre-proceso de la zona 2D genera una relación elevación-volumen en cada celda basada en los datos de detalle del MDE. Por consiguiente, una celda puede estar parcialmente mojada según sea el volumen de agua para una elevación de superficie de agua determinada basado en la parrilla o entramado de 0,5 m. Complementariamente, cada arista de celda funciona como una sección transversal y se clasifica según sus propias características hidráulicas (rugosidad, área, perímetro mojado, etc.). El flujo a través de una arista (y en consecuencia entre dos celdas) se basa en estos datos de detalles. Esto permite modelizar con celdas de gran tamaño sin perder demasiada información de detalle sobre el terreno subyacente y que rige el movimiento del flujo. Adicionalmente, la ubicación de aristas a lo largo de la parte superior de elementos de control de terreno (carreteras, terraplenes, muros, etc.) mejoran considerablemente los cálculos hidráulicos usando pocas celdas.

Cada arista es una sección transversal de detalle del terreno subyacente. Este proceso permite al flujo moverse entre celdas a partir de los datos del terreno según se representan por las aristas y el volumen que queda contenido en cada celda. Por consiguiente, un pequeño canal que atraviesa una celda sigue representándose por la relación elevación-volumen de la misma y las características hidráulicas de las aristas. Así, el agua puede fluir a través de celdas de gran tamaño, pero seguir siendo representada con sus características habituales de canal. En la Figura 3-9 se muestra un ejemplo en el que aparecen canales de menos de 30 m de ancho en una malla con 150 m de lado.

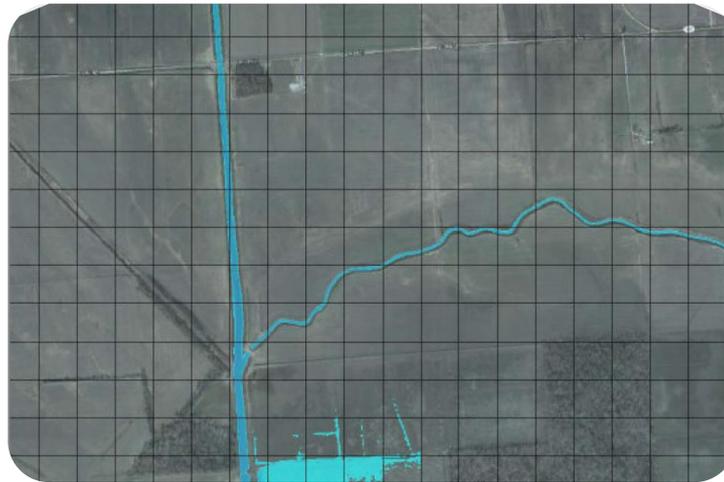


Figura 3-9. Ejemplo de flujo en canales pequeños circulando por celdas de gran tamaño.

3.2.2 Definición del límite aguas abajo del estudio

El límite aguas abajo del tramo de cauce a estudiar debe establecerse tal que los elementos susceptibles de ser dañados aguas abajo de dicho límite no induzcan una elevación de categoría. Entre las situaciones que pueden darse para acotar el límite de estudio se encuentran las siguientes:

- Elemento afectado que conduce a la clasificación en la categoría A.
- Desembocadura del cauce al mar.
- Entrada en un embalse capaz de laminar la onda de rotura hasta alcanzar un caudal máximo inferior a la capacidad del cauce aguas abajo.
- Alcanzar un caudal máximo inferior a la capacidad del cauce, sin producir inundaciones ni en las márgenes ni aguas abajo.
- No ocupación aguas abajo del punto por viviendas, servicios, bienes económicos o elementos con algún tipo de protección medioambiental o cultural.

3.2.3 Escenarios de rotura

La metodología para establecer la clasificación de la presa se basa en el análisis de los efectos producidos aguas abajo de la presa en dos escenarios extremos:

1. Escenario sin avenida: rotura de la presa en ausencia de avenida y con el embalse situado en su NMN. Siendo el NMN el máximo nivel de retención de agua que se alcanza en el embalse cuando todos los elementos mecánicos de los órganos de desagüe se encuentran cerrados.
2. Escenario límite: embalse en su NMN y desagüe de un hidrograma que pueda llenarlo hasta la coronación de la presa, manteniendo ésta todos sus elementos de desagüe abiertos, produciéndose a continuación la rotura de la presa.

Adicionalmente, se estudia la situación de avenida en régimen natural, en el que se considera el mismo hidrograma que el empleado en el escenario límite, aunque sin tener en cuenta la existencia de la presa y, por tanto, su efecto laminador.

Según la metodología general, el proceso de clasificación de la presa sigue el esquema de análisis de los escenarios estudiados mostrado en la Figura 3-10.

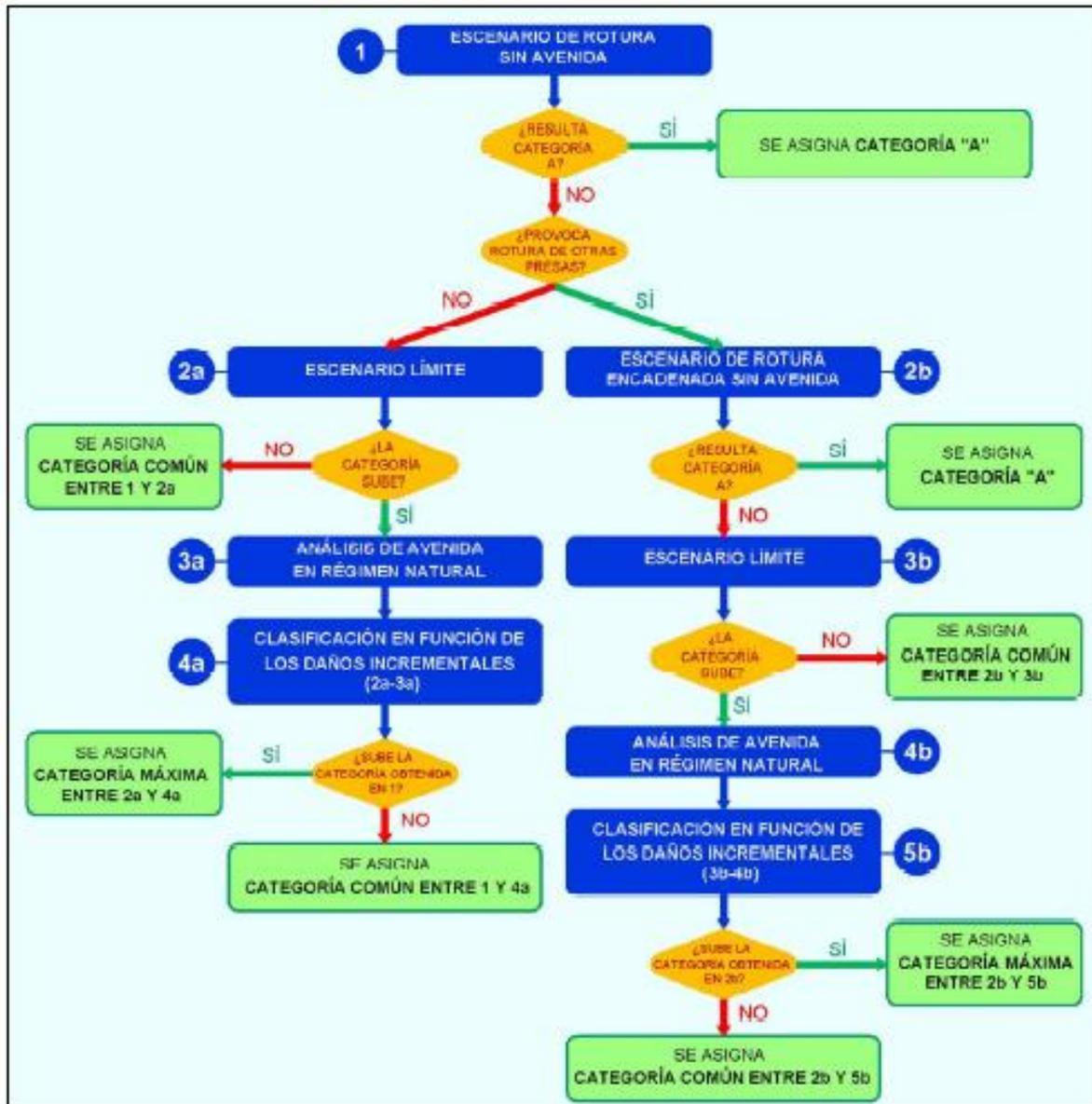


Figura 3-10. Proceso de clasificación según la Guía Técnica.

El proceso se inicia con el análisis del escenario sin avenida. Si en este escenario la categoría en la que queda clasificada la presa es la A, ésta será la categoría asignada. Si, por contra, resulta una clasificación inferior, deberá comprobarse a continuación si la rotura de la presa objeto de estudio provoca la rotura encadenada (efecto dominó) de otras presas situadas aguas abajo.

De no ser así, el proceso continuará con el análisis límite, comparando la clasificación que se deriva con la correspondiente al escenario sin avenida. Si en las dos situaciones la categoría es la misma (B o C), se asignará a la presa la categoría común. En caso contrario es preciso analizar la situación en el supuesto de avenida en régimen natural. Por comparación entre las situaciones de escenario límite y avenida en régimen natural, se pueden evaluar los efectos incrementales de la rotura y, por tanto, clasificar la presa.

A efectos de la evaluación de los daños a considerar, se tendrán únicamente en cuenta los incrementales, entendidos éstos como el incremento entre los que se producirían por efecto de la onda de rotura y los que se habrían producido sin la existencia de la presa.

La clasificación final de la presa corresponderá a la mayor entre la asignada en el escenario sin avenida y la correspondiente a los efectos incrementales del escenario límite respecto al supuesto de avenida en régimen natural.

3.2.4 Modelización del terreno

Para la modelización del terreno se toma el Modelo Digital del Terreno (MDT) del vuelo LiDAR, proporcionado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Dicho modelo, obtenido a partir de una nube de puntos con densidad de 0,5 puntos por metro cuadrado, debe ser completado con información adicional para representar el vaciado del embalse que no queda recogido en el LiDAR.

3.2.5 Modelización del embalse

El vaso del embalse creado por la presa se introduce en la malla de cálculo del modelo hidráulico para poder simular el vaciado del mismo como consecuencia de la rotura de la presa.

En general, esta modelización del vaso del embalse se realiza a partir de la información de la cartografía de detalle disponible en el proyecto de construcción, por levantamientos topográficos del embalse o información adicional tomada en campo en las visitas realizadas a la presa.

En caso de no disponer de esta información, la Guía recomienda proceder de dos formas para poder caracterizar geoméricamente el vaso del embalse:

- Mediante los datos de Modelos Digitales de Elevaciones (MDE), aunque en el caso de presas de recién construcción, los datos altimétricos sólo estarán disponibles en la parte del embalse situada por encima del espejo de agua el día en que se realizara el vuelo LiDAR.
- Se adoptará una hipótesis simplificada para obtener el volumen del embalse por debajo de la cota del espejo de agua, con apoyo de cartografía y ortofotos históricas en las que se muestre el embalse con niveles de agua diferentes de manera que se establezcan curvas de nivel a partir de las cuales se generará un modelo digital del terreno y el vaso sumergido.

3.2.6 Modelización de la rugosidad

Las pérdidas por rozamiento se calculan a través de la ecuación de Manning. Al tratarse de un modelo bidimensional, el propio modelo tiene en cuenta factores como la sinuosidad y la irregularidad en las secciones. La determinación de la rugosidad del terreno se ha realizado en base a los usos del suelo recogidos en el Sistema de Información de Ocupación del Suelo de España (SIOSE- 2013) llevado a cabo por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). De esta forma, se ha obtenido la cobertura de usos del suelo dentro del dominio de cálculo.

Los valores de los coeficientes de rugosidad de Manning aplicados se han obtenido de la tabla expuesta en la Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables del Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. En el *Apéndice N°2* se detalla el procedimiento seguido para su obtención. Modelización de las infraestructuras hidráulicas

3.2.7 Condiciones del modelo

Las condiciones de un modelo se corresponden con los valores iniciales en el dominio y en los contornos del mismo. A tal efecto, se distingue entre condiciones iniciales, como es el calado inicial en el dominio de cálculo, y condiciones de contorno e internas, como es la zona de entrada del flujo (y los valores de este en función del tiempo) y la zona de salida del flujo del modelo.

3.2.7.1 Condiciones iniciales

Se introduce como condición inicial un calado nulo en todo el dominio de cálculo. También como condición inicial en el embalse, se establece una cota de llenado correspondiente al Nivel Máximo Normal. Esta condición se mantiene en los escenarios de rotura y límite, en este último se alcanza el nivel de coronación gracias a la entrada de la avenida mediante hidrograma.

3.2.7.2 Condiciones de contorno e internas

La definición de las condiciones de contorno del modelo pasa por el establecimiento de las zonas de entrada de flujo al dominio de cálculo (y el correspondiente valor del mismo) y las zonas de salida del flujo.

Las condiciones de contorno de entrada al modelo se corresponden con el hidrograma de avenida obtenido, colocado en el caso del escenario límite en la cola del embalse, y en el caso de la avenida en régimen natural en el contorno a pie de presa para no tener en cuenta la zona de flujo de esta.

Se introduce como condición de salida en la zona baja del modelo la opción de calado normal o de flujo permanente, colocándose en el contorno aguas abajo, en el límite de estudio planteado.

3.2.8 Parámetros de la simulación

Los parámetros de la simulación serán diferentes según el caso de estudio. En general estos parámetros son los mostrados en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Parámetros generales de la simulación.

PARÁMETRO	VALOR
Número de procesadores	Todos los disponibles
Ecuaciones	Saint-Venant
Máximas iteraciones	En función de la geometría del modelo
Tolerancia de la superficie libre (m)	En función de la geometría del modelo
Tolerancia en volumen (m)	En función de la geometría del modelo
Factor θ	1,00

La **mall**a de cálculo utilizada tiene una resolución general de celdas cuadradas del tamaño más apropiado según el caso de estudio, ajustadas en los contornos hasta celdas irregulares de 8 lados. Ésta malla generada a partir del MDT debe tener una resolución coherente con la del modelo digital del terreno, al menos de ese mismo orden de magnitud, con la intención de no perder definición en el relieve del terreno durante la modelización, teniendo en cuenta el tamaño total del modelo de manera que no suponga un excesivo tiempo computacional debido a una alta resolución innecesaria de la misma.

De forma complementaria, se lleva a cabo un **refinado de la malla** en las zonas correspondientes cauces, acequias, carreteras, etc., donde se utiliza un tamaño de celda menor al de la malla general con vistas a la mejora de la precisión del cálculo y orientación de las celdas de la malla de manera perpendicular al flujo.

El tamaño de celda y el tiempo de cálculo utilizados deben ser consistentes, de tal modo que se satisfaga la condición de Courant en los términos necesarios para que el cálculo sea estable y preciso. Para el caso del presente estudio, en el que se emplean las ecuaciones completas de Saint-Venant, se debe cumplir lo siguiente:

$$C = \frac{\Delta t \cdot v}{\Delta x} \approx 1 \quad (3-24)$$

dónde:

- C: Número de Courant.
- Δt : Paso temporal de cálculo, en segundos.

- Δx : Tamaño medio de malla, en metros.
- v : velocidad de onda de avenida, en m/s.

El software HEC-RAS permite que el paso de tiempo se ajuste en cada iteración para satisfacer la condición de Courant impuesta. De este modo, se puede imponer una condición de Courant conservadora que permite un cálculo estable, pero con menor coste computacional que un cálculo con paso de tiempo fijo.

3.2.9 Forma y dimensiones de la brecha

Se distinguen dos tipos de presas para el cálculo de la forma y dimensiones de la brecha: presas de fábrica y presas de materiales sueltos.

En presas de fábrica, a su vez, se distingue entre presas arco y bóveda, y presas de gravedad y contrafuertes. En presas de fábrica, la rotura es completa, siguiendo la forma de la cerrada, admitiéndose la geometría trapecial, mientras que en las presas de gravedad y contrafuertes la forma de la brecha es rectangular o trapecial dependiendo de la forma de la cerrada, siendo las características de esta las que se muestran a continuación:

- Profundidad de la brecha hasta el contorno con el cauce en el pie.
- Ancho el mayor de los dos valores siguientes: 1/3 de la longitud de coronación o 3 bloques de construcción.

En presas de fábrica de mampostería se considerará que el ancho de la brecha puede abarcar toda la cerrada, admitiéndose en ese caso geometría trapecial.

En presas de materiales sueltos la rotura es progresiva en el tiempo, pudiendo ser parcial o total dependiendo del volumen del embalse y de la zonificación del cuerpo de presa.

La forma de la brecha es trapecial, considerando generalmente que los taludes laterales de la brecha son 1H/1V.

La profundidad de la brecha se desarrolla hasta el contacto con el cauce y el ancho medio en metros, b , puede determinarse mediante las siguientes fórmulas:

- Guía Técnica para la Clasificación, 1996:

$$b = 20(VH)^{0,25} \quad (3-25)$$

Siendo V el volumen del embalse (en hm^3) y H la altura de presa sobre el cauce (en m). A efectos de aplicación de esta fórmula, se considerará que V es el volumen de agua almacenado en el embalse en el momento de la rotura.

- Froehlich, 2008:

$$b = 22,46K_0V_W^{0,32}H_b^{0,04} \quad (3-26)$$

Donde K_0 es un coeficiente que depende de la causa que origina la rotura de la presa:

1,3 para roturas por sobreevertido

1 para el resto de las roturas

La Guía establece que en la aplicación de esta fórmula se utilizará $K_0=1$ para el análisis del escenario sin avenida y $K_0=1,3$ para el escenario límite y en el análisis de la rotura encadenada de presas de materiales sueltos situadas aguas debajo de la presa de estudio.

V_W es el volumen de agua almacenado en el embalse en el momento de la rotura (en hm^3) y H_b la altura de la brecha (en m), considerando que la altura de la brecha es igual a la altura de la presa sobre el cauce ($H_b=H$).

- Según Xu & Zhang (2009):

$$b = H_b \left[0,787 \left(\frac{H}{15} \right)^{0,133} \left(\frac{V_{W*}^{1/3}}{H_W} \right)^{0,652} e^B \right] \quad (3-27)$$

Donde H_b es la altura de la brecha (en m) y H es la altura de la presa sobre el cauce (en m), considerando ambas iguales a efectos de la aplicación de esta formulación.

V_{W*} es el volumen de agua almacenado en el embalse en el momento de la rotura (en m^3), H_W es la altura de la lámina de agua hasta el fondo de la brecha en el momento de inicio de la misma (en m) y B es un coeficiente que se puede estimar mediante la siguiente expresión:

$$B = B_T + B_F + B_E \quad (3-28)$$

B_T es un coeficiente que depende del tipo de presa:

$B_T = -0,041$ para presas de núcleo impermeable.

$B_T = 0,026$ para presas de pantalla.

$B_T = -0,226$ para presas homogéneas.

B_C es un coeficiente que depende de la causa que origina la rotura de la presa:

$B_C = 0,149$ para roturas por sobrevvertido.

$B_C = -0,389$ para roturas por erosión interna o sifonamiento.

B_E es un coeficiente que depende de la erodibilidad:

$B_E = 0,291$ para presas de erodibilidad alta.

$B_E = -0,140$ para presas de erodibilidad media.

$B_E = -0,391$ para presas de erodibilidad baja.

3.2.10 Tiempo de rotura

A efectos de la clasificación, se define el tiempo de rotura de la presa como el tiempo de desarrollo de la brecha, es decir, el tiempo en horas que transcurre desde que se ha iniciado la brecha hasta que ésta llega a su sección final.

En este caso también ha de distinguirse entre presas de fábrica y presas de materiales sueltos.

En el caso de presas de fábrica, se distingue entre presas de fábrica, cuyo tiempo de rotura estará comprendido entre 5 y 10 minutos, y presas de gravedad y contrafuertes, cuyo tiempo de rotura está comprendido entre 10 y 15 minutos.

En presas de materiales sueltos, el tiempo de rotura en horas puede determinarse mediante las siguientes fórmulas:

- Guía Técnica para Clasificación, 1996:

$$T = 4,8 \frac{\sqrt{V}}{H} \quad (3-29)$$

Siendo H la altura de presa sobre el cauce (en m) y V el volumen de embalse (en hm^3), considerando que éste es el volumen de agua almacenado en el embalse en el momento de la rotura.

- Froehlich, 2008:

$$T = 5,62 \frac{\sqrt{V_W}}{H_b} \quad (3-30)$$

Donde V_W es el volumen de agua almacenado en el embalse en el momento de la rotura (en m) y $H_b=H$ la altura de la brecha (en m), considerando que la altura de la brecha es igual a la altura de la presa sobre el cauce ($H_b=H$).

3.3 Proceso de clasificación

De acuerdo con el Artículo 358 del Reglamento de Dominio Público Hidráulico, las presas se clasifican en función de sus dimensiones y en función del riesgo potencial que pueda derivarse de su posible rotura o funcionamiento incorrecto.

3.3.1 Clasificación en función de las dimensiones

En función de sus dimensiones, las presas se clasifican como:

- Gran presa: presas cuya altura sea superior a 15 m o las que, teniendo una altura comprendida entre 10 y 15 m, tengan una capacidad de embalse superior a 1 hm³.
- Pequeña presa: aquellas que no cumplen las condiciones de gran presa.

La altura y capacidad de embalse se determinan de acuerdo con las siguientes definiciones:

- Altura de presa: diferencia de cota entre el punto más bajo de la cimentación y el punto más alto de la estructura resistente, sin tener en cuenta los rastrillos, pantallas de impermeabilización, rellenos de grietas u otros elementos semejantes.

En diques de collado, la altura se determinará de igual manera que las presas.

- Capacidad de embalse: volumen de agua que puede almacenarse entre la cota del cauce y la cota de Nivel Máximo Normal (NMN), siendo el NMN el máximo nivel de retención de agua que se alcanza en el embalse cuando todos los elementos mecánicos de los órganos de desagüe se encuentran cerrados.

En diques de collado, la capacidad de embalse se determinará como el volumen que puede almacenarse entre la cota del terreno en el punto más bajo del collado y la cota del NMN.

3.3.2 Clasificación en función del riesgo potencial

Los criterios para la clasificación en función del riesgo potencial en caso de rotura o funcionamiento incorrecto se establecen en el Apartado 4 de la NTS1.

La determinación de la categoría en función del riesgo potencial se basa en una evaluación de los daños potenciales que podrían producirse en caso de rotura o funcionamiento incorrecto de la presa, no en una evaluación del riesgo en sí, debido a que el concepto de riesgo lleva asociado la probabilidad de que un determinado suceso se produzca además de los daños que este suceso ocasiona.

La estimación de los daños se realiza únicamente para situaciones de rotura de la presa y no para el caso de funcionamiento incorrecto de éstas.

Se examinan posibles afecciones a:

- Núcleos de población o viviendas aisladas.
- Servicios esenciales.
- Daños materiales.

- Aspectos medioambientales, histórico-artísticos o culturales.

Es recomendable seguir las evaluaciones en el orden planteado en la lista de posibles afecciones anterior.

Se evalúan los daños potenciales para cada uno de estos grupos, correspondiendo la categoría de la presa a la categoría máxima asignada a cada uno de los aspectos individuales, sin estudiar posibles combinaciones de ellos.

El proceso general de valoración de las afecciones se realiza en dos etapas:

- Etapa 1: se analiza si se produce o no afección. Se considera que los elementos están afectados si se produce “afección grave” de los mismos, según los umbrales de calado y velocidad marcados para cada grupo analizado, de manera que si se superan estos umbrales se clasifica como “afección grave” y en caso contrario como “afección no grave”.
- Etapa 2: se estudian, uno a uno, todos los elementos en los que se haya determinado que se produce “afección grave”, con el objetivo de establecer en qué categoría procede clasificar la presa en función del número, extensión o catalogación de los mismos.

Estos umbrales se detallan a continuación para cada uno de los cuatro grupos indicados.

3.3.2.1 Afección a núcleos de población o viviendas aisladas

Se asignará la categoría A cuando se produzca “afección grave” a más de cinco viviendas y la categoría B cuando se produzca “afección grave” a un número comprendido entre una y cinco viviendas.

Se considera como “afección grave” a una vivienda aquella que represente riesgo para las vidas de sus habitantes. La asignación del calificativo “grave” se efectuará en función del calado y la velocidad de la onda de rotura en el punto de afección, de acuerdo a los criterios recogidos en la Figura 3-11.

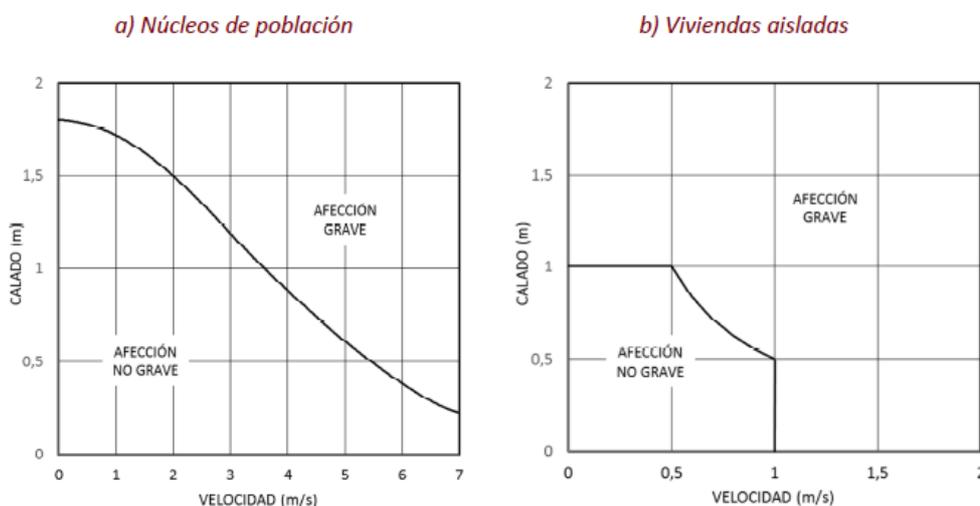


Figura 3-11. Evaluación de la gravedad de las afecciones en núcleos de población y en viviendas aisladas.

El umbral representado en la Figura 3-11, b) se corresponde al indicado en el Artículo 9.2. del RDPH, que establece: “se considerará que pueden producirse graves daños sobre las personas y los bienes cuando las condiciones hidráulicas durante la avenida satisfagan uno o más de los siguientes criterios:

- Que el calado sea superior a 1 m
- Que la velocidad será superior a 1 m/s
- Que el producto que ambas variables sea superior a $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ ”

El Instituto Nacional de Estadística (INE) considera núcleo de población a un conjunto de al menos 10 edificaciones que estén formando calles, plazas y otras vías urbanas.

Excepcionalmente, el número de edificaciones podrá ser inferior a 10 siempre que la población que habita las mismas supere los 50 habitantes. Se incluyen en el núcleo aquellas edificaciones que, estando aisladas, distan

menos de 200 m de los límites exteriores del mencionado conjunto, si bien en la determinación de dicha distancia han de excluirse los terrenos ocupados por instalaciones industriales o comerciales, parques, jardines, zonas deportivas, cementerios, aparcamientos y otros, así como los canales o ríos que puedan ser cruzados por puentes.

Para la evaluación de las afecciones ocasionadas a un núcleo de población se empleará la Figura 3-11 a), mientras que las viviendas que no formen parte de un núcleo de población se evaluarán como viviendas asiladas y se empleará la determinación de las afecciones de la Figura 3-11 b).

La categoría C se asocia al calificativo incidental, que se aplicará a la presencia ocasional, y no previsible en el tiempo, de personas en la llanura de inundación, no admitiéndose la clasificación como incidental de las potenciales pérdidas de vidas humanas a la afección a residencias establecidas permanentes, áreas de acampada estables, zonas en las que habitualmente se produzcan concentraciones de personas por cualquier motivo, etc.

3.3.2.2 Servicios esenciales

Se entienden como servicios esenciales aquéllos que son indispensables para el desarrollo de las actividades humanas y económicas de conjuntos de población mayores de 10.000 habitantes, y siempre que el servicio que brinden no pueda restablecerse de manera inmediatamente ni prestarse de forma alternativa. Entre los posibles servicios esenciales se incluyen, al menos, los siguientes:

- Abastecimiento y saneamiento
- Suministro de energía
- Sistema sanitario
- Sistemas de comunicaciones
- Infraestructuras de transporte

La “afección grave” a un servicio esencial dará lugar a la clasificación en la categoría A y se efectuará en función del calado y la velocidad de la onda de rotura en el punto de afección, de acuerdo al umbral establecido en el Artículo 9.2 del RDPH, representado en la Figura 3-12.

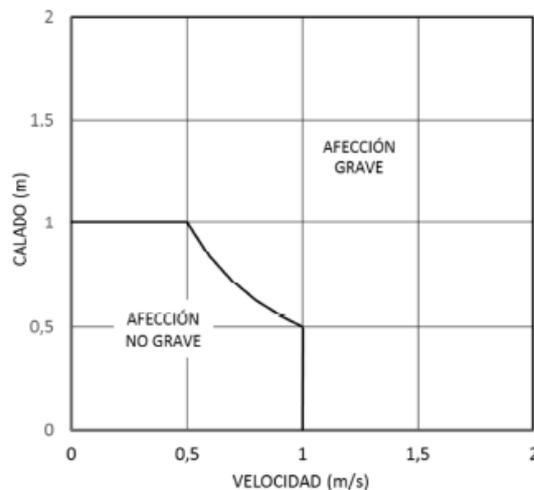


Figura 3-12. Evaluación de la gravedad de las afecciones del tipo servicios esenciales.

3.3.2.3 Daños materiales

Se entienden como daños materiales aquellos cuantificables directamente en términos económicos, sean directos, correspondientes a la destrucción de elementos, o indirectos, correspondientes a la reducción de la producción u otros.

Se evalúan en función de los siguientes grupos:

- Daños a industrias y polígonos industriales
- Daños a propiedades rústicas
- Daños a cultivos
- Daños a infraestructuras

Se considerará que se producen daños materiales si la afección al elemento se califica como “grave” en función del umbral de calado y velocidad de la onda de rotura, establecido en base al criterio del Artículo 9.2 del RDPH, representado en la Figura 3-13.

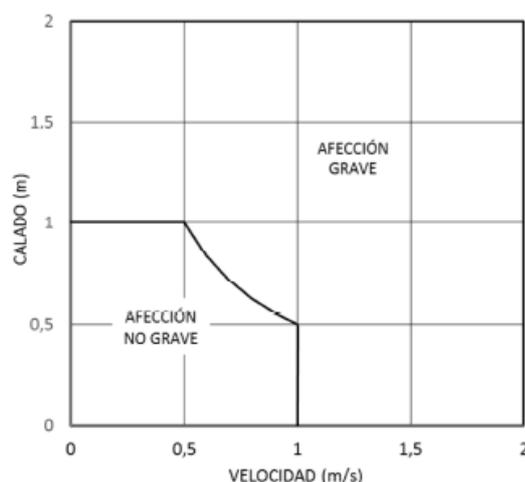


Figura 3-13. Evaluación de la gravedad de las afecciones del tipo daños materiales.

La evaluación del alcance de los daños a este tipo de elementos se efectuará analizando el número de instalaciones industriales o propiedades rústicas dañadas, la superficie de terreno de cultivo inundada y la clase de las infraestructuras afectadas.

Tendrán la clasificación de categoría A (daños muy importantes) la afección grave a más de 50 instalaciones o propiedades, a más de 5.000 ha de regadío, a más de 10.000 ha de secano, a carreteras de la Red de Carreteras del Estado, a carreteras autonómicas de primer nivel o a ferrocarriles de vía ancha o de alta velocidad.

Tendrán la clasificación de categoría B (daños importantes) la afección grave a más de 10 instalaciones o propiedades, a más de 1.000 ha de regadío, a más de 3.000 ha de secano, a carreteras autonómicas de segundo o tercer nivel o a ferrocarriles de vía estrecha.

Los daños materiales que no rebasen estos umbrales tendrán la clasificación de categoría C (daños moderados).

3.3.2.4 Aspectos medioambientales, histórico-artísticos y culturales

Se entenderán como daños medioambientales o al patrimonio histórico-artístico o cultural, las afecciones “graves” sobre los elementos o territorios que gocen de alguna figura legal de protección a nivel estatal (Red Natura 2000, Parques Nacionales, Bienes de Interés Cultural u otros) o autonómico (Parques Nacionales, Parques Regionales u otros).

Se clasificarán como categoría A (daños muy importantes) la afección “grave” a elementos con figuras de protección a nivel estatal, y como categoría B (daños importantes) la afección “grave” a elementos catalogados a nivel autonómico.

En los territorios protegidos, la asignación del calificativo “grave” se efectúa en función del calado, la velocidad de la onda de rotura y la superficie afectada, catalogándose como “graves” cuando se supere el umbral establecido según el criterio del Artículo 9.2 del RDPH, representado en la Figura 3-14, en una superficie superior a 1.000 ha. En el resto de los elementos protegidos, la calificación como “grave” se efectuará en función del calado y la velocidad de la onda de rotura en el punto de afección, conforme al criterio representado en la misma figura.

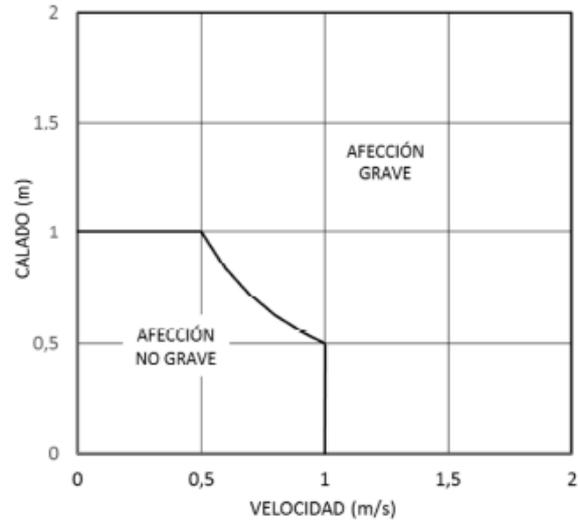


Figura 3-14. Evaluación de la gravedad de las afecciones del tipo aspectos medioambientales, histórico-artísticas y culturales.

3.3.2.5 Otras afecciones

Existen elementos no tipificados, peor caracterizados por que las consecuencias de su rotura o funcionamiento incorrecto da lugar a consecuencias severas, como pueden ser las centrales nucleares o las plantas de producción de compuestos venenosos o especialmente dañinos para la salud de las personas o el medio ambiente, como las industrias incluidas en el Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (PRTR), cuya afección debe ser analizada.

La afección grave a alguno de los elementos relacionados en el citado registro dará lugar a la clasificación en la categoría A. A estos efectos se considerará que se produce una afección “grave” si las condiciones hidráulicas superan los umbrales establecidos en el Artículo 9.2 del RDPH, tal y como se representa en la Figura 3-15.

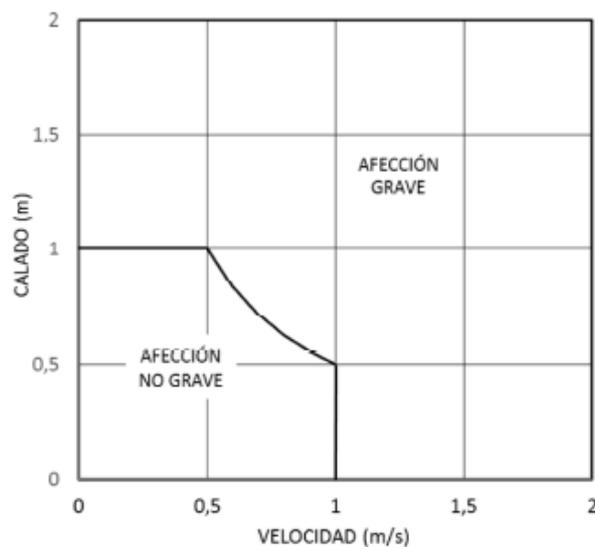


Figura 3-15. Evaluación de la gravedad de otras afecciones relacionadas en el PRTR.

4 CASO DE ESTUDIO: LA PRESA TEJAREJOS

A lo largo de este capítulo se describe el caso particular de aplicación de este estudio, caracterizando tanto la presa como su embalse y describiendo las características fundamentales de la zona en la que se realiza el análisis, para lo que se detalla su localización, prestando especial importancia a los elementos hidrográficos y orográficos, así como a los condicionantes hidráulicos de su entorno.

4.1 Características de la presa y el embalse

4.1.1 Identificación

La presa objeto de estudio, así como su embalse poseen el mismo nombre, presa Tejarejos y embalse Tejarejos. Ese embalse recoge el agua del arroyo de Mimbarrera, un afluente del río Odiel, perteneciente a la demarcación hidrográfica del Tinto, Odiel y Piedras.

Se localiza en la provincia de Huelva y las coordenadas del centro de presa, en proyección UTM ETRS89 Huso 29 son:

- X: 717.735,186 m
- Y: 4.186.473,263 m

Se trata de una presa de materiales sueltos, con aliviadero de labio fijo lateral sin sistema de regulación, ver Figura 4-1.

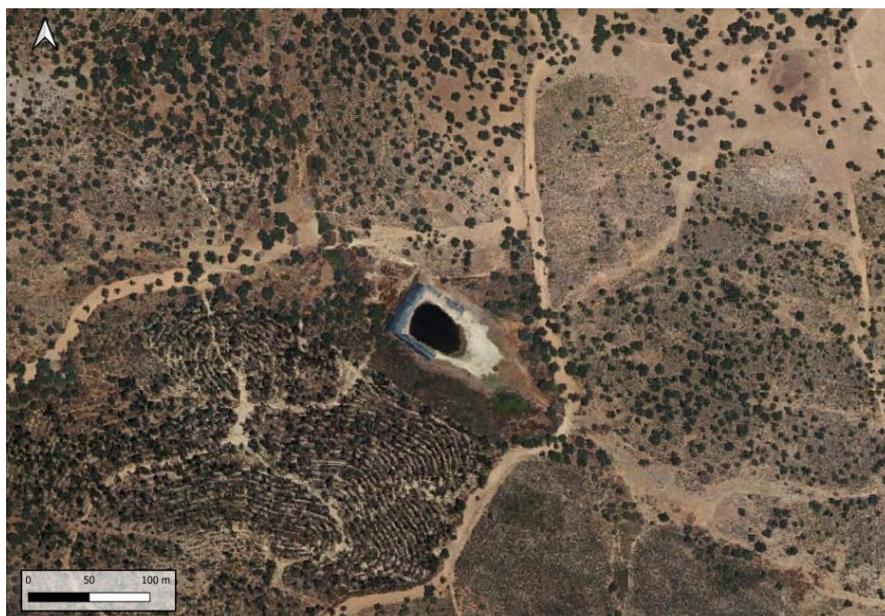


Figura 4-1. Presa Tejarejos (fuente: PNOA).

4.1.2 Localización

La zona de estudio se localiza en el término municipal de La Granada de Río Tinto, en la provincia de Huelva, a 3,7 kilómetros al norte del núcleo de población, ver Figura 4-2, Figura 4-3 y Figura 4-4.



Figura 4-2. Localización del T.M. La Granada de Río Tinto en la provincia de Huelva.



Figura 4-3. Localización del área de estudio en el T.M. de la Granada de Río Tinto.



Figura 4-4. Localización de detalle del área de estudio.

4.1.2.1 Ámbito orográfico

La orografía de la zona de estudio es escarpada, puesto que se localiza en zona de sierra. La presa se encuentra en una vaguada elevada de un pequeño afluente del río Odiel, como se puede observar en la Figura 4-5.

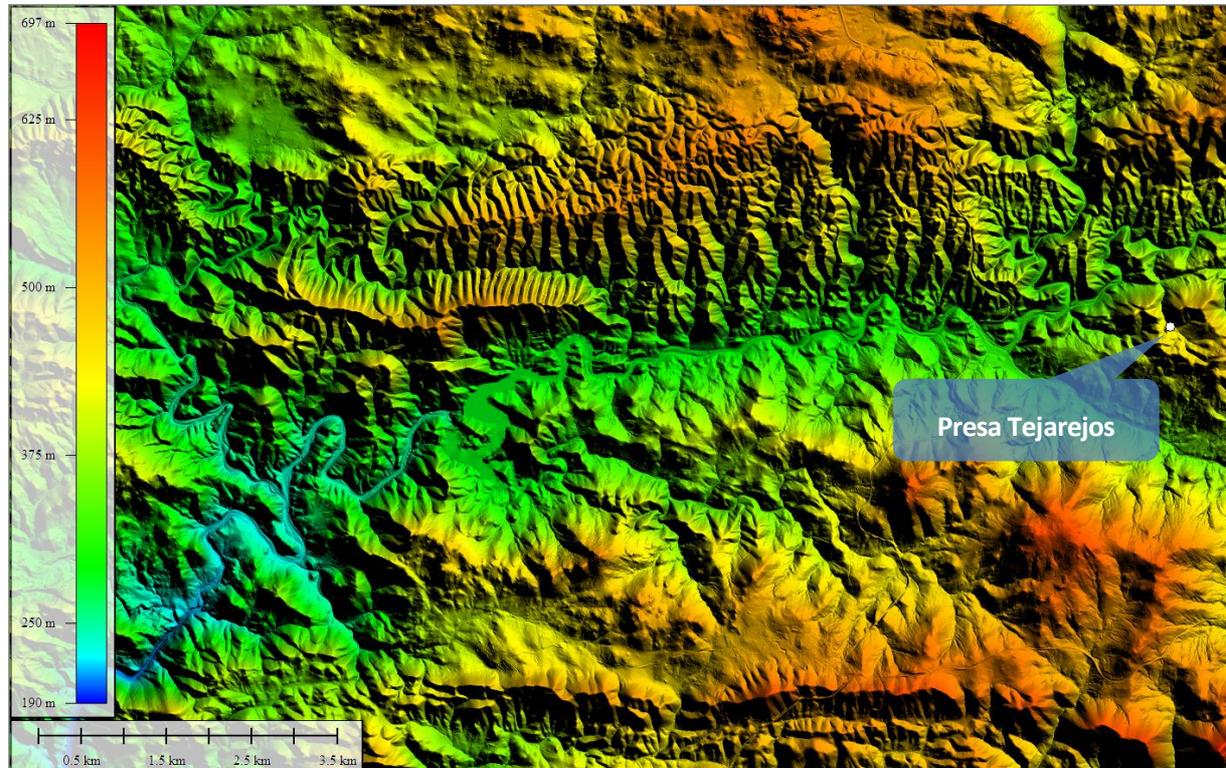


Figura 4-5. Ámbito orográfico de la zona de estudio (Fuente: MDT05 del Centro Nacional de Información Geográfica, 2014-2015).

4.1.2.2 Ámbito hidrográfico

La zona de estudio se encuentra ubicada dentro de la demarcación hidrográfica de Tinto, Odiel y Piedras, en la zona alta de la cuenca, en concreto en la cuenca del río Odiel, ver Figura 4-6 y Figura 4-7.



Figura 4-6. Demarcaciones Hidrográficas de España.

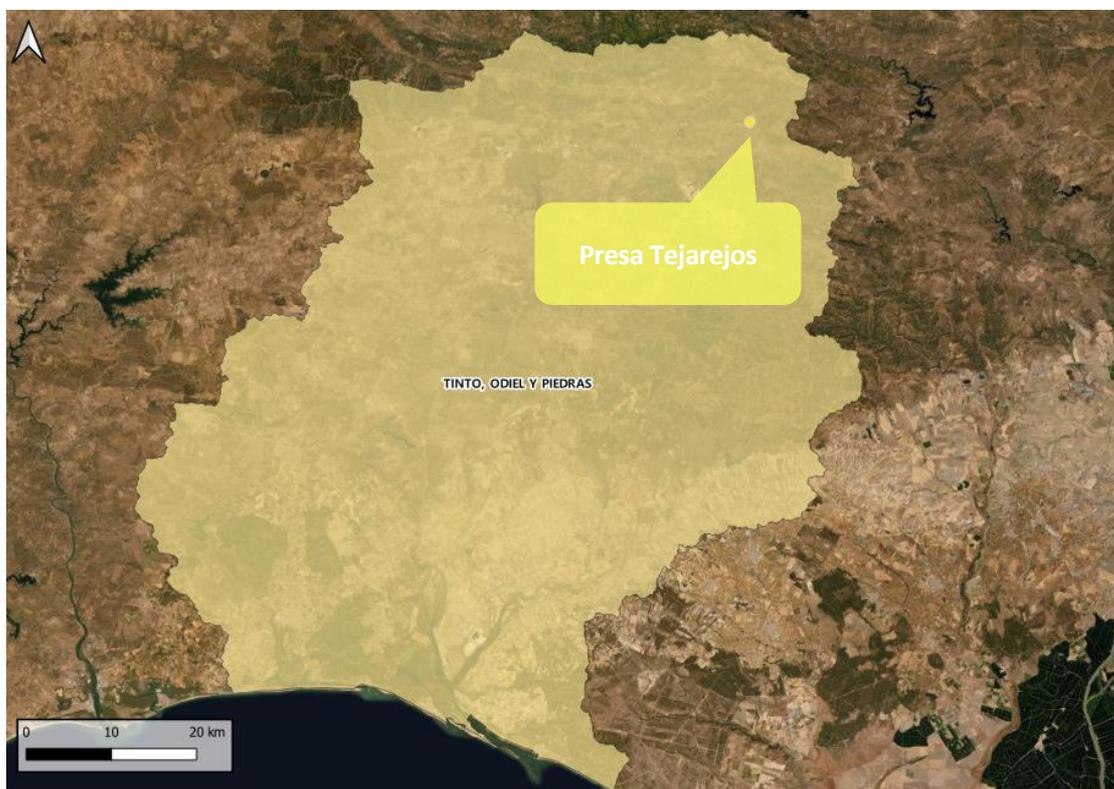


Figura 4-7. Localización del área de estudio respecto a la demarcación hidrográfica Tinto, Odiel y Piedras.

Con el objeto de definir hidrográficamente el ámbito de estudio, se ha consultado la red hidrográfica disponible por el Centro Nacional de Información Geográfica para la Demarcación Hidrográfica del Tinto, Odiel y Piedras, mostrada en la Figura 4-8.

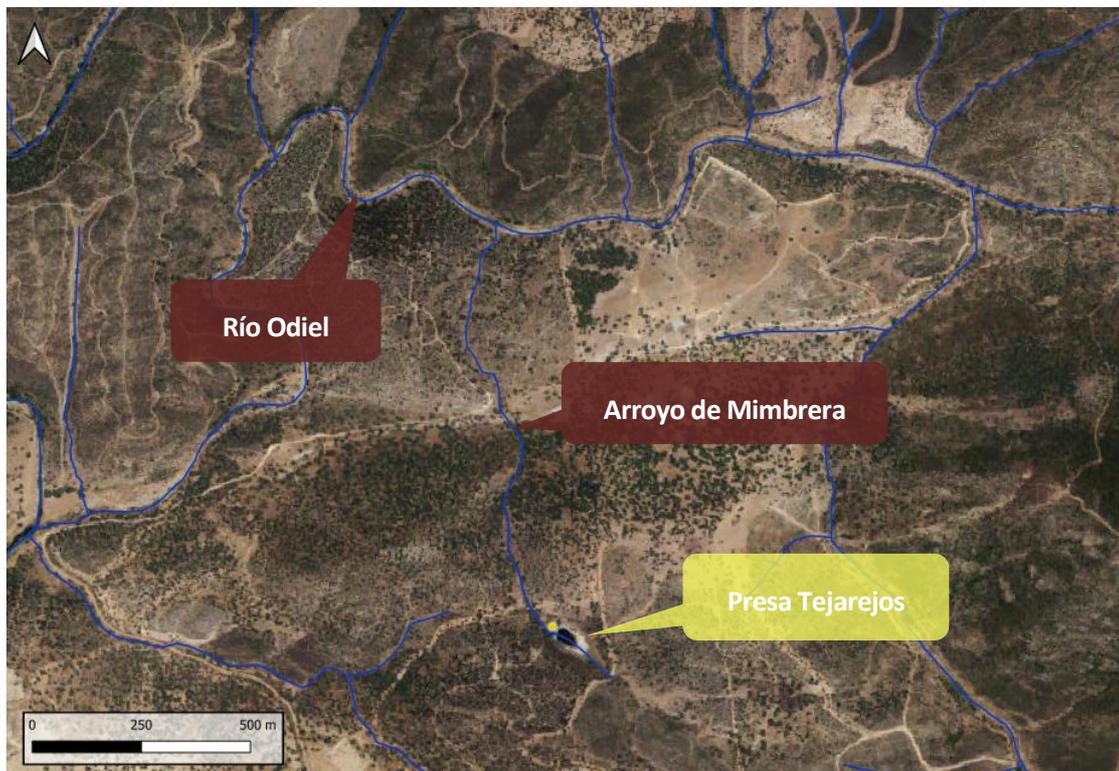


Figura 4-8. Red hidrográfica en la zona según datos del CNIG-DH TOP.

El arroyo que intercepta la presa Tejarejos está reconocido en Catastro como Arroyo de la Mimblera, afluente del Río Odiel.

No existen otras infraestructuras de regulación en la zona de estudio que suponga afección al análisis en cuestión.

En la zona de estudio se observa un único cruce del cauce de estudio con el Camino del Jabuguillo, siendo este cruce mediante **vado inundable**, mostrado en la Figura 4-9, cuya localización se puede ver en la Figura 4-10. No se observan otras infraestructuras de drenaje en el entorno.



Figura 4-9. Fotografía tomada en campo del vado inundable.



Figura 4-10. Situación de las obras de drenaje en la zona de estudio.

4.1.3 Características de la presa

La tipología de la presa es de materiales sueltos, con aliviadero de labio fijo lateral sin sistema de regulación, cuyas características se detallan en la tabla Tabla 4-1:

Tabla 4-1. Características de la presa.

PARÁMETRO	VALOR
Cota de cauce	424,3 m.s.n.m.
Cota de vertedero	430 m.s.n.m.
Cota de coronación	431 m.s.n.m.
Ancho de coronación	3,00 m
Altura de presa	6,70 m
Longitud de coronación	60 m
Cota NMN	430 m.s.n.m.

Los órganos de desagüe se basan en un aliviadero lateral de labio fijo ubicado a la cota 430 m.s.n.m.⁹. No dispone de desagüe de fondo.

⁹ Metros sobre el Nivel Máximo Normal. El Nivel Máximo Normal es el nivel máximo que puede alcanzar el agua del embalse en un régimen normal de explotación.

4.1.4 Características del embalse

El embalse se pretende destinar para el riego del proyecto de plantación de encinas en intensivo y súper intensivo en Monte Castilla.

Las características del embalse se resumen en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2. Características del embalse.

PARÁMETRO	VALOR
Volumen de embalse a cota Nivel Máximo Normal (NMN)	12.594 m ³

La curva característica del embalse es la que se muestra en la Tabla 4-3 y en la Figura 4-11.

Tabla 4-3. Curva característica del embalse.

COTA (m.s.n.m.)	VOLUMEN ACUMULADO (m ³)
424,8	0,0
425,0	7,2
425,2	33,2
425,4	91,3
425,6	170,2
425,8	269,9
426,0	391,6
426,2	536,8
426,4	707,7
426,6	906,2
426,8	1134,5
427,0	1395,6
427,2	1692,7
427,4	2029,2
427,6	2408,7
427,8	2835,5
428,0	3314,9
428,2	3852,3
428,4	4453,2
428,6	5124,3

COTA (m.s.n.m.)	VOLUMEN ACUMULADO (m ³)
428,8	5877,7
429,0	6745,1
429,2	7736,1
429,4	8819,4
429,6	9990,9
429,8	11254,0
430,0	12594,4

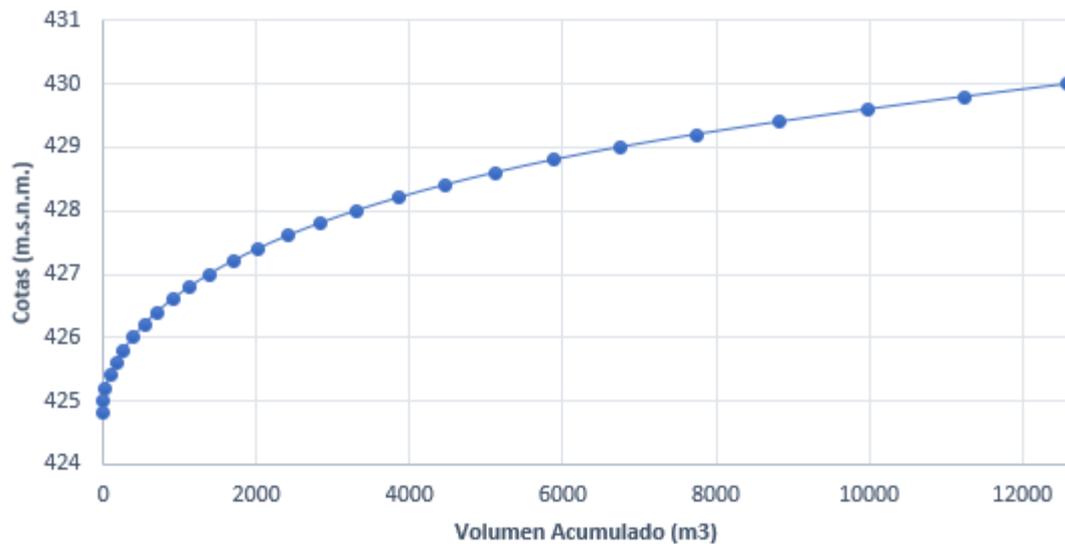


Figura 4-11. Curva característica del embalse.

4.2 Características del cauce aguas abajo afectado por la onda de rotura

La presa Tejarejos se encuentra en un entorno rural, alejada de núcleos de población, en una zona elevada respecto a los terrenos circundantes, cuyo cauce de aportación queda recogido en una vaguada pronunciada que conduce el flujo aguas abajo de la presa hasta la confluencia con el Río Odiel. Los terrenos en las márgenes presentan formaciones arboladas, pastizal y matorral disperso.

Las vías de comunicación que se observan son caminos Rurales. Respecto a las edificaciones solo se observan naves aisladas de carácter rural.

En el entorno aguas abajo de la presa se observan dos puntos de posible afección en caso de rotura, mostrados en la Figura 4-12, correspondiente con:

1. Camino de Jabuguillo: Parcela 9006 Polígono 3 del TM La Granada de Río Tinto.
2. Edificación aislada: Nave rural de la Parcela 9 Polígono 3 del TM La Granada de Río Tinto.



Figura 4-12. Identificación de posibles afecciones.

Respecto a la posible rotura encadenada de presas que podría presentarse, se comprueba que aguas abajo de la presa no existen otras presas en el recorrido del cauce de estudio.

El límite dese estudio se ha establecido justo en la confluencia del arroyo de estudio, arroyo de Mimbrera, con el río Odiel. Esto se debe a que el caudal máximo alcanzado se entiende inferior a la capacidad del río Odiel, siendo éste de una entidad mayor, con una cuenca de aportación con una extensión mucho mayor. Se ha realizado una comprobación de la delimitación de la cuenca del río Odiel mediante la herramienta CARTODES® (<https://cartodes.com/> acceso noviembre 2022) , resultando en una cuenca de más de 4.000 Ha, de la cual la cuenca del arroyo de Mimbrera supone un 0,8% de la superficie, representada en la Figura 4-13 y cuyos caudales asociados se muestran en la Figura 4-14.

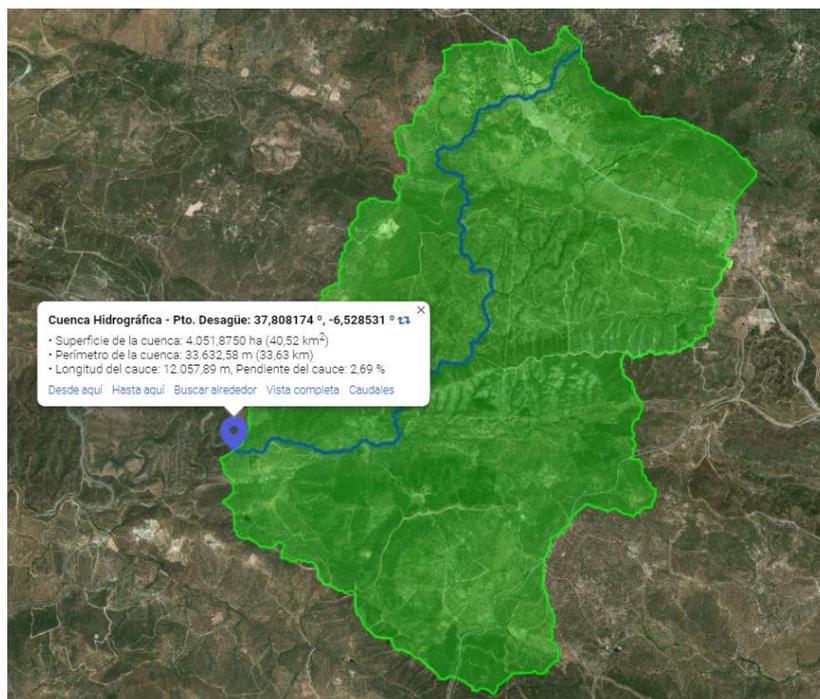


Figura 4-13. Delimitación de la cuenca hidrográfica del Río Odiel en el punto de confluencia con el Arroyo de Mimbrera en CARTODES.

Periodo de retorno (años)	Intensidad de precipitación (mm/h)	Vías de servicio, caminos		Carreteras	
		Coefficiente de escorrentía	Caudal máximo anual (m³/s)	Coefficiente de escorrentía	Caudal máximo anual (m³/s)
2	9,13	0,2066	27,2739	0,3086	40,7276
5	11,96	0,2876	49,7512	0,3978	68,8186
10	14,11	0,3407	69,5052	0,4541	92,6491
25	17,00	0,4030	99,1043	0,5180	127,3759
50	19,28	0,4457	124,2543	0,5604	156,2091
100	21,65	0,4855	152,0076	0,5988	187,4823
200	24,15	0,5229	182,6454	0,6341	221,4776
500	27,71	0,5693	228,1389	0,6766	271,1516

Figura 4-14. Caudales asociados a la cuenca delimitada en CARTODES para el Río Odiel.

4.2.1 Precipitación máxima diaria

El cálculo de la precipitación de diseño se ha realizado mediante la consulta de la cobertura ráster de precipitación máxima diaria del Subsistema del Agua, realizado en 2006 por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, cuyo mapa asociado al periodo de retorno de 500 años se muestra en la Figura 4-15.



Figura 4-15. Mapa de precipitación máxima diaria para 500 años de periodo de retorno (Fuente: REDIAM).

4.2.2 Parámetro de escorrentía

Para la obtención del parámetro de escorrentía, se ha tomado la capa en formato ráster del número de curva de la REDIAM, cuyo mapa se muestra en la Figura 4-16.

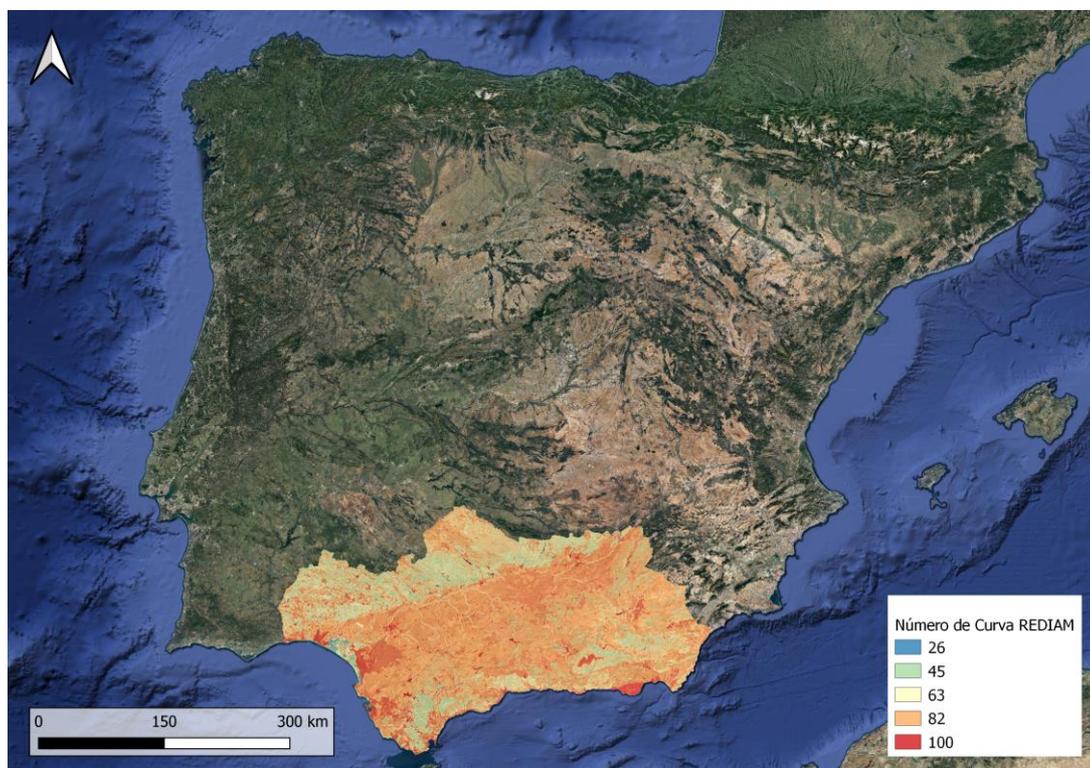


Figura 4-16. Mapa de parámetro de número de curva (Fuente: REDIAM).

4.2.3 Contorno de la simulación

En la Figura 4-17 se muestra el contorno elegido para llevar a cabo la simulación hidráulica. Para su definición se ha adoptado una distancia suficiente entre las zonas por las que entra y sale el flujo de agua de forma que el modelo pueda estabilizarse adecuadamente en la zona de mayor interés para el análisis.



Figura 4-17. Contorno de la simulación hidráulica.

4.2.4 Modelización del terreno

Para la modelización del terreno se ha tomado el Modelo Digital del Terreno (MDT) del vuelo LiDAR, proporcionado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) a fecha de enero de 2022. Dicho modelo, obtenido a partir de una nube de puntos con densidad de 0,5 puntos por metro cuadrado, ha sido completado con información complementaria procedente de visitas de campo realizadas para representar el vaciado del embalse que no quedaba recogido en el LiDAR.

No se han modelizado infraestructuras hidráulicas, puesto que sólo existe un cruce del cauce con un camino que se realiza mediante vado inundable, ya recogido en el Modelo Digital del Terreno.

El Modelo Digital del Terreno obtenido de esta fuente en la zona de estudio se muestra en la Figura 4-18.

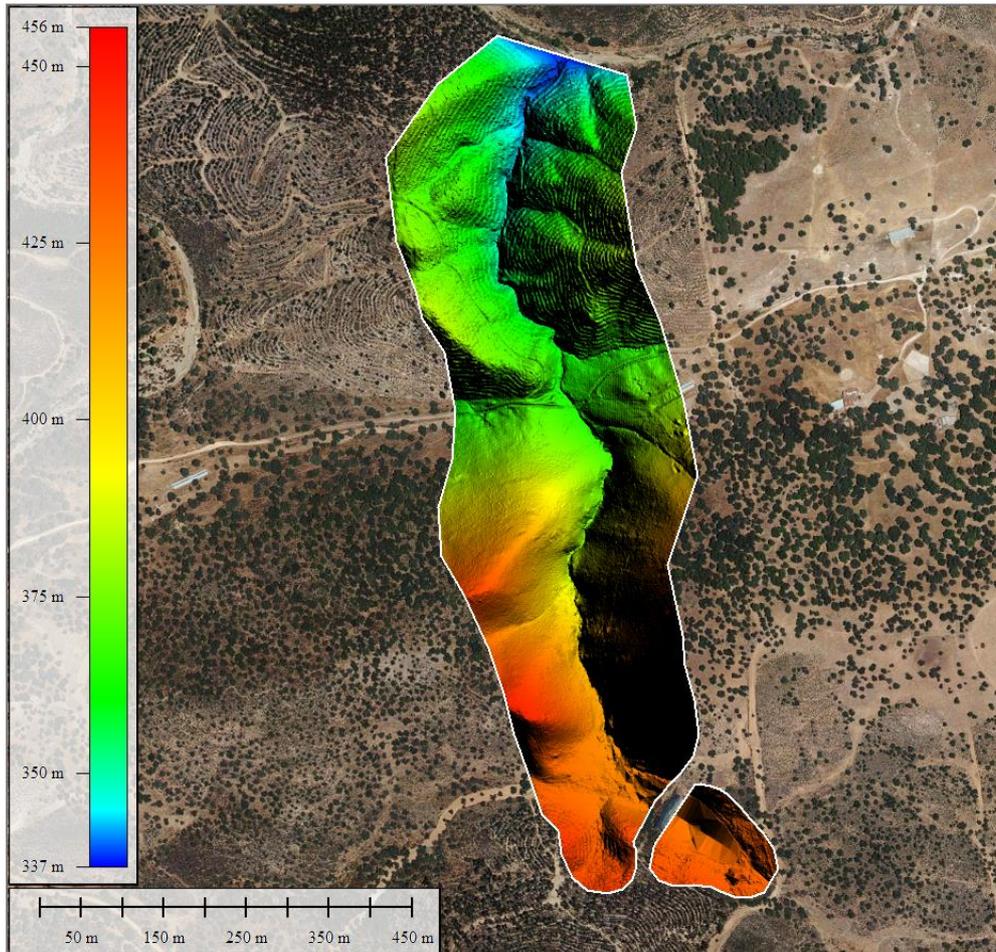


Figura 4-18. Modelo Digital del Terreno en la zona de estudio (Fuente: ficheros LiDAR del Centro Nacional de Información Geográfica, 2020).

4.2.5 Modelización del embalse

El vaso del embalse creado por la presa se introduce en la malla de cálculo del modelo hidráulico para poder simular el vaciado de este como consecuencia de la rotura de la presa. Esta modelización del vaso del embalse se realiza a partir de la información tomada en campo en las visitas realizadas a la presa. Se tomaron las medidas de profundidad siguiendo una cruz orientada al largo y ancho del embalse. Estos datos se han trasladado a una nube de puntos triangulada y superpuesta con el Modelo Digital del Terreno obtenido anteriormente.

Cabe mencionar que, en la visita, se detectó acumulación de sedimentos en el embalse localizados en el pie de presa, por lo que las medidas tomadas en esta zona son menores de las que corresponden en función de la altura de la presa.

4.2.6 Modelización de la rugosidad

Los valores de los coeficientes de rugosidad de Manning aplicados se han obtenido de la tabla expuesta en la Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables del Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. En el *Apéndice N°2* se detalla el procedimiento seguido para su obtención. Asimismo, se han revisado dichos valores en base a la ortofoto de máxima actualidad del PNOA editada por el Instituto Geográfico Nacional y disponible en el centro de descargas del Centro Nacional de Información Geográfica con vistas a identificar cambios del uso del suelo posteriores a la fecha de publicación del SIOSE que se traduzcan en una variación de la rugosidad.

En la Figura 4-19 se muestra el mapa de usos de suelo en la zona de estudio.

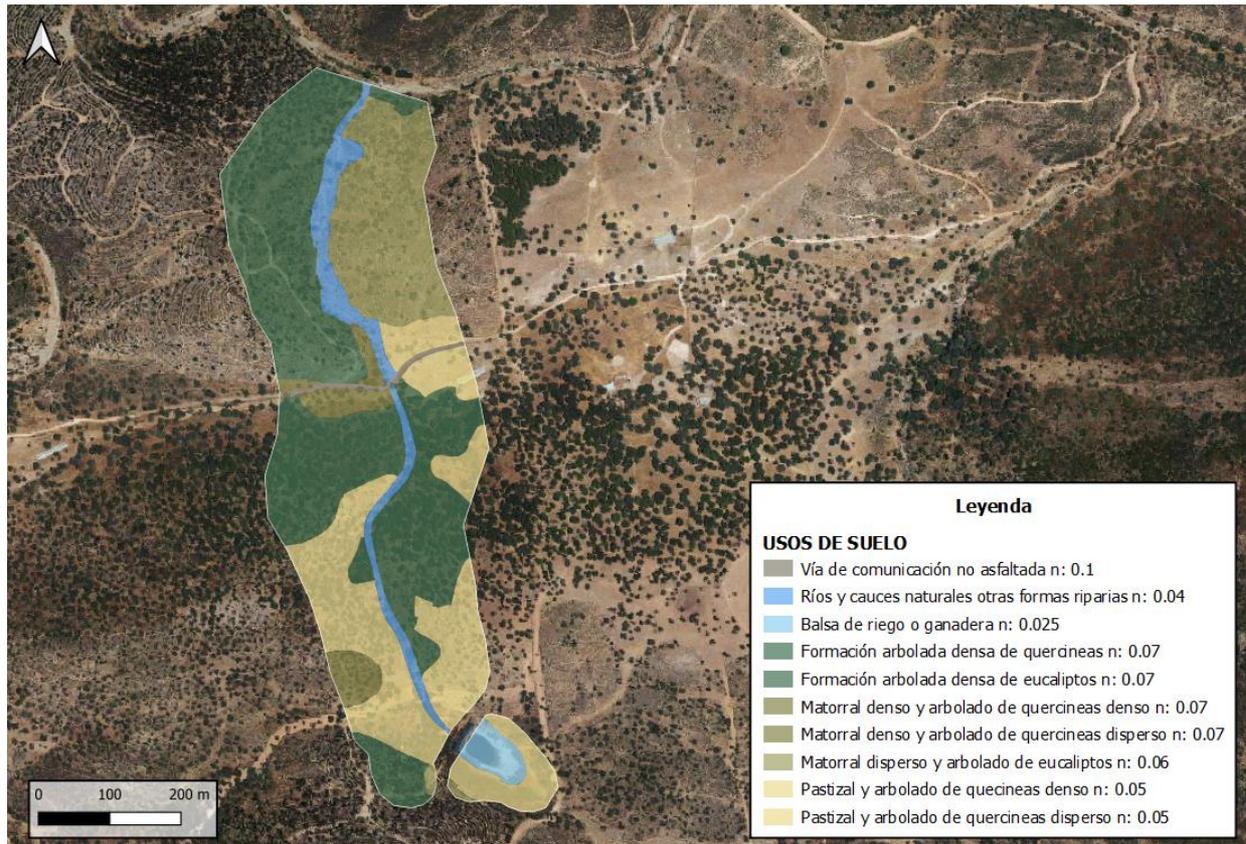


Figura 4-19. Mapa de usos del suelo en la zona de estudio.

4.2.6.1 Condiciones de contorno e internas

La definición de las condiciones de contorno del modelo pasa por el establecimiento de las zonas de entrada de flujo al dominio de cálculo (y el correspondiente valor de este) y las zonas de salida del flujo. En la Figura 4-20 se muestran dichas zonas para el caso de estudio:



Figura 4-20. Condiciones de contorno del modelo de cálculo hidráulico en los tres escenarios planteados: escenario de rotura, escenario límite, escenario en régimen natural (sin presa).

Las condiciones de contorno de entrada al modelo se corresponden con el hidrograma de avenida obtenido, colocado en el caso del escenario límite en la cola del embalse, y en el caso de la avenida en régimen natural en el contorno a pie de presa para no tener en cuenta la zona de flujo de esta.

La situación de la citada entrada queda recogida en la Figura 4-20. Condiciones de contorno del modelo de cálculo hidráulico en los tres escenarios planteados: escenario de rotura, escenario límite, escenario en régimen natural (sin presa).

Se introduce como condición de salida en la zona baja del modelo la opción de calado normal o de flujo permanente, colocándose en el contorno aguas abajo, en el límite de estudio planteado.

4.2.7 Parámetros de la simulación

Los parámetros generales de la simulación realizada se muestran en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4. Parámetros generales de la simulación.

PARÁMETRO	VALOR
Número de procesadores	Todos los disponibles
Ecuaciones	Saint-Venant
Máximas iteraciones	40
Tolerancia de la superficie libre (m)	0,01
Tolerancia en volumen (m)	0,01
Factor θ	1,00

La **mall**a de cálculo utilizada tiene una resolución general de celda de **10 x 10 m** (celdas cuadradas, ajustadas en los contornos hasta celdas irregulares de 8 lados) y se puede observar en la Figura 4-21.

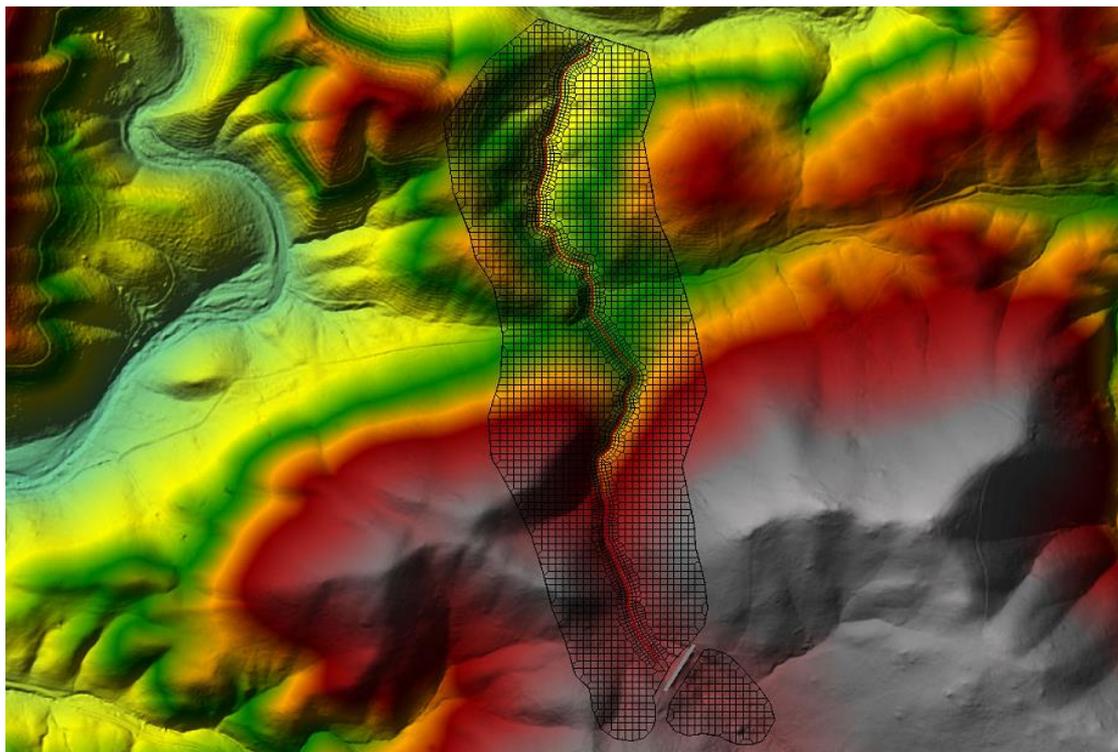


Figura 4-21. Malla de cálculo hidráulica.

La condición de Courant impuesta se corresponde con un valor mínimo del número de Courant de 0,6, y un valor máximo de 2. Los parámetros de tiempo de la simulación realizada se muestran en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5. Parámetros de tiempo de la simulación.

PARÁMETRO	VALOR
Instante inicial (s)	0
Tiempo máximo de simulación (horas)	24
Intervalo de resultados (s)	60
Paso de cálculo (s)	Adaptativo (variable entre 0,06 s y 32 s)

5 CASO DE ESTUDIO: RESULTADOS

En este capítulo se van a mostrar los resultados obtenidos de la metodología realizada, de modo que se irán explicando los mismos en el orden en que se ha elaborado el procedimiento seguido, aportando datos numéricos y gráficos para apoyar estos resultados.

5.1. Cálculos hidrológicos

5.1.1 Definición de la Cuenca

La cuenca de aportación a la presa resultante, delimitada por su divisoria de aguas realizada a partir del MDT es la que muestra en la Tabla 5-1, siendo el punto marcado en el terreno el punto de control, correspondiente a la presa de estudio.

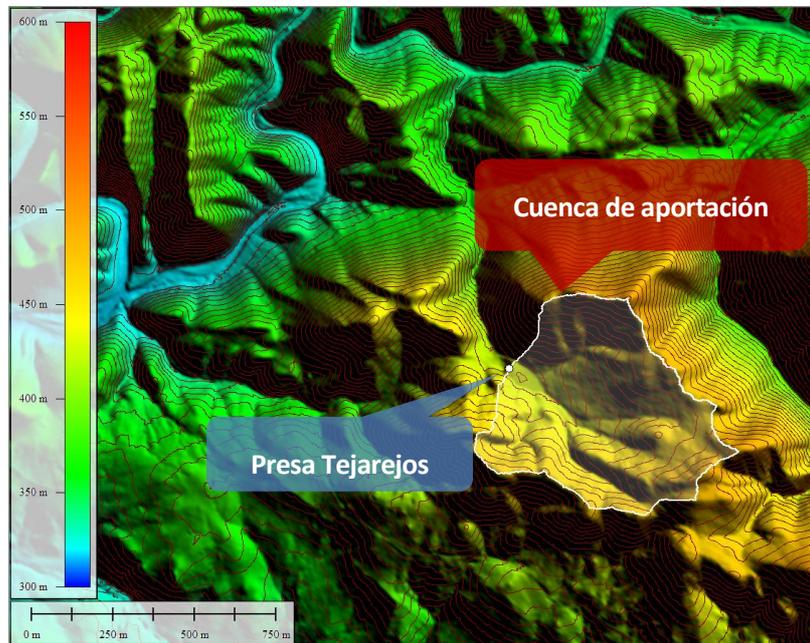


Figura 5-1. Delimitación de las cuencas de aportación.

Se adjuntan los datos característicos obtenidos la cuenca de aportación al embalse en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1. Características morfológicas de la cuenca de aportación al embalse.

CUENCA	A (Ha)	Z _{MÁX} (m)	Z _{MÍN} (m)	L (m)	% URBANIZACIÓN	T _C (h)
Aportación al embalse	32,9	491,8	424,9	823	0	0,4

5.1.2 Precipitación de diseño

Como bien se comentó en apartados anteriores, en el análisis pluviométrico tienen lugar dos etapas: cálculo de la precipitación de diseño y determinación del hietograma de lluvia.

Siguiendo la metodología explicada en el Apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**3.1, se han obtenido los resultados de precipitación que se muestran en la Tabla 5-2. Se ha extrapolado la función de los datos para obtener el valor correspondiente a un periodo de retorno mayor, de 1000 años.

Tabla 5-2. Valores medios de precipitación máxima diaria en la cuenca de estudio para los periodos de retorno de análisis.

CUENCA	T (años)	$P_{d,REDIAM}$ (mm)
Aportación al embalse	2	54,73
	5	72,17
	10	84,69
	25	101,86
	50	115,60
	100	129,91
	200	145,30
	500	166,11
Valor Extrapolado	1000	177,3

Para la estimación de la lluvia sobre el área de la cuenca de estudio se determina en primer lugar el factor reductor K_A , mostrado en la Tabla 5-3 que, en este caso, al tener una superficie inferior a 1 km², tomará el valor unidad.

Tabla 5-3. Factor reductor K_A .

CUENCA	K_A
Aportación al embalse	1

De esta forma, los valores de la precipitación de diseño corregidos arealmente son iguales a los mostrados en la Tabla 5-2, ya que el valor del factor reductor es igual a 1.

5.1.3 Hietograma de diseño

Para la obtención del hietograma de diseño se ha calculado, en primer lugar, la intensidad para cada duración a partir de la curva Intensidad-Duración-Frecuencia.

Para ello, se obtiene el factor de torrencialidad, que en la zona de estudio adopta un valor aproximado de 8,85, como se puede observar en la Figura 5-2.



Figura 5-2. Factor de torrencialidad en la zona de estudio.

Se obtienen todos los parámetros involucrados en el modelo de pérdidas de precipitación asociados a cada bloque, como son la precipitación total, la retención potencial máxima, la abstracción inicial y la retención acumulada. De esta manera se obtienen los bloques de precipitación efectiva, mediante la Ecuación (3-8), como se explicó en el desarrollo de la metodología de los cálculos hidrológicos.

De esta manera se obtiene la precipitación efectiva incremental en cada bloque, así como las abstracciones, que serán la diferencia entre la precipitación total y efectiva en cada bloque.

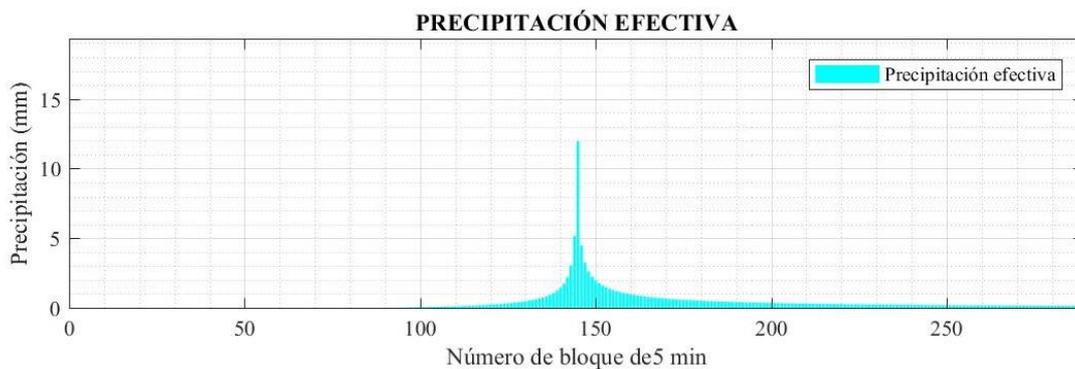


Figura 5-3. Hietograma de diseño de la cuenca de aportación para 1000 años de periodo de retorno. Precipitación efectiva.

En la gráfica de precipitación efectiva, mostrada en la Figura 5-3, se aprecia un primer tramo en el que la lluvia efectiva es nula, espacio en el que las pérdidas potenciales son superiores a la precipitación total; superado el umbral de escorrentía de la cuenca, comienzan a darse valores crecientes de la lluvia efectiva hasta alcanzar el pico, momento en el cual comienza a decrecer (sigue, lógicamente, la misma pauta que la lluvia de diseño). Estos valores serán, por tanto, los que darán lugar a escorrentía directa en la cuenca, por lo que serán los empleados posteriormente para el cálculo del hidrograma de salida de esta.

En la Figura 5-4 se muestra la gráfica correspondiente al diagrama de bloques alternos de precipitación total y abstracciones para la cuenca de diseño correspondiente al periodo de retorno de 1000 años.

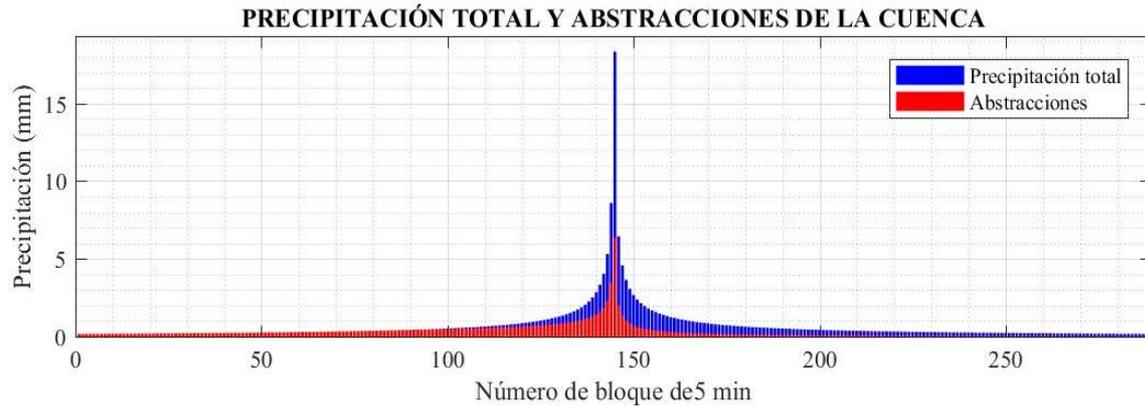


Figura 5-4. Hietograma de diseño de la cuenca de aportación para 1000 años de periodo de retorno. Precipitación total y abstracciones.

En el *Apéndice N^o1* puede consultarse el hietograma de lluvia efectiva obtenido de manera tabular para la cuenca de aportación al embalse asociado a 1000 años de periodo de retorno.

5.1.4 Caracterización de la escorrentía

La Figura 5-5 muestra la distribución del número de curva en la cuenca de aportación al embalse, correspondiente al ráster obtenido con la cobertura REDIAM.

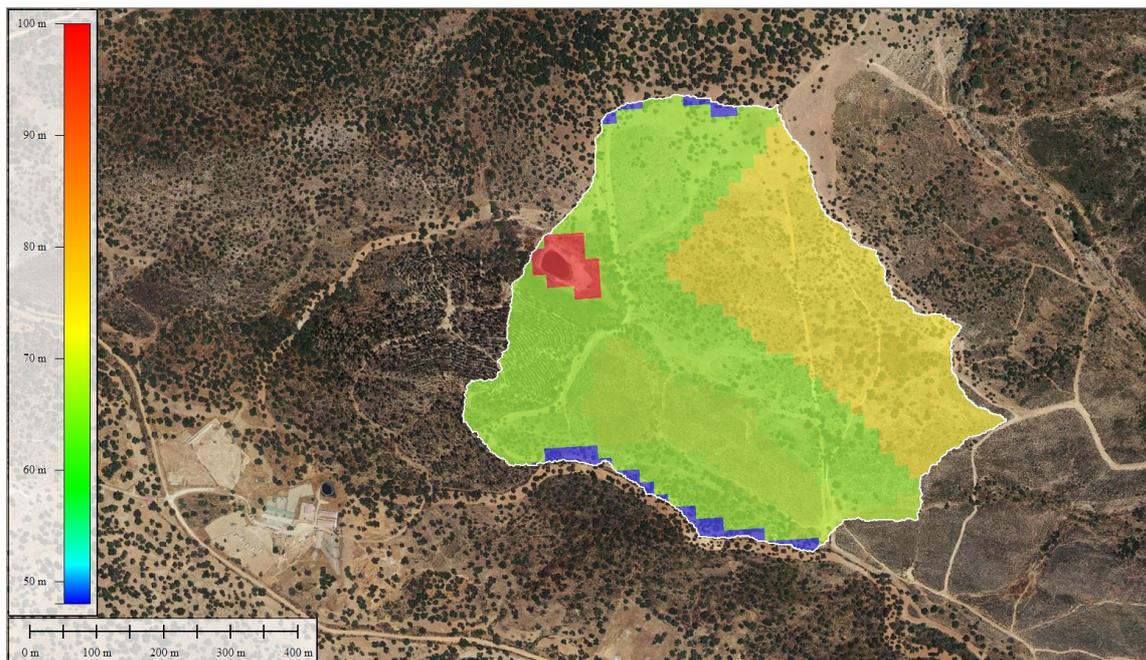


Figura 5-5. Valor del Número de Curva en la cuenca de aportación al embalse.

El valor medio del **Número de Curva (CN)** obtenido para la cuenca de aportación al embalse, en condiciones medias de humedad, para la cobertura consultada, se muestra en la Tabla 5-4.

Tabla 5-4. Número de curva medio en las cuencas hidrológicas del estudio.

CUENCA	REDIAM	
	P ₀ (mm)	CN
Aportación al embalse	22,39	69,1

5.1.5 Caudales e hidrogramas

5.1.5.1 Método Racional Modificado

Se adjuntan en la Tabla 5-5 los datos obtenidos para el periodo de retorno de 1000 años, basado en la avenida de proyecto recomendada en las Normas Técnicas para el Proyecto y construcción de presas de materiales sueltos para categoría C. A la vista del entorno, no se espera un resultado distinto de clasificación. Se comprobará hidráulicamente que la avenida es suficiente para llenar el embalse a coronación en el caso del escenario límite.

Tabla 5-5. Resultados del Método Racional Modificado.

CUENCA	μ (%)	P_{0c} (mm)	T (años)	P_{dc} (mm)	P_{dc}/P_{0c}	C	T_c (h)	I_d (mm/h)	I_t (mm/h)	K_u	Q (m ³ /s)
Aportación al embalse	0	22,4	1000	177,3	7,9	0,6	0,4	7,4	100,7	1,0	5,6

5.1.5.2 Método del Hidrograma Unitario

Para el caso de estudio, el hidrograma unitario obtenido en la cuenca de aportación al embalse para el periodo de retorno de 1000 años se puede consultar de manera tabular en el *Apéndice N°1* que acompaña a este documento.

Se muestra el hidrograma obtenido en la Figura 5-6.

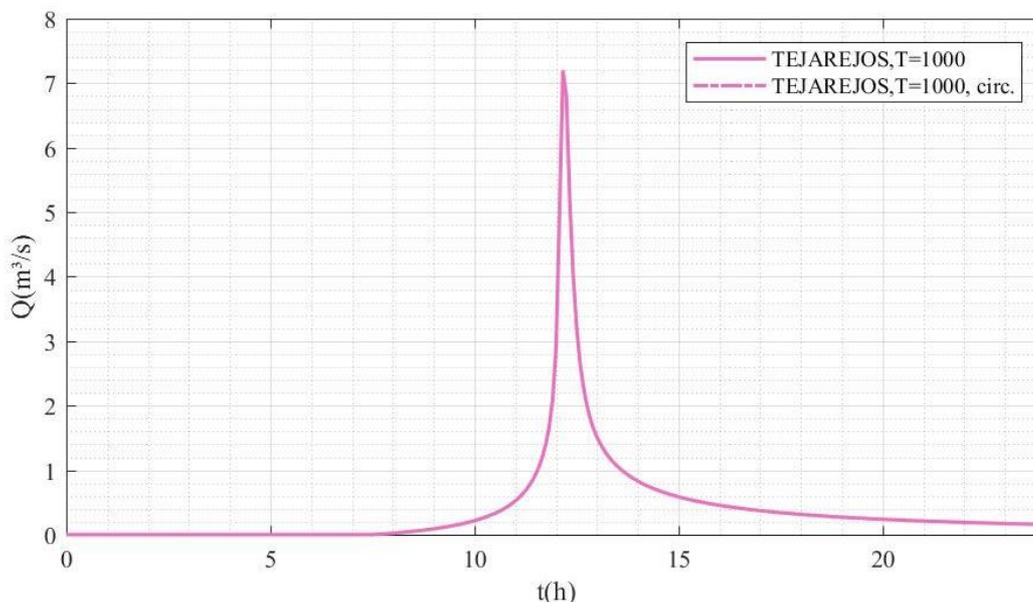


Figura 5-6. Hidrograma de diseño de la cuenca de aportación para 1000 años de periodo de retorno.

El valor del caudal punta del hidrograma unitario en la cuenca se recoge en la Tabla 5-6.

Tabla 5-6. Caudal unitario del hidrograma de la cuenca de estudio para el periodo de retorno considerado obtenido por el Método del Hidrograma Unitario.

CUENCA	T (años)	Q _p (m ³ /s)
Aportación al embalse	1000	7,2

5.1.5.3 Caudales de diseño

A continuación, se muestra la Tabla 5-7, que contiene los caudales punta para la cuenca de estudio obtenidos en cada metodología de cálculo seguida.

Tabla 5-7. Tabla resumen de caudales punta de diseño.

CUENCA	T	Q (MRM) m ³ /s	Q (HU) m ³ /s	Q DISEÑO m ³ /s
Aportación al embalse	1000	5,6	7,2	7,2

Debido a que el caudal punta obtenido mediante el Método del Hidrograma Unitario es mayor, y por tanto más desfavorable, éste es el elegido como caudal de diseño.

5.2. Cálculos hidráulicos

Para la elaboración de los cálculos hidráulicos, previamente se deben determinar los parámetros de brecha a introducir en el modelo.

Teniendo en cuenta que se trata de una presa de materiales sueltos, tras analizar los anchos de brecha y tiempos de rotura obtenidos por las diferentes metodologías, se establece como valor de cálculo el obtenido mediante la formulación de la Guía Técnica para la Clasificación, 1996, por ser el valor más desfavorable. Los parámetros de la brecha obtenidos mediante la citada metodología se resumen en la Tabla 5-8.

Tabla 5-8. Parámetros de la brecha.

PARÁMETRO	VALOR
Modo de fallo	Sobrevertido
Pendiente	1H/1V
Altura de la presa (m)	6,7
Volumen almacenado en el embalse (hm ³)	0,0126
Ancho medio de la brecha (m)	10,78
Tiempo de desarrollo de la brecha (horas)	0,08

A continuación, se muestran y analizan los resultados obtenidos para los diferentes escenarios planteados en términos de calados y velocidades, mostrando en cada uno de ellos el mapa de calados máximos y el mapa de velocidades máximas a lo largo del recorrido de la avenida de inundación del contorno de cálculo estudiado.

5.2.1. Escenario sin avenida

En el escenario de rotura sin avenida se presenta un mapa de calados máximos, en el que se observa el embalse inundado hasta la cota del Nivel Máximo Normal y una llanura de inundación aguas abajo de la presa recogida en el recorrido del cauce. Se observan calados más elevados en el centro del cauce.

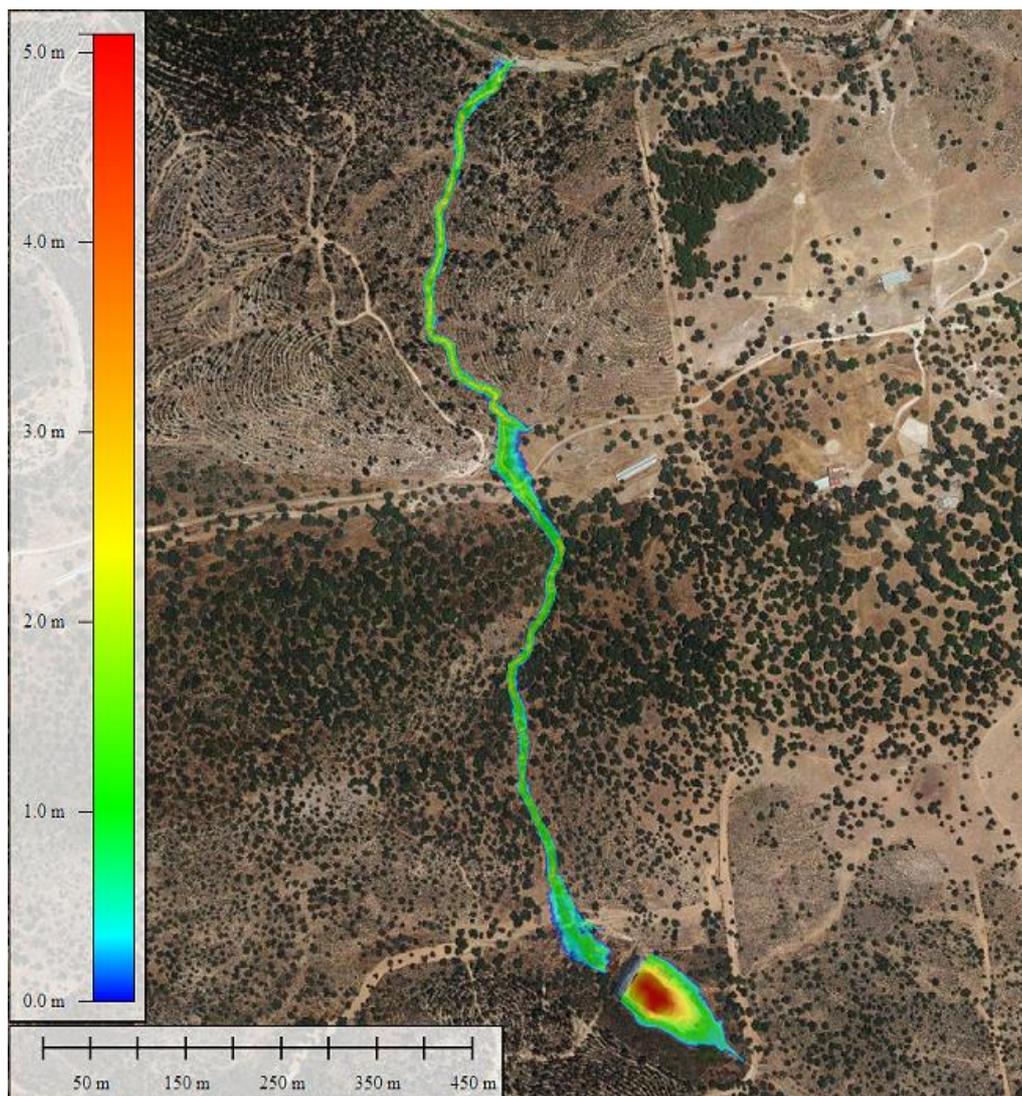


Figura 5-7. Mapa de calados máximos en el escenario de rotura sin avenida.

Tal como se observa en la Figura 5-7, se ve afectado el camino de Jabuguillo, punto 1, con un calado máximo alcanzado de 1,39 metros. Mientras que la edificación aislada, identificada como punto de posible afección 2, no se ve afectada por no ser alcanzada por la inundación, como se había previsto.

Respecto a las velocidades, mostradas en la Figura 5-8, en la zona del embalse se observan velocidades bajas por la retención del agua en éste. Se tienen velocidades elevadas en el centro del cauce, sobre todo en las zonas donde se estrecha más la llanura de inundación, y más bajas donde se ensancha, como a la salida de la presa y en el cruce con el camino de Jabuguillo.

En el camino de Jabuguillo, punto 1, se registra una velocidad máxima alcanzada de 3,03 m/s

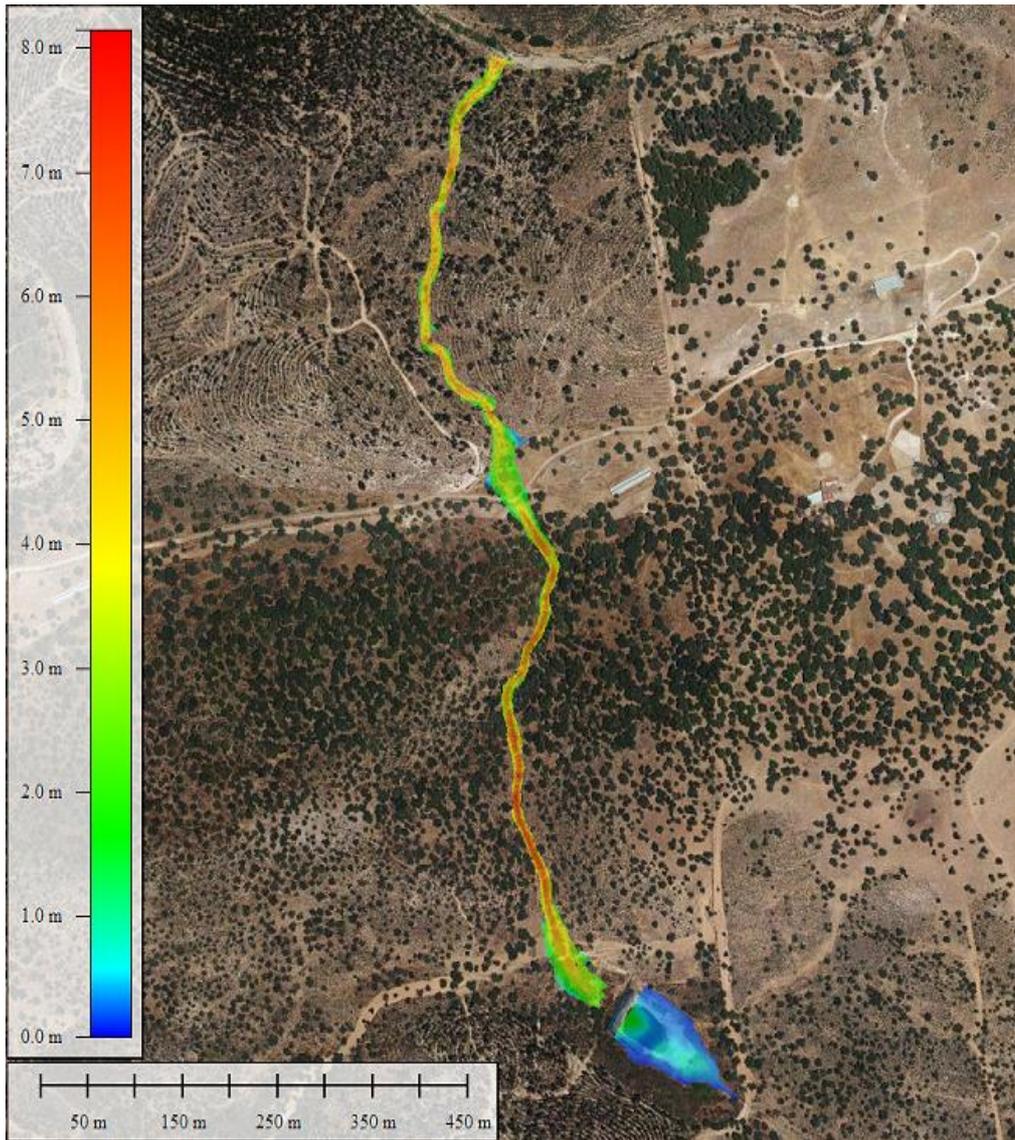


Figura 5-8. Mapa de velocidades máximas en el escenario de rotura sin avenida.

Se muestra en la Figura 5-9 el hidrograma de rotura obtenido a pie de presa del escenario sin avenida, con un caudal punta de $54 \text{ m}^3/\text{s}$. La duración del hidrograma es igual al tiempo de simulación empleado, 24 horas, aunque se muestran 2 horas en el gráfico para mejor visualización debido que durante el tiempo no representado no hay caudal circulando.

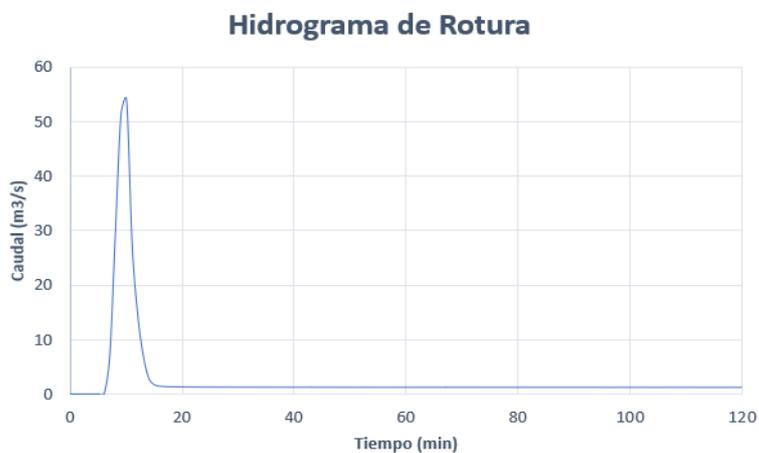


Figura 5-9. Hidrograma de rotura del escenario sin avenida.

5.2.2. Escenario límite

En el escenario límite se presenta un mapa de calados máximos en el que se observa en el embalse una inundación algo más extensa en planta debido a la entrada del hidrograma en la cola de éste, aumentando los calados hasta que la lámina de agua alcanza la coronación para producir la rotura.

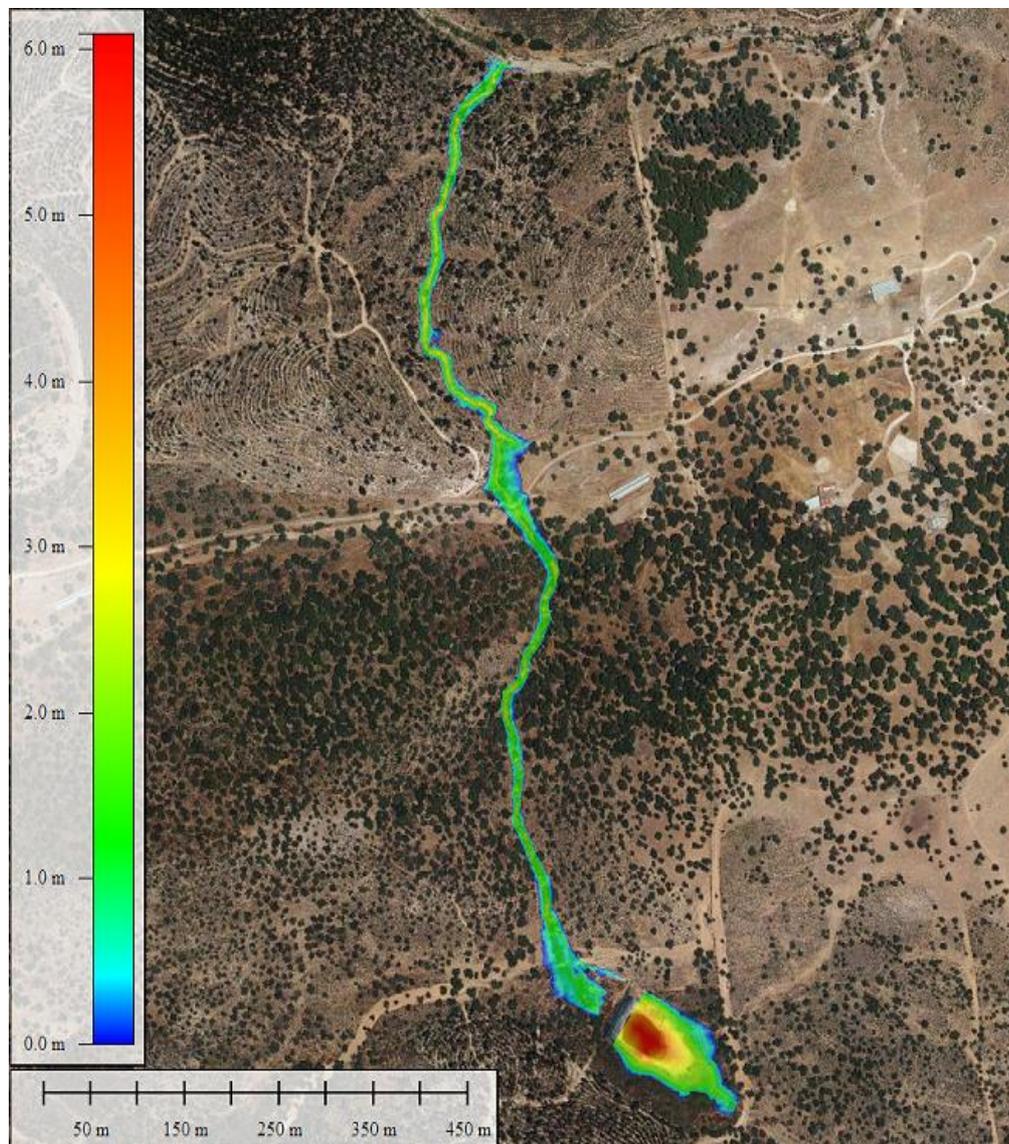


Figura 5-10. Mapa de calados máximos en el escenario límite.

Como se observa en la Figura 5-10, aguas abajo de la presa, la llanura de inundación se mantiene similar al escenario de rotura, centrada y recogida en el recorrido del cauce hasta la confluencia con el río Odiel. En el camino de Jabuguillo, punto 1, se registra un calado máximo alcanzado de 1,6 metros.

Respecto a las velocidades, mostradas en la Figura 5-11, se observan velocidades ligeramente más elevadas en la zona de la cola del embalse debido a la entrada del hidrograma, así como en la zona cercana a la presa por la rotura de ésta. Se tienen velocidades elevadas en la zona de desagüe por el aliviadero en el lateral derecho de la presa, así como en zonas centrales del cauce.

En el camino de Jabuguillo, punto 1, se registra una velocidad máxima alcanzada de 3,56 m/s.

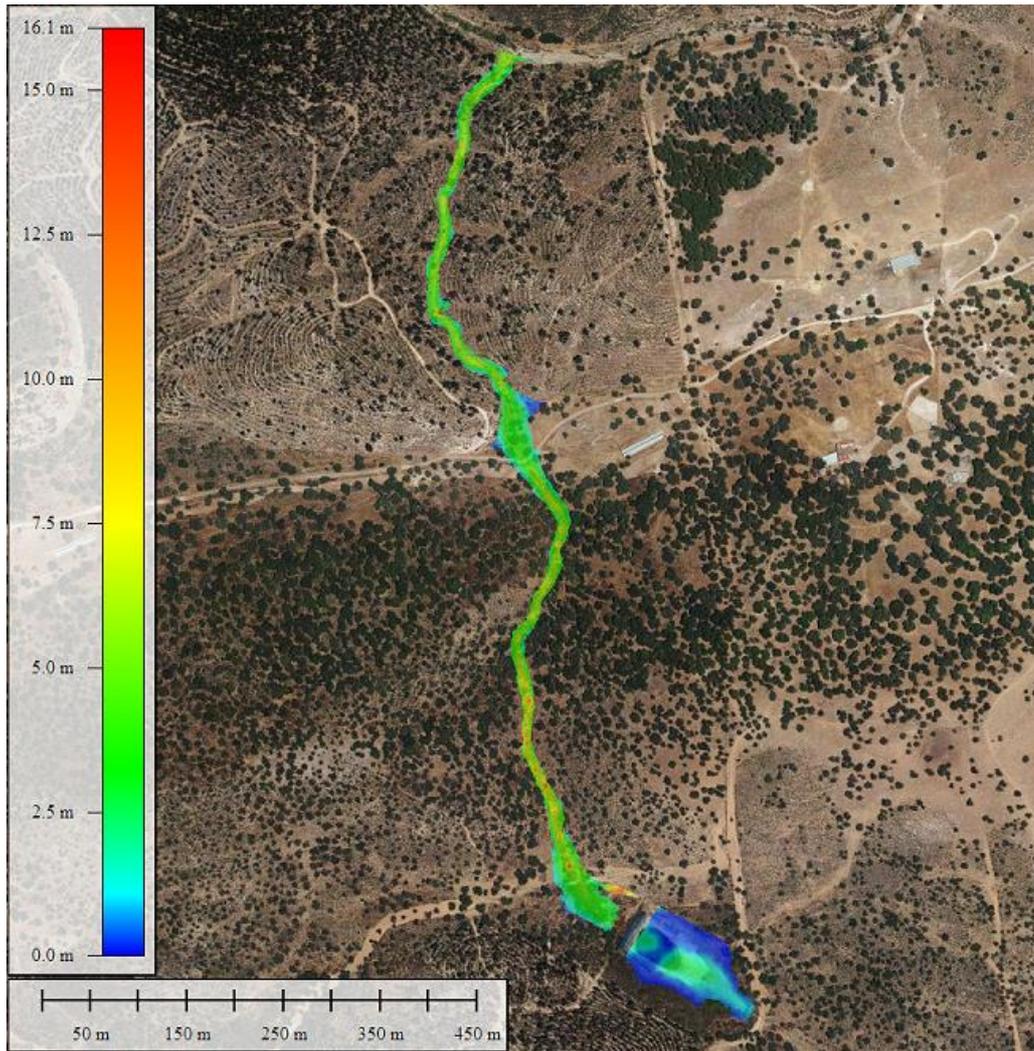


Figura 5-11. Mapa de velocidades máximas en el escenario límite.

Se muestra en la Figura 5-12 el hidrograma laminado de avenida obtenido a pie de presa del escenario límite, con un caudal punta de $83 \text{ m}^3/\text{s}$. La duración del hidrograma es igual al tiempo de simulación empleado, 24 horas, aunque se muestran 10 h en el gráfico para mejor visualización. Se observa un hidrograma suave con subida progresiva y lenta hasta 300 minutos, 5 horas, que representa el flujo que empieza a discurrir por el aliviadero a medida que entra la avenida. A las 5 horas, se tiene el pico de hidrograma debido a que se alcanza la cota de coronación del embalse y, por tanto, se produce la rotura de la presa.

Hidrograma Laminado

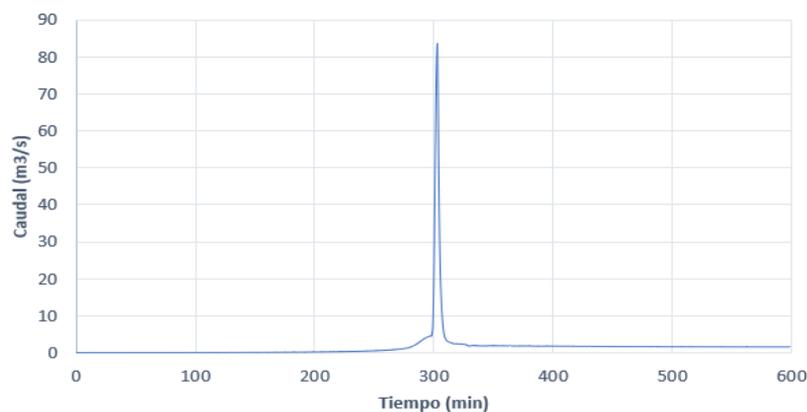


Figura 5-12. Hidrograma de rotura del escenario límite.

5.2.3. Avenida en régimen natural

A la vista de las llanuras de inundación obtenidas en los escenarios anteriores junto con los puntos identificados de afección, no sería necesario el análisis en régimen natural puesto que no habrá cambio de categoría. No obstante, se ha realizado la simulación, por lo que se muestran a continuación los resultados obtenidos.

Se introduce el hidrograma de avenida a pie de presa, por lo que no se observa el embalse inundado.

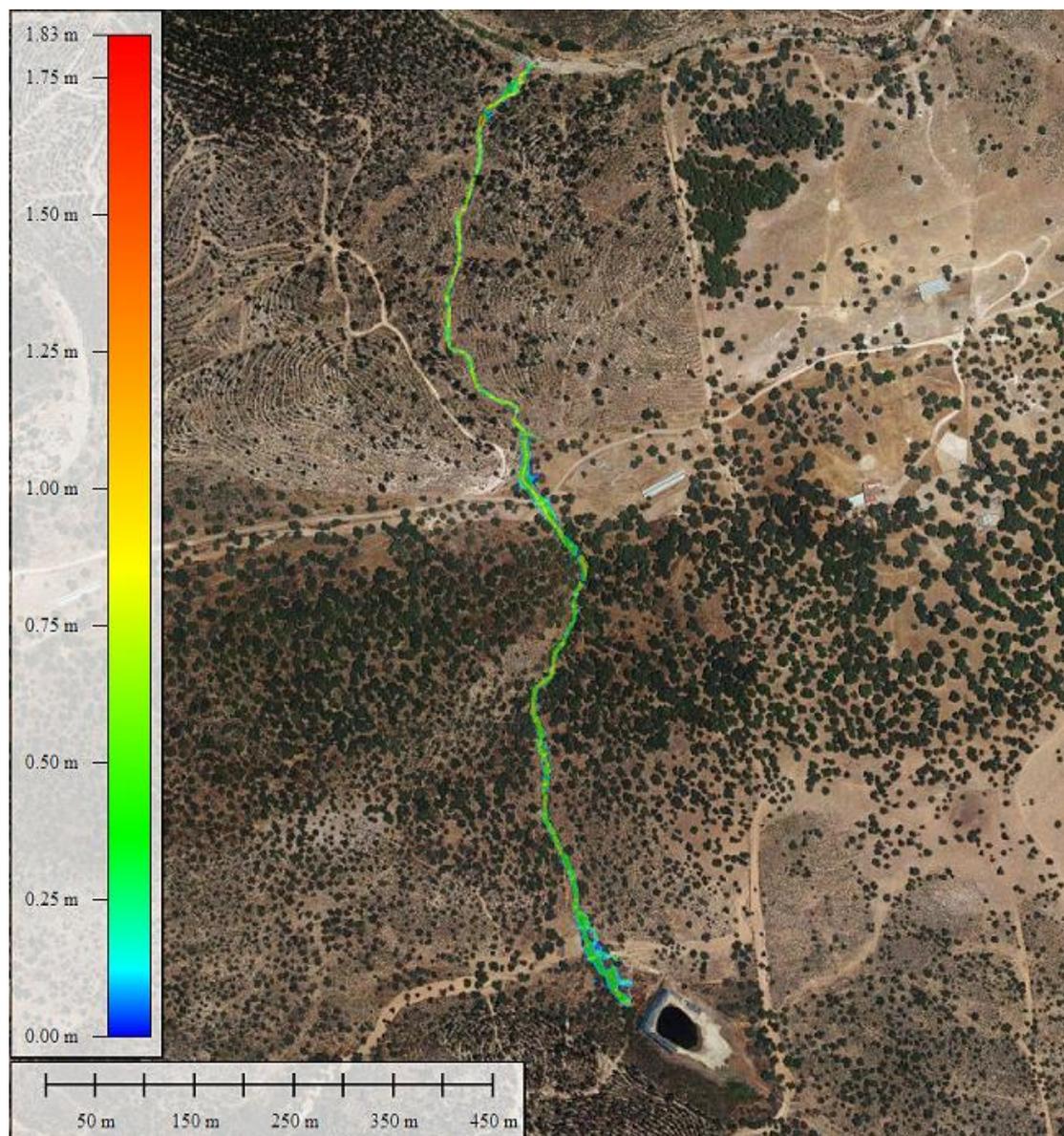


Figura 5-13. Mapa de calados máximos en el escenario de avenida en régimen natural.

El mapa de calados máximos, mostrado en la Figura 5-13, se mantiene similar a los anteriores, con reducción de la extensión de la llanura de inundación y de los valores de calados alcanzados. Del mismo modo, se obtiene reducción de las velocidades recogidas, mostradas en la Figura 5-14, siendo puntualmente elevadas en zonas concretas.

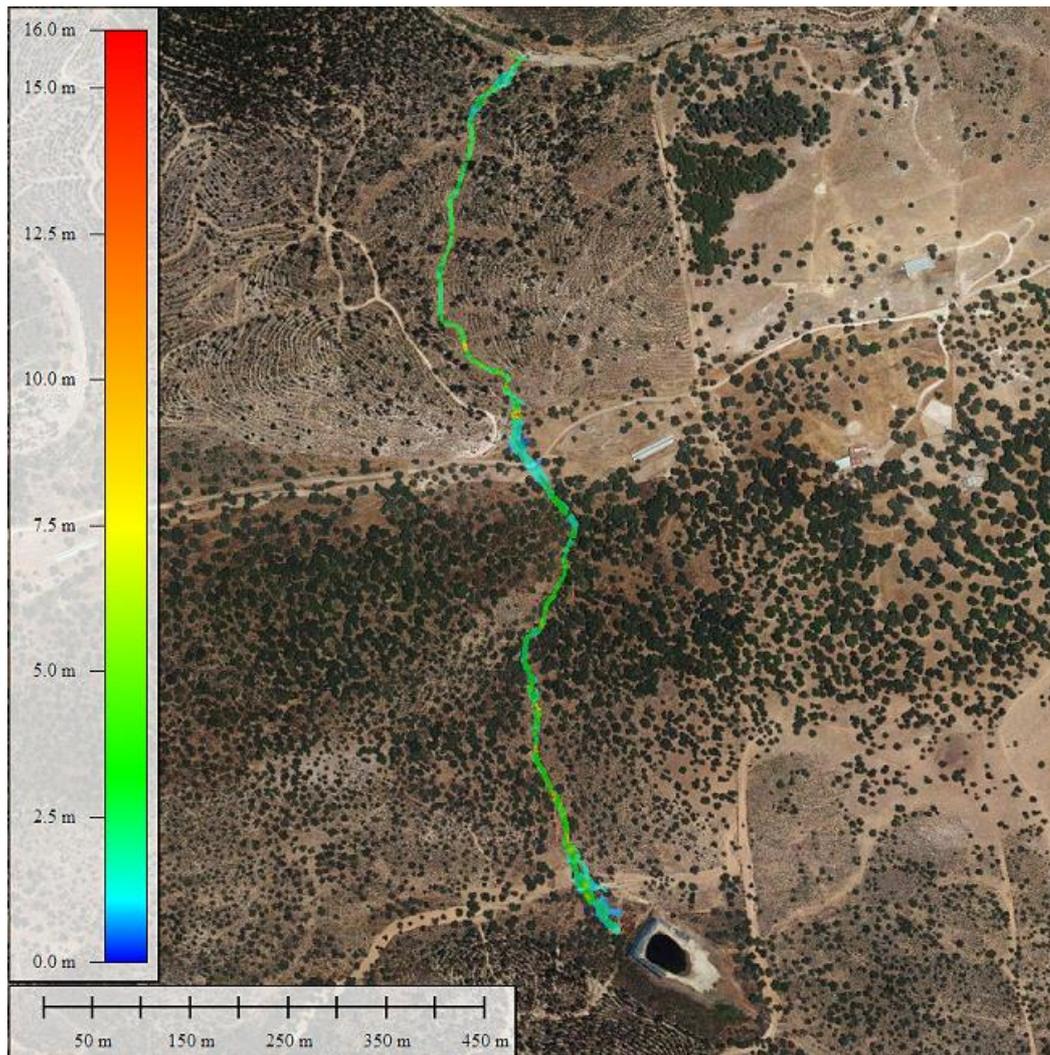


Figura 5-14. Mapa de velocidades máximas en el escenario de avenida en régimen natural.

Los resultados incrementales en régimen natural, obtenidos en el punto afectado, se corresponden con un calado máximo alcanzado de 0,55 m y una velocidad máxima de 1,4 m/s. Por tanto, la existencia de la presa y la consecuencia de la rotura en caso de avenida supondría un aumento de hasta 1,05 metros de calado y 2,16 m/s de velocidades.

5.3. Clasificación de la presa

5.3.1. En función de sus dimensiones

Atendiendo a las definiciones explicadas en el apartado 3.3.1, la altura de la presa es 6,70 m y tiene una capacidad de 12.594 m³, por tanto, según los criterios analizados en dicho apartado, la presa objeto de estudio se clasifica como pequeña presa.

5.3.2. En función del riesgo potencial de rotura

Para poder determinar la clasificación de la presa Tejarejos en función del riesgo potencial de su rotura, se deben analizar los umbrales de calados y velocidades para los cuatro grupos analizados en el apartado 3.3.2.

No se tienen afecciones a núcleos de población o viviendas aisladas. De la misma forma, tampoco se producen afecciones a servicios esenciales ni a aspectos medioambientales, histórico-artísticos y culturales.

La afección al Camino del Jabugillo, entendiéndose como una vía de comunicación, se puede englobar en la

categoría de daños materiales. Al ser este un camino rural, de baja categoría cuyo daño no se puede cuantificar, se deriva de esta afección la categoría C para la presa Tejarejos.

No es necesario en este caso diferenciar entre los resultados de los diferentes escenarios debido a la definición de la tipología de vía de comunicación a la que corresponde la única afección que se produce debido a la avenida de la llanura de inundación.

5.3.3. Propuesta de clasificación

En base a los criterios establecidos en el presente documento, siguiendo las recomendaciones de la Guía Técnica para la Clasificación de Presas, se propone la siguiente clasificación de la presa objeto de estudio:

- En función de sus dimensiones, la presa se clasifica como **pequeña presa**.
- Según la evaluación del riesgo potencial que pueda derivarse de su rotura, la presa se clasifica dentro de la **categoría C**.

6 CONCLUSIONES

La presente memoria ha expuesto la metodología a aplicar en la clasificación de una presa según el nuevo Real Decreto 264/2021. Para ello, se ha expuesto en la misma y en sus diferentes apéndices la documentación suficiente para el establecimiento de la clasificación de la presa objeto de estudio, teniendo en cuenta sus dimensiones y el riesgo potencial que pueda derivarse de su rotura.

La motivación para realizar este trabajo parte de que la Directriz Básica de Planificación Civil ante el riesgo de inundaciones y el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses introducen la obligatoriedad de clasificar las presas en función del riesgo potencial derivado de su posible rotura o funcionamiento incorrecto. Además, la clasifica en tres categorías: en función de las posibles afecciones a la población, a servicios esenciales y a bienes materiales y medioambientales:

- Categoría A: presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto pueda afectar gravemente a núcleos urbanos o servicios esenciales, o producir daños materiales o medioambientales muy importantes.
- Categoría B: presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto pueda ocasionar daños materiales o medioambientales importantes o afectar a un reducido número de viviendas.
- Categoría C: presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto pueda producir daños materiales de moderada importancia y sólo incidentalmente pérdida de vidas humanas. Pertenecerán a esta categoría las presas no incluidas en las Categorías A o B.

A fecha de publicación de las Normas Técnicas de Seguridad de presas y sus embalses, en el ámbito de la Administración General del Estado, se disponían de los siguientes datos:

- 2.000 presas y balsas clasificadas, 915 A o B
 - 1.350 presas clasificadas, 750 A o B, 350 pequeñas presas C aproximadamente.
- 435 planes de emergencia aprobados (incluyendo balsas)
- 130 planes de emergencia implantados (incluyendo balsas)

La Guía Técnica para la Clasificación de Presas en función del riesgo potencial tiene por objeto establecer los criterios de clasificación de presas y plantear una metodología general y el contenido mínimo que debe acompañar a la propuesta de clasificación. En ella, se establecen los criterios básicos de valoración de las afecciones y para el análisis de las roturas potenciales, en función de los diferentes escenarios de rotura.

En base a esta guía, en el presente trabajo se elabora una metodología de análisis para el desarrollo de la propuesta de clasificación de presas. Esta metodología, que es lo suficientemente completa debido a que presenta toda la información conveniente establecida en la Guía Técnica, es válida para la aplicación en cualquier presa del territorio español.

Los datos necesarios para la realización de los cálculos y el modelo hidráulico que permitirán llevar a cabo el proceso para la elaboración de la presente propuesta de clasificación han sido obtenidos de fuentes que se encuentran a disposición de la población por parte de los organismos públicos. Esto supone una gran

ventaja a la hora de elaborar este tipo de documentos, especialmente importante teniendo en cuenta el carácter obligatorio para los titulares de las presas.

No obstante, es necesario tratar los datos para poder emplearlos en los cálculos necesarios. Este es el caso, por ejemplo, de la capa de usos de suelos, en la que hay que asociar el valor de número de Manning al atributo de uso de suelo para cada polígono, por lo que no es posible su empleo directo sin un tratamiento previo. Asimismo, se presentan datos de precipitación asociados a determinados años de periodo de retorno, por lo que, para el caso de estudio, en el que se precisa analizar una tormenta asociada a un periodo de retorno más elevado de la que no se dispone información, ha sido necesario estimar dicha precipitación a partir de los periodos de retorno de lo que se disponen datos.

Por otro lado, en muchas ocasiones no se tiene información de la geometría del vaso del embalse, especialmente en balsas y presas de pequeño tamaño, por lo que es necesario estimar dicha geometría y realizar modificaciones en el modelo digital del terreno para poder modelizar el comportamiento del agua contenido dentro del mismo de la manera más realista posible.

Otra ventaja a la hora de elaborar esta propuesta de clasificación ha sido el empleo de los diferentes softwares tanto para el tratamiento de los datos como para la elaboración del modelo. En el caso del tratamiento de los datos se ha empleado QGIS, un Sistema de Información Geográfica libre y de código abierto que soporta abundantes formatos y utilidades de datos vectoriales, ráster y bases de datos. Para la realización del modelo, se ha empleado el software HEC-RAS-2D, un software desarrollado por *U.S Army Corps of Engineers* (USACE) puesto a disposición del público siempre que sea apropiado, que permite hacer modelizaciones en 2D.

Además, HEC-RAS 2D permite hacer todas las simulaciones necesarias en un único modelo hidráulico, lo que supone una gran ventaja en el caso de las propuestas de clasificación en las que son necesarias realizar hasta tres simulaciones para los tres escenarios diferentes.

Sin embargo, es necesario poseer unos conocimientos mínimos para poder realizar un modelo de esta envergadura, no solo para su elaboración, con el establecimiento de los diferentes parámetros tanto hidráulicos como de modelado de elementos finitos y la propia modelización, sino para el análisis posterior de los resultados.

Aunque la metodología planteada sea lo suficientemente estructurada y clara para permitir realizar la clasificación en cualquier presa del territorio español, y los datos necesarios para llevarla a cabo estén a disposición de la población, el proceso no resulta automático debido a las diferentes tomas de decisiones y a las múltiples tareas que se requieren para realizarlo.

Los resultados del proceso llevado a cabo en el presente trabajo han sido unos mapas de calados y velocidades correspondientes a las diferentes llanuras de inundación asociados a los diferentes escenarios planteados, para una avenida de 1000 años de periodo de retorno.

Para analizar dichos resultados, se han localizado los posibles puntos de afección de la llanura de inundación, estudiándolos según las evaluaciones listadas en la Guía, que son las posibles afecciones siguientes:

- Núcleos de población o viviendas aisladas.
- Servicios esenciales.
- Daños materiales.
- Aspectos medioambientales, histórico-artísticos o culturales.

De esta forma se evalúan los daños potenciales para cada uno de estos grupos, correspondiendo la categoría de la presa a la categoría máxima asignada a cada uno de los aspectos individuales, sin estudiar posibles combinaciones de ellos, analizando en primer lugar si se produce o no afección y si dicha afección, en caso de producirse, es grave o no, determinando posteriormente la categoría de clasificación en función del número, extensión o catalogación de los mismos en base a los umbrales marcados.

De esta forma, aunque en un inicio se estimaron dos posibles puntos de afección, se tiene finalmente que tan solo se produce un punto de afección, correspondiente al Camino del Jabugillo, en el que se obtienen

calados de 1,39 m y 1,6 m y velocidades de 3,03 m/s y 3,56 m/s para el escenario de rotura sin avenida y el escenario límite respectivamente.

Se ha englobado esta afección dentro de la clase de daños materiales, considerándose este camino de baja categoría al ser un camino rural, cuyo daño no se puede cuantificar, por lo que, al no presentar adicionalmente afecciones a núcleos de población o viviendas aisladas, así como a servicios esenciales ni a aspectos medioambientales, histórico-artísticos y culturales, se deriva de esta afección la categoría C para la presa objeto de estudio.

Aunque a priori se pueda realizar una primera estimación de la categoría de la presa debido a la categoría de camino rural del punto de afección, es necesario realizar el proceso completo de la propuesta de clasificación correspondiente a la metodología planteada debido a que es de vital importancia comprobar que no se produzca ninguna afección adicional no contemplada a priori, o en este caso, comprobar si el segundo punto de afección estimado en un análisis cualitativo inicial es o no un punto de afección real de la avenida de inundación asociada a la rotura de la presa.

Por otro lado, es importante considerar que es necesaria la clasificación de la presa objeto de estudio debido a que todas las presas tienen la obligación de ser clasificadas según la normativa actual.

Con todo esto, se concluye que con la presente propuesta de clasificación se pueda continuar el trámite en el organismo competente, sometiéndola a su aprobación para que la Administración pueda dictar la resolución administrativa por la que la Presa Tejarejos se clasifica como pequeña presa dentro de la categoría C.

Como la categoría resultante de la clasificación de la presa objeto de estudio no es A o B, no es objeto de elaboración del Plan de Emergencia correspondiente. No obstante, el titular de la presa se verá obligado a valorar si es necesario revisar su clasificación debido a que ésta se encuentra dentro de la clasificación C.

APÉNDICE I. HIETOGRAMAS E HIDROGRAMAS

Hietograma de diseño

Tabla 1. Hietograma de diseño de la cuenca de aportación al embalse para la avenida de 1000 años de periodo de retorno.

Tiempo (min)	P (mm)	Pacum (mm)	Ia acum (mm)	Fa acum (mm)	Pe acum (mm)	P (mm)	Abstracciones (mm)
5	0,168	0,168	0,168	0,000	0,000	0,000	0,168
10	0,169	0,338	0,338	0,000	0,000	0,000	0,169
15	0,171	0,508	0,508	0,000	0,000	0,000	0,171
20	0,172	0,680	0,680	0,000	0,000	0,000	0,172
25	0,173	0,854	0,854	0,000	0,000	0,000	0,173
30	0,175	1,028	1,028	0,000	0,000	0,000	0,175
35	0,176	1,204	1,204	0,000	0,000	0,000	0,176
40	0,177	1,381	1,381	0,000	0,000	0,000	0,177
45	0,179	1,560	1,560	0,000	0,000	0,000	0,179
50	0,180	1,740	1,740	0,000	0,000	0,000	0,180
55	0,182	1,922	1,922	0,000	0,000	0,000	0,182
60	0,183	2,105	2,105	0,000	0,000	0,000	0,183
65	0,184	2,289	2,289	0,000	0,000	0,000	0,184
70	0,186	2,475	2,475	0,000	0,000	0,000	0,186
75	0,187	2,663	2,663	0,000	0,000	0,000	0,187
80	0,189	2,852	2,852	0,000	0,000	0,000	0,189
85	0,191	3,042	3,042	0,000	0,000	0,000	0,191
90	0,192	3,234	3,234	0,000	0,000	0,000	0,192
95	0,194	3,428	3,428	0,000	0,000	0,000	0,194
100	0,195	3,623	3,623	0,000	0,000	0,000	0,195
105	0,197	3,820	3,820	0,000	0,000	0,000	0,197
110	0,199	4,019	4,019	0,000	0,000	0,000	0,199
115	0,200	4,219	4,219	0,000	0,000	0,000	0,200

Tiempo (min)	P (mm)	Pacum (mm)	Ia acum (mm)	Fa acum (mm)	Pe acum (mm)	P (mm)	Abstracciones (mm)
120	0,202	4,421	4,421	0,000	0,000	0,000	0,202
125	0,204	4,625	4,625	0,000	0,000	0,000	0,204
130	0,206	4,830	4,830	0,000	0,000	0,000	0,206
135	0,207	5,038	5,038	0,000	0,000	0,000	0,207
140	0,209	5,247	5,247	0,000	0,000	0,000	0,209
145	0,211	5,458	5,458	0,000	0,000	0,000	0,211
150	0,213	5,671	5,671	0,000	0,000	0,000	0,213
155	0,215	5,886	5,886	0,000	0,000	0,000	0,215
160	0,217	6,102	6,102	0,000	0,000	0,000	0,217
165	0,219	6,321	6,321	0,000	0,000	0,000	0,219
170	0,221	6,542	6,542	0,000	0,000	0,000	0,221
175	0,223	6,765	6,765	0,000	0,000	0,000	0,223
180	0,225	6,990	6,990	0,000	0,000	0,000	0,225
185	0,227	7,217	7,217	0,000	0,000	0,000	0,227
190	0,229	7,446	7,446	0,000	0,000	0,000	0,229
195	0,231	7,677	7,677	0,000	0,000	0,000	0,231
200	0,234	7,911	7,911	0,000	0,000	0,000	0,234
205	0,236	8,147	8,147	0,000	0,000	0,000	0,236
210	0,238	8,385	8,385	0,000	0,000	0,000	0,238
215	0,241	8,626	8,626	0,000	0,000	0,000	0,241
220	0,243	8,869	8,869	0,000	0,000	0,000	0,243
225	0,245	9,114	9,114	0,000	0,000	0,000	0,245
230	0,248	9,362	9,362	0,000	0,000	0,000	0,248
235	0,250	9,612	9,612	0,000	0,000	0,000	0,250
240	0,253	9,865	9,865	0,000	0,000	0,000	0,253
245	0,256	10,121	10,121	0,000	0,000	0,000	0,256
250	0,258	10,379	10,379	0,000	0,000	0,000	0,258
255	0,261	10,640	10,640	0,000	0,000	0,000	0,261
260	0,264	10,904	10,904	0,000	0,000	0,000	0,264

Tiempo (min)	P (mm)	Pacum (mm)	Ia acum (mm)	Fa acum (mm)	Pe acum (mm)	P (mm)	Abstracciones (mm)
265	0,267	11,171	11,171	0,000	0,000	0,000	0,267
270	0,270	11,440	11,440	0,000	0,000	0,000	0,270
275	0,273	11,713	11,713	0,000	0,000	0,000	0,273
280	0,276	11,988	11,988	0,000	0,000	0,000	0,276
285	0,279	12,267	12,267	0,000	0,000	0,000	0,279
290	0,282	12,549	12,549	0,000	0,000	0,000	0,282
295	0,285	12,834	12,834	0,000	0,000	0,000	0,285
300	0,288	13,122	13,122	0,000	0,000	0,000	0,288
305	0,292	13,414	13,414	0,000	0,000	0,000	0,292
310	0,295	13,709	13,709	0,000	0,000	0,000	0,295
315	0,299	14,007	14,007	0,000	0,000	0,000	0,299
320	0,302	14,309	14,309	0,000	0,000	0,000	0,302
325	0,306	14,615	14,615	0,000	0,000	0,000	0,306
330	0,309	14,924	14,924	0,000	0,000	0,000	0,309
335	0,313	15,238	15,238	0,000	0,000	0,000	0,313
340	0,317	15,555	15,555	0,000	0,000	0,000	0,317
345	0,321	15,876	15,876	0,000	0,000	0,000	0,321
350	0,325	16,201	16,201	0,000	0,000	0,000	0,325
355	0,330	16,531	16,531	0,000	0,000	0,000	0,330
360	0,334	16,865	16,865	0,000	0,000	0,000	0,334
365	0,338	17,203	17,203	0,000	0,000	0,000	0,338
370	0,343	17,546	17,546	0,000	0,000	0,000	0,343
375	0,347	17,893	17,893	0,000	0,000	0,000	0,347
380	0,352	18,245	18,245	0,000	0,000	0,000	0,352
385	0,357	18,602	18,602	0,000	0,000	0,000	0,357
390	0,362	18,964	18,964	0,000	0,000	0,000	0,362
395	0,367	19,332	19,332	0,000	0,000	0,000	0,367
400	0,372	19,704	19,704	0,000	0,000	0,000	0,372
405	0,378	20,082	20,082	0,000	0,000	0,000	0,378

Tiempo (min)	P (mm)	Pacum (mm)	Ia acum (mm)	Fa acum (mm)	Pe acum (mm)	P (mm)	Abstracciones (mm)
410	0,384	20,466	20,466	0,000	0,000	0,000	0,384
415	0,389	20,855	20,855	0,000	0,000	0,000	0,389
420	0,395	21,250	21,250	0,000	0,000	0,000	0,395
425	0,401	21,651	21,651	0,000	0,000	0,000	0,401
430	0,408	22,059	22,059	0,000	0,000	0,000	0,408
435	0,414	22,473	22,473	0,000	0,000	0,000	0,414
440	0,421	22,894	22,717	0,177	0,000	0,000	0,420
445	0,428	23,321	22,717	0,601	0,003	0,003	0,425
450	0,435	23,756	22,717	1,030	0,009	0,006	0,428
455	0,442	24,198	22,717	1,462	0,019	0,010	0,432
460	0,450	24,647	22,717	1,898	0,032	0,013	0,436
465	0,457	25,105	22,717	2,339	0,049	0,017	0,440
470	0,465	25,570	22,717	2,784	0,070	0,021	0,445
475	0,474	26,044	22,717	3,233	0,095	0,025	0,449
480	0,483	26,527	22,717	3,686	0,124	0,029	0,454
485	0,492	27,018	22,717	4,145	0,157	0,033	0,458
490	0,501	27,519	22,717	4,608	0,195	0,038	0,463
495	0,511	28,030	22,717	5,075	0,237	0,043	0,468
500	0,521	28,550	22,717	5,548	0,285	0,048	0,473
505	0,531	29,081	22,717	6,027	0,338	0,053	0,478
510	0,542	29,623	22,717	6,511	0,396	0,058	0,484
515	0,553	30,176	22,717	7,000	0,460	0,064	0,489
520	0,565	30,741	22,717	7,495	0,530	0,070	0,495
525	0,577	31,319	22,717	7,996	0,606	0,076	0,501
530	0,590	31,909	22,717	8,504	0,688	0,083	0,508
535	0,604	32,512	22,717	9,018	0,778	0,090	0,514
540	0,618	33,130	22,717	9,539	0,875	0,097	0,521
545	0,632	33,762	22,717	10,067	0,979	0,104	0,528
550	0,648	34,410	22,717	10,602	1,092	0,113	0,535

Tiempo (min)	P (mm)	Pacum (mm)	Ia acum (mm)	Fa acum (mm)	Pe acum (mm)	P (mm)	Abstracciones (mm)
555	0,664	35,074	22,717	11,145	1,213	0,121	0,543
560	0,681	35,756	22,717	11,696	1,343	0,130	0,551
565	0,699	36,455	22,717	12,256	1,482	0,140	0,559
570	0,718	37,173	22,717	12,824	1,632	0,150	0,568
575	0,738	37,911	22,717	13,401	1,793	0,161	0,578
580	0,759	38,670	22,717	13,989	1,965	0,172	0,587
585	0,782	39,452	22,717	14,586	2,149	0,184	0,597
590	0,806	40,258	22,717	15,195	2,347	0,197	0,608
595	0,831	41,089	22,717	15,814	2,558	0,211	0,620
600	0,858	41,947	22,717	16,446	2,784	0,226	0,632
605	0,887	42,835	22,717	17,091	3,027	0,243	0,645
610	0,919	43,753	22,717	17,749	3,287	0,260	0,658
615	0,952	44,705	22,717	18,422	3,566	0,279	0,673
620	0,988	45,693	22,717	19,111	3,866	0,300	0,689
625	1,028	46,721	22,717	19,816	4,188	0,322	0,706
630	1,070	47,791	22,717	20,540	4,534	0,346	0,724
635	1,117	48,908	22,717	21,283	4,908	0,373	0,743
640	1,168	50,076	22,717	22,048	5,311	0,403	0,765
645	1,224	51,300	22,717	22,836	5,747	0,436	0,788
650	1,287	52,586	22,717	23,650	6,219	0,473	0,814
655	1,356	53,942	22,717	24,492	6,733	0,514	0,842
660	1,435	55,377	22,717	25,366	7,294	0,561	0,874
665	1,524	56,901	22,717	26,276	7,908	0,614	0,910
670	1,626	58,527	22,717	27,226	8,584	0,676	0,950
675	1,745	60,271	22,717	28,223	9,332	0,748	0,997
680	1,884	62,156	22,717	29,274	10,165	0,833	1,051
685	2,052	64,207	22,717	30,390	11,101	0,936	1,115
690	2,257	66,464	22,717	31,583	12,164	1,063	1,193
695	2,516	68,980	22,717	32,874	13,390	1,225	1,291

Tiempo (min)	P (mm)	Pacum (mm)	Ia acum (mm)	Fa acum (mm)	Pe acum (mm)	P (mm)	Abstracciones (mm)
700	2,856	71,836	22,717	34,291	14,829	1,439	1,417
705	3,328	75,165	22,717	35,880	16,568	1,739	1,590
710	4,043	79,208	22,717	37,727	18,764	2,196	1,847
715	5,307	84,515	22,717	40,023	21,776	3,012	2,295
720	8,593	93,108	22,717	43,459	26,933	5,157	3,436
725	18,328	111,437	22,717	49,812	38,908	11,975	6,353
730	6,449	117,885	22,717	51,782	43,387	4,479	1,970
735	4,569	122,455	22,717	53,106	46,632	3,246	1,324
740	3,644	126,099	22,717	54,121	49,261	2,628	1,016
745	3,071	129,170	22,717	54,951	51,502	2,241	0,830
750	2,674	131,843	22,717	55,655	53,472	1,970	0,704
755	2,378	134,222	22,717	56,267	55,238	1,766	0,612
760	2,149	136,371	22,717	56,809	56,845	1,607	0,542
765	1,964	138,334	22,717	57,296	58,322	1,477	0,486
770	1,811	140,146	22,717	57,737	59,692	1,370	0,441
775	1,683	141,829	22,717	58,141	60,971	1,279	0,404
780	1,573	143,402	22,717	58,513	62,172	1,201	0,372
785	1,478	144,880	22,717	58,858	63,305	1,133	0,345
790	1,394	146,274	22,717	59,180	64,377	1,073	0,322
795	1,320	147,594	22,717	59,481	65,396	1,019	0,301
800	1,254	148,849	22,717	59,765	66,368	0,971	0,283
805	1,195	150,044	22,717	60,032	67,296	0,928	0,267
810	1,142	151,186	22,717	60,284	68,185	0,889	0,253
815	1,093	152,279	22,717	60,524	69,038	0,853	0,240
820	1,048	153,327	22,717	60,752	69,859	0,821	0,228
825	1,008	154,334	22,717	60,969	70,649	0,790	0,217
830	0,970	155,304	22,717	61,176	71,412	0,763	0,207
835	0,935	156,239	22,717	61,374	72,148	0,737	0,198
840	0,903	157,142	22,717	61,564	72,861	0,713	0,190

Tiempo (min)	P (mm)	Pacum (mm)	Ia acum (mm)	Fa acum (mm)	Pe acum (mm)	P (mm)	Abstracciones (mm)
845	0,873	158,015	22,717	61,747	73,551	0,690	0,182
850	0,845	158,859	22,717	61,922	74,220	0,669	0,175
855	0,818	159,677	22,717	62,091	74,870	0,650	0,169
860	0,794	160,471	22,717	62,253	75,501	0,631	0,163
865	0,770	161,241	22,717	62,410	76,115	0,614	0,157
870	0,749	161,990	22,717	62,562	76,712	0,597	0,151
875	0,728	162,718	22,717	62,708	77,293	0,581	0,146
880	0,708	163,426	22,717	62,850	77,860	0,567	0,142
885	0,690	164,116	22,717	62,987	78,413	0,553	0,137
890	0,672	164,789	22,717	63,120	78,952	0,539	0,133
895	0,656	165,445	22,717	63,249	79,479	0,527	0,129
900	0,640	166,085	22,717	63,375	79,993	0,515	0,125
905	0,625	166,710	22,717	63,496	80,496	0,503	0,122
910	0,611	167,320	22,717	63,615	80,989	0,492	0,118
915	0,597	167,917	22,717	63,730	81,470	0,482	0,115
920	0,584	168,501	22,717	63,842	81,942	0,471	0,112
925	0,571	169,072	22,717	63,952	82,403	0,462	0,109
930	0,559	169,631	22,717	64,058	82,856	0,453	0,107
935	0,548	170,178	22,717	64,162	83,300	0,444	0,104
940	0,536	170,715	22,717	64,263	83,735	0,435	0,101
945	0,526	171,240	22,717	64,362	84,162	0,427	0,099
950	0,516	171,756	22,717	64,459	84,580	0,419	0,097
955	0,506	172,262	22,717	64,553	84,992	0,411	0,094
960	0,496	172,758	22,717	64,646	85,396	0,404	0,092
965	0,487	173,245	22,717	64,736	85,792	0,397	0,090
970	0,478	173,723	22,717	64,824	86,182	0,390	0,088
975	0,470	174,193	22,717	64,911	86,565	0,383	0,086
980	0,461	174,654	22,717	64,995	86,942	0,377	0,085
985	0,453	175,107	22,717	65,078	87,313	0,371	0,083

Tiempo (min)	P (mm)	Pacum (mm)	Ia acum (mm)	Fa acum (mm)	Pe acum (mm)	P (mm)	Abstracciones (mm)
990	0,446	175,553	22,717	65,159	87,677	0,365	0,081
995	0,438	175,991	22,717	65,239	88,036	0,359	0,080
1000	0,431	176,423	22,717	65,317	88,389	0,353	0,078
1005	0,424	176,847	22,717	65,393	88,737	0,348	0,076
1010	0,417	177,264	22,717	65,468	89,079	0,342	0,075
1015	0,411	177,675	22,717	65,542	89,416	0,337	0,074
1020	0,404	178,079	22,717	65,614	89,749	0,332	0,072
1025	0,398	178,477	22,717	65,685	90,076	0,327	0,071
1030	0,392	178,870	22,717	65,754	90,398	0,323	0,070
1035	0,386	179,256	22,717	65,823	90,716	0,318	0,068
1040	0,381	179,637	22,717	65,890	91,030	0,313	0,067
1045	0,375	180,012	22,717	65,956	91,339	0,309	0,066
1050	0,370	180,382	22,717	66,021	91,644	0,305	0,065
1055	0,365	180,746	22,717	66,085	91,945	0,301	0,064
1060	0,360	181,106	22,717	66,148	92,241	0,297	0,063
1065	0,355	181,460	22,717	66,209	92,534	0,293	0,062
1070	0,350	181,810	22,717	66,270	92,823	0,289	0,061
1075	0,345	182,155	22,717	66,330	93,109	0,285	0,060
1080	0,340	182,496	22,717	66,389	93,390	0,282	0,059
1085	0,336	182,832	22,717	66,447	93,668	0,278	0,058
1090	0,332	183,163	22,717	66,504	93,943	0,275	0,057
1095	0,327	183,491	22,717	66,560	94,214	0,271	0,056
1100	0,323	183,814	22,717	66,615	94,482	0,268	0,055
1105	0,319	184,133	22,717	66,670	94,747	0,265	0,055
1110	0,315	184,448	22,717	66,724	95,008	0,262	0,054
1115	0,311	184,760	22,717	66,777	95,267	0,258	0,053
1120	0,308	185,067	22,717	66,829	95,522	0,255	0,052
1125	0,304	185,371	22,717	66,880	95,774	0,252	0,051
1130	0,300	185,672	22,717	66,931	96,024	0,250	0,051

Tiempo (min)	P (mm)	Pacum (mm)	Ia acum (mm)	Fa acum (mm)	Pe acum (mm)	P (mm)	Abstracciones (mm)
1135	0,297	185,968	22,717	66,981	96,271	0,247	0,050
1140	0,293	186,262	22,717	67,030	96,515	0,244	0,049
1145	0,290	186,552	22,717	67,079	96,756	0,241	0,049
1150	0,287	186,838	22,717	67,127	96,995	0,239	0,048
1155	0,283	187,121	22,717	67,174	97,231	0,236	0,047
1160	0,280	187,402	22,717	67,221	97,464	0,233	0,047
1165	0,277	187,679	22,717	67,267	97,695	0,231	0,046
1170	0,274	187,953	22,717	67,313	97,924	0,229	0,046
1175	0,271	188,224	22,717	67,358	98,150	0,226	0,045
1180	0,268	188,492	22,717	67,402	98,373	0,224	0,044
1185	0,265	188,757	22,717	67,446	98,595	0,221	0,044
1190	0,262	189,020	22,717	67,489	98,814	0,219	0,043
1195	0,260	189,279	22,717	67,532	99,031	0,217	0,043
1200	0,257	189,536	22,717	67,574	99,246	0,215	0,042
1205	0,254	189,791	22,717	67,616	99,458	0,213	0,042
1210	0,252	190,042	22,717	67,657	99,669	0,211	0,041
1215	0,249	190,291	22,717	67,697	99,877	0,208	0,041
1220	0,247	190,538	22,717	67,738	100,084	0,206	0,040
1225	0,244	190,782	22,717	67,777	100,288	0,204	0,040
1230	0,242	191,024	22,717	67,817	100,491	0,202	0,039
1235	0,239	191,263	22,717	67,856	100,691	0,201	0,039
1240	0,237	191,500	22,717	67,894	100,890	0,199	0,038
1245	0,235	191,735	22,717	67,932	101,087	0,197	0,038
1250	0,233	191,968	22,717	67,969	101,282	0,195	0,038
1255	0,230	192,198	22,717	68,007	101,475	0,193	0,037
1260	0,228	192,426	22,717	68,043	101,666	0,191	0,037
1265	0,226	192,652	22,717	68,080	101,856	0,190	0,036
1270	0,224	192,876	22,717	68,115	102,044	0,188	0,036
1275	0,222	193,098	22,717	68,151	102,230	0,186	0,036

Tiempo (min)	P (mm)	Pacum (mm)	Ia acum (mm)	Fa acum (mm)	Pe acum (mm)	P (mm)	Abstracciones (mm)
1280	0,220	193,317	22,717	68,186	102,415	0,185	0,035
1285	0,218	193,535	22,717	68,221	102,598	0,183	0,035
1290	0,216	193,751	22,717	68,255	102,779	0,181	0,034
1295	0,214	193,965	22,717	68,289	102,959	0,180	0,034
1300	0,212	194,177	22,717	68,323	103,137	0,178	0,034
1305	0,210	194,387	22,717	68,356	103,314	0,177	0,033
1310	0,208	194,595	22,717	68,389	103,489	0,175	0,033
1315	0,206	194,802	22,717	68,422	103,663	0,174	0,033
1320	0,205	195,006	22,717	68,454	103,835	0,172	0,032
1325	0,203	195,209	22,717	68,486	104,006	0,171	0,032
1330	0,201	195,410	22,717	68,518	104,176	0,169	0,032
1335	0,199	195,610	22,717	68,549	104,344	0,168	0,031
1340	0,198	195,808	22,717	68,580	104,511	0,167	0,031
1345	0,196	196,004	22,717	68,611	104,676	0,165	0,031
1350	0,194	196,198	22,717	68,642	104,840	0,164	0,030
1355	0,193	196,391	22,717	68,672	105,003	0,163	0,030
1360	0,191	196,582	22,717	68,702	105,164	0,161	0,030
1365	0,190	196,772	22,717	68,731	105,324	0,160	0,030
1370	0,188	196,960	22,717	68,761	105,483	0,159	0,029
1375	0,187	197,147	22,717	68,790	105,641	0,158	0,029
1380	0,185	197,332	22,717	68,818	105,797	0,156	0,029
1385	0,184	197,516	22,717	68,847	105,952	0,155	0,029
1390	0,182	197,698	22,717	68,875	106,106	0,154	0,028
1395	0,181	197,879	22,717	68,903	106,259	0,153	0,028
1400	0,179	198,058	22,717	68,931	106,411	0,152	0,028
1405	0,178	198,236	22,717	68,958	106,561	0,151	0,027
1410	0,177	198,413	22,717	68,986	106,711	0,149	0,027
1415	0,175	198,588	22,717	69,013	106,859	0,148	0,027
1420	0,174	198,762	22,717	69,039	107,006	0,147	0,027

Tiempo (min)	P (mm)	Pacum (mm)	Ia acum (mm)	Fa acum (mm)	Pe acum (mm)	P (mm)	Abstracciones (mm)
1425	0,173	198,935	22,717	69,066	107,152	0,146	0,027
1430	0,171	199,106	22,717	69,092	107,297	0,145	0,026
1435	0,170	199,276	22,717	69,118	107,441	0,144	0,026
1440	0,169	199,445	22,717	69,144	107,584	0,143	0,026

Hidrograma de diseño

Tabla I-2. Hidrograma de diseño de la cuenca de aportación al embalse para la avenida de 1000 años de periodo de retorno.

t (s)	Q (m³/s)	t (s)	Q (m³/s)	t (s)	Q (m³/s)
0	0,000	20400	1,513	40500	0,288
300	0,001	20700	1,407	40800	0,285
600	0,002	21000	1,318	41100	0,282
900	0,005	21300	1,242	41400	0,278
1200	0,008	21600	1,174	41700	0,275
1500	0,011	21900	1,115	42000	0,272
1800	0,015	22200	1,062	42300	0,269
2100	0,019	22500	1,014	42600	0,266
2400	0,023	22800	0,971	42900	0,263
2700	0,028	23100	0,932	43200	0,260
3000	0,032	23400	0,896	43500	0,257
3300	0,037	23700	0,863	43800	0,254
3600	0,042	24000	0,832	44100	0,252
3900	0,047	24300	0,804	44400	0,249
4200	0,053	24600	0,777	44700	0,246
4500	0,058	24900	0,753	45000	0,244
4800	0,064	25200	0,730	45300	0,241
5100	0,070	25500	0,708	45600	0,239
5400	0,077	25800	0,688	45900	0,236
5700	0,084	26100	0,669	46200	0,234

t (s)	Q (m ³ /s)	t (s)	Q (m ³ /s)	t (s)	Q (m ³ /s)
6000	0,091	26400	0,651	46500	0,232
6300	0,099	26700	0,634	46800	0,229
6600	0,107	27000	0,618	47100	0,227
6900	0,115	27300	0,602	47400	0,225
7200	0,124	27600	0,588	47700	0,223
7500	0,133	27900	0,574	48000	0,221
7800	0,143	28200	0,561	48300	0,219
8100	0,154	28500	0,548	48600	0,217
8400	0,165	28800	0,536	48900	0,214
8700	0,177	29100	0,525	49200	0,213
9000	0,190	29400	0,514	49500	0,211
9300	0,203	29700	0,503	49800	0,209
9600	0,217	30000	0,493	50100	0,207
9900	0,233	30300	0,483	50400	0,205
10200	0,250	30600	0,474	50700	0,203
10500	0,268	30900	0,465	51000	0,201
10800	0,287	31200	0,456	51300	0,199
11100	0,308	31500	0,448	51600	0,198
11400	0,331	31800	0,440	51900	0,196
11700	0,355	32100	0,432	52200	0,194
12000	0,383	32400	0,425	52500	0,193
12300	0,413	32700	0,418	52800	0,191
12600	0,446	33000	0,411	53100	0,189
12900	0,483	33300	0,404	53400	0,188
13200	0,524	33600	0,397	53700	0,186
13500	0,570	33900	0,391	54000	0,185
13800	0,623	34200	0,385	54300	0,183
14100	0,684	34500	0,379	54600	0,182
14400	0,754	34800	0,373	54900	0,180

t (s)	Q (m ³ /s)	t (s)	Q (m ³ /s)	t (s)	Q (m ³ /s)
14700	0,837	35100	0,367	55200	0,179
15000	0,936	35400	0,362	55500	0,177
15300	1,057	35700	0,357	55800	0,176
15600	1,209	36000	0,352	56100	0,175
15900	1,409	36300	0,347	56400	0,173
16200	1,684	36600	0,342	56700	0,172
16500	2,103	36900	0,337	57000	0,170
16800	2,903	37200	0,332	57300	0,169
17100	4,970	37500	0,328	57600	0,168
17400	7,197	37800	0,323	57900	0,167
17700	6,811	38100	0,319	58200	0,165
18000	5,210	38400	0,315	58500	0,164
18300	4,044	38700	0,311	58800	0,163
18600	3,236	39000	0,307	59100	0,162
18900	2,684	39300	0,303	59400	0,160
19200	2,299	39600	0,299	59700	0,159
19500	2,020	39900	0,296	60000	0,158
19800	1,811	40200	0,292	40500	0,288
20100	1,643	20400	1,513	40800	0,285

APÉNDICE II. METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA RUGOSIDAD

Introducción

Es reconocida la importancia de la tensión tangencial debida al rozamiento con el contorno en la estimación de las variables hidráulicas, así como que la incertidumbre en su parametrización es una importante fuente de error en la modelización de un tramo de río. Las pérdidas de carga por fricción en el cauce están relacionadas fundamentalmente con la composición del material del lecho, puesto que lo normal es que sobre el cauce no esté desarrollado ningún tipo de uso del suelo y, en aquellos casos en que exista, con la vegetación acuática o riparia. En cambio, en las llanuras de inundación, el territorio suele estar ocupado por usos diversos, por lo que las pérdidas de carga por fricción vendrán dadas en función de éstos.

La fricción por rozamiento se suele expresar en función de un coeficiente, de acuerdo con las ecuaciones mostradas en la Tabla II-1

Tabla II-1. Formulación de S_f según diversos autores.

Autor	Expresión S_f
Chèzy	$S_f = \frac{V^2}{C^2 R} \quad (\text{II-1})$
Manning	$S_f = \frac{V^2 n^2}{R^{4/3}} \quad (\text{II-2})$
Darcy	$S_f = \frac{f V^2}{8 R g} \quad (\text{II-3})$

siendo:

- S_f la pendiente de fricción.
- V la velocidad del flujo en la sección.
- R el radio hidráulico.
- C el coeficiente de Chèzy.
- n el número de Manning.
- f el coeficiente de resistencia de Darcy-Weisbach

Dado que la tensión tangencial τ_0 en el perímetro mojado de la sección viene dada por la siguiente expresión:

$$\tau_0 = \gamma R S_f \quad (\text{II-4})$$

dónde:

- γ es el peso específico del agua.

Las ecuaciones de la tabla incluida anteriormente y, por tanto, los respectivos coeficientes de fricción quedan relacionados según la expresión:

$$C = \frac{R^{1/6}}{n} = \sqrt{\frac{8g}{f}} \quad (\text{II-5})$$

La mayoría de los modelos utiliza la fórmula de Manning para el cálculo de las pérdidas por rozamiento.

En los modelos bidimensionales, la pendiente de fricción se descompone según las ecuaciones:

$$S_{fx} = \frac{u \sqrt{u^2 + v^2} n^2}{h^{4/3}} \quad (\text{II-6})$$

$$S_{fy} = \frac{v \sqrt{u^2 + v^2} n^2}{h^{4/3}} \quad (\text{II-7})$$

dónde:

- u y v son las componentes de la velocidad.
- h es el calado.
- n es el número de Manning en el punto de cálculo.

La validez de la fórmula de Manning ha sido, y es, objeto de gran debate en la literatura, especialmente a medida que se dispone de mayor cantidad de datos en cauces para su análisis. Como los modelos hidráulicos siguen utilizando esta fórmula para la estimación de las pérdidas de carga por fricción, la parametrización de la rugosidad sigue realizándose según los valores de n. En el caso de la parametrización de la rugosidad en el cauce, ésta viene determinada principalmente por su geometría, su pendiente y su granulometría. Para la determinación de la rugosidad en cauces existen gran cantidad de fórmulas, tanto relativas a la relación de la velocidad con los coeficientes de rugosidad, como a la formulación de las pérdidas de carga por fricción. En este apéndice se presentan algunas de las formulaciones más conocidas, así como recomendaciones para asignar la rugosidad a los distintos tramos del cauce en que se divide la zona de estudio. En el caso de la parametrización de la rugosidad en la llanura de inundación, el valor de n viene condicionado, fundamentalmente, por los usos del suelo, por lo que se necesitará disponer de información sobre los mismos y su evolución en la zona de estudio.

El objetivo es caracterizar el valor de la rugosidad en una serie de polígonos definidos en la zona de estudio. Por un lado, se tendrán los polígonos de usos del suelo en la zona inundable, y por otro lado los polígonos correspondientes a distintos tramos a lo largo del cauce. Los polígonos de usos del suelo se obtendrán a partir de la información más reciente y detallada disponible, siendo la del Sistema de Información de Ocupación del Suelo de España (SIOSE) y el CORINE LAND COVER 2000-2006 las bases a utilizar a falta de otra información de mayor detalle. Además, será necesaria la información de cambios de uso del suelo en los casos en los que la modelización hidráulica así lo requiera. Los polígonos del cauce se corresponderán con lo definido en el análisis histórico y geomorfológico. Los distintos tramos a lo largo del cauce se identificarán en función de las características geométricas de las secciones transversales, la pendiente, y la composición del lecho y las márgenes, en términos del tamaño de los sedimentos y del tipo de vegetación.

La caracterización de la rugosidad requiere, por tanto, el conocimiento de la vegetación presente en la llanura de inundación y en el cauce. En la llanura de inundación, a partir de los polígonos de usos del suelo, se pueden identificar los polígonos con vegetación y asignarles un valor de rugosidad en función del tipo y de la densidad de la misma, la cual se podrá determinar mediante observaciones realizadas en visitas a campo y mediante la información cartográfica disponible. En el cauce, la vegetación tiene una influencia considerable en las pérdidas de carga de fricción. Generalmente, en el cauce se identifican zonas de vegetación continua cuya contribución a la rugosidad total se puede estimar a partir de tablas o en función de las características de la misma (densidad, rigidez de los tallos, etc.). Para poder tener en cuenta las pérdidas de carga debidas a la vegetación del cauce será

necesario diferenciar en el cauce los polígonos correspondientes a la misma.

Es importante tener en cuenta el sistema de unidades de medida del coeficiente de rugosidad de Manning. El factor de conversión es el siguiente:

$$n(E) = 1,49 n(SI) \quad (II-8)$$

Donde:

- $n(E)$ es el número de Manning en el sistema anglosajón de unidades de medida.
- $n(SI)$ es el número de Manning en las unidades del Sistema Internacional (s/m^{1/3}).

Rugosidad en la llanura de inundación

Como ya se ha comentado, la rugosidad en la llanura de inundación depende fundamentalmente de los usos del suelo presentes en la misma. En la literatura se puede encontrar un amplio repertorio de estimaciones de los coeficientes de rugosidad en función de la actividad desarrollada sobre la zona inundable. Estas estimaciones están referidas normalmente al número de Manning y, por lo general, toman valores que pueden variar dentro de unos rangos.

La información relativa a los usos del suelo debe ser representada cartográficamente de tal forma que se puedan asignar los valores del coeficiente de rugosidad a los polígonos que definen los usos. Es importante tener en cuenta la fecha para la cual se definen los usos del suelo, ya que las variaciones en los mismos pueden afectar a la rugosidad. La ortofoto suministrada con el modelo digital del terreno (MDT) del LiDAR permite identificar y definir los usos del suelo en el momento en que fue tomada.

Con información de partida sobre los usos del suelo se recomienda la utilización del Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España (SIOSE) llevado a cabo por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Se trata de una capa de información en formato SIG que ofrece una delimitación muy exacta de los polígonos de ocupación del suelo a escala 1:25.000. Las posibles ocupaciones del suelo vienen dadas por una clasificación de usos simples (cuando éstos sean únicos en el polígono) y compuestos (cuando éstos se encuentren formados por dos o más usos simples y/o compuestos a su vez) que pueden llevar atributos asociados. En función del tipo de combinación, el uso compuesto será asociación o mosaico. La asociación es la combinación de usos que se encuentran entremezclados sin distribución geométrica ordenada. El mosaico es la combinación de usos cuya distribución geométrica y separación entre ellos es claramente perceptible.

En el caso de no disponer del SIOSE podría utilizarse la información proporcionada por el proyecto europeo CORINE LAND COVER cuya última versión se basa en información del año 2006 (CLC2006). Esta cartografía está realizada a escala 1:100.000 y agrupa los usos del suelo en cuatro grandes grupos, que corresponden a:

- Zonas artificiales.
- Zonas agrícolas.
- Bosques y áreas seminaturales.
- Zonas húmedas y superficies de agua.

A pesar de su escala, los polígonos definidos en el CLC suelen encajar bastante bien, en líneas generales, con los usos del suelo que se identifican en la ortofoto, aunque en ocasiones pueden darse discrepancias debidas a posibles cambios con el tiempo, a errores en la delimitación o a errores en la definición del CLC. En estos casos, será necesario delimitar nuevos polígonos, o modificar los ya existentes, de tal forma que los usos del suelo de la ortofoto queden bien reflejados.

Del análisis comparativo entre el SIOSE y el CLC se desprende que la información recogida por el SIOSE tiene una mejor resolución, un mayor detalle y está más actualizada. Sin embargo, la clasificación de usos del suelo del CLC2000 es más detallada a la hora de definir las zonas agrícolas, bosques y áreas seminaturales.

Las ediciones del CLC de los años 2000 y 2006 (CLC2000 y CLC2006) incluyen información sobre polígonos

de cambio de uso del suelo con respecto a la edición anterior. Es aconsejable examinar si en la zona de estudio se han producido cambios con el objeto de poder tenerlos en cuenta, en caso necesario, en la modelización hidráulica.

Asimismo, se recomienda el estudio en detalle de las fotografías existentes sobre las avenidas históricas documentadas que vayan a ser utilizadas en la fase de calibración del modelo hidráulico, con objeto de identificar las posibles diferencias en los usos del suelo respecto a la situación actual.

El modelo digital de superficies (MDS) del LiDAR puede servir también como fuente de información a la hora de definir los usos del suelo ya que sobre él se pueden distinguir las edificaciones, las vías de comunicación, los elementos singulares, etc. En este sentido, la comparación del MDS con una planimetría facilita la identificación de posibles cambios de uso del suelo.

- A continuación, se presenta la Tabla II-2, que contiene los coeficientes de rugosidad de Manning desarrollada en la Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables del Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. En ésta se ha llevado a cabo la asignación de un coeficiente orientativo a los usos del suelo del SIOSE y del CLC2000 (se ha realizado este último ya que su clasificación de usos tiene mayor detalle que la versión más actualizada del 2006). Es importante tener en cuenta que pueden darse variaciones de los valores asignados en torno a un 5-10%. Estas variaciones principalmente se deberán a la densidad de la vegetación y de las edificaciones, de manera que en zonas con bajas densidades puede ser necesario reducir los valores asignados de forma orientativa. Es posible estimar la densidad de la vegetación y de las edificaciones a partir de:
 - La ortofoto y el MDS del LiDAR (para la estimación de la densidad de la vegetación).
 - La ortofoto, el MDS de LiDAR y la planimetría disponible (para la estimación de la densidad de edificaciones).

Tabla II-2. Valores del coeficiente de rugosidad de Manning asignados a los usos del suelo del SIOSE y CLC2000.

Valores del coeficiente de rugosidad de Manning asignados a los usos del suelo del SIOSE y CLC2000.							
Clasificación de usos del suelo del SIOSE			n	Clasificación de usos del suelo del CORINE (2000)			
Artificial Compuesto	Urbano mixto	Casco	0,1	Tejido urbano continuo		Tejido urbano	
		Cobertura artificial					Edificación
		Otras construcciones					
Artificial compuesto	Urbano mixto	Ensanche	0,09	Estructura urbana abierta	Tejido urbano discontinuo (Urbanizaciones)	Zonas artificiales	
		Discontinuo		Urbanizaciones exentas y/o ajardinadas			
	Industrial	Polígono industrial ordenado	0,1	Zonas industriales	Zonas industriales y comerciales (granjas agrícolas)		Zonas industriales comerciales y de transporte
		Polígono industrial sin ordenar					
		Industria aislada					
	Primario	Piscifactoría					
Infraestructuras	Energía	Eólica					
		Solar					
		Nuclear					

Valores del coeficiente de rugosidad de Manning asignados a los usos del suelo del SIOSE y CLC2000.									
Clasificación de usos del suelo del SIOSE				n	Clasificación de usos del suelo del CORINE (2000)				
			Eléctrica						
			Térmica						
			Hidroeléctrica						
			Gaseoducto / oleoducto						
		Telecomunicaciones							
		Suministro de agua	Depuradoras y potabilizadoras						
			Desalinizadoras						
		Terciario	Comercial y oficinas						
			Complejo hotelero						
			Parque recreativo						
	Equipamiento / dotacional	Administrativo institucional							
		Sanitario							
		Cementerio							
		Educación							
		Penitenciario							
Infraestructuras	Residuos	Plantas de tratamiento							
		Religioso							
		Cultural							
Cobertura artificial	Vial, aparcamiento o zona peatonal sin vegetación			0,1	Autopistas. Autovías y terrenos asociados	Redes viarias, ferroviarias y terrenos asociados	Zonas industriales comerciales y de transporte		
Artificial compuesto	Infraestructuras	Transporte	Red viaria		Complejos ferroviarios				
			Red ferroviaria						
			Portuario						
Aeroportuario			Zonas portuarias						
			Aeropuertos						
Cobertura artificial	Zonas de extracción o vertido			0,4	Zonas de extracción minera		Zonas de extracción minera, vertidos y de construcción		
Artificial compuesto	Primario	Minero extractivo			Escombreras y vertederos				
	Infraestructuras	Residuos	Vertederos y escombreras						
Cobertura artificial	Suelo no edificado			Zonas en construcción					

Zonas artificiales

Valores del coeficiente de rugosidad de Manning asignados a los usos del suelo del SIOSE y CLC2000.							
Clasificación de usos del suelo del SIOSE			n		Clasificación de usos del suelo del CORINE (2000)		
Cobertura artificial	Zona verde artificial y arbolado urbano		0,09	Zonas verdes urbanas		Zonas verdes artificiales, no agrícolas	
	Primario	Forestal					
Artificial compuesto	Terciario	Camping		0,035	Resto de instalaciones deportivas y recreativas		Instalaciones deportivas y recreativas
	Equipamiento o dotacional	Parque Urbano					
		Deportivo					
	Campo de golf						
Cultivos	Cultivos herbáceos	Cultivos herbáceos distintos de arroz	0,04	Tierras de labor en secano (tierras abandonadas / barbechos)		Tierras de labor	
				Cultivos herbáceos en regadío	Terrenos regados permanentemente		
				Otras zonas de irrigación			
	Arroz	Arrozales					
	Cultivos leñosos	viñedo	0,05	Viñedos en secano	Viñedos en secano	Cultivos permanentes	
Cultivos	Cultivos leñosos	Frutales	0,06	Frutales en secano		Cultivos permanentes	
				Frutales cítricos	Frutales en Regadío		Frutales y plantaciones de bayas (Plantaciones de lúpulo)
		Frutales no cítricos					
		Otros cultivos leñosos		Otros frutales no regadío	Olivares		
		Olivar		Olivares en secano	Olivares		
			Olivares en regadío				
Prados		0,035	Prados y praderas (pastos en tierras abandonadas, prados arbolados)		Praderas		
Asentamiento agrícola residencial			0,035 -0,05	0,04	Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes en secano	Cultivos anuales asociados a cultivos permanentes	Zonas agrícolas heterogéneas

Valores del coeficiente de rugosidad de Manning asignados a los usos del suelo del SIOSE y CLC2000.								
Clasificación de usos del suelo del SIOSE			n		Clasificación de usos del suelo del CORINE (2000)			
Artificial compuesto	Primario	Agrícola / ganadero	0,035 -0,05		Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes en regadío			
				0,035	Mosaico de cultivos anuales con prados o praderas en secano	Mosaico de cultivos en secano	Mosaico de cultivos (Mosaico de cultivos con casas dispersas)	Zonas agrícolas heterogéneas
				0,04	Mosaico de cultivos permanentes en secano			
				0,035	Mosaico de cultivos anuales con prados o praderas en regadío	Mosaico de cultivos en regadío		
				0,04	Mosaico de cultivos permanentes en regadío			
Artificial compuesto	Primario	Agrícola / ganadero	0,04	Mosaico de cultivos anuales con cultivos permanentes en regadío	Mosaico de cultivos en regadío	Mosaico de cultivos (Mosaico de cultivos con casas dispersas)	Zonas agrícolas heterogéneas	
Huertas familiares			0,035 -0,05		Mosaico de cultivos mixtos en secano y regadío	Mosaico de cultivos (Mosaico de cultivos con casas dispersas)	Zonas agrícolas heterogéneas	
				0,05	Mosaico de cultivos agrícolas en secano con espacios significativos de vegetación natural y seminatural			Terrenos principalmente agrícolas con importantes espacios de vegetación natural
				0,05	Mosaico de cultivos agrícolas en regadío con espacios significativos de vegetación natural y seminatural			
					Mosaico de prados o praderas con espacios		Zonas agrícolas	

Valores del coeficiente de rugosidad de Manning asignados a los usos del suelo del SIOSE y CLC2000.								
Clasificación de usos del suelo del SIOSE			n		Clasificación de usos del suelo del CORINE (2000)			
					significativos de vegetación natural y seminatural			
Dehesa			0,06		Pastizales, prados o praderas con arbolado adhesado	Sistemas agroforestales		
					Cultivos agrícolas con arbolado adhesado			
Arbolado o forestal	Frondosas	Frondosas caducifolias	0,07		Bosque mixto		Bosques y áreas seminaturales	
		Frondosas perennifolias			Perennifolias	Bosques de frondosas		
					Caducifolias y marcescentes			
		Otras frondosas de plantación						
		Mezclas de frondosas						
		Laurisilva macaronésica						
	Bosques de ribera							
	Coníferas		Bosques de coníferas de hojas aciculares	Bosques de coníferas				
		Bosques de coníferas de hojas de tipo cupresáceo						
Pastizal			0,035		Pastizales supraforestales templado – oceánicos, pirenaicos y orocantábricos	Pastizales supraforestales		
					Pastizales supraforestales mediterráneos			
					Otros pastizales templado-oceánicos	Otros pastizales		
					Otros pastizales mediterráneos			
Matorral			0,055 – 0,07	0,06	Landas y matorrales en climas húmedos. Vegetación mesófila	Landas y matorrales mesófilos		
Matorral			0,055 – 0,07		0,06	Fayal – brezal macaronésico	Landas y matorrales mesófilos	
					0,065	Grandes formaciones de matorral denso o medianamente denso	Matorrales esclerófilos mediterráneos	Vegetación esclerófila
					0,055	Matorrales sub-arbustivos o arbustivos		

Valores del coeficiente de rugosidad de Manning asignados a los usos del suelo del SIOSE y CLC2000.									
Clasificación de usos del suelo del SIOSE			n		Clasificación de usos del suelo del CORINE (2000)				
					muy poco densos				
					0,06			Matorrales xerófilos macaronésicos	
					0,07			Matorral boscoso de frondosas	Matorral boscoso de transición (claras de bosques / zonas empantanadas fijas o en transición)
								Matorral boscoso de coníferas	
Matorral boscoso de bosque mixto									
Terrenos sin vegetación	Playas, dunas y arenales		0,025		Playas y dunas		Playas, dunas y arenales		
	Ramblas		0,035		Ramblas con poca o sin vegetación				
	Roquedos	Acantilados marinos		0,025		Rocas desnudas con poca o sin vegetación		Roquedo	
		Afloramientos rocosos y roquedos		0,025	0,025-0,035	Afloramientos rocosos y canchales			
		Canchales		0,035	0,035				
		Coladas lávicas cuaternarias		0,03		Coladas lávicas cuaternarias			
	Suelo desnudo		Xeroestepa subdesértica						
	Zonas quemadas		Cárcavas y/o zonas en proceso de erosión			Espacios con vegetación escasa			
Glaciares y nieves permanentes		Espacios orófilos altitudinales con vegetación escasa							
Coberturas húmedas	Humedales continentales	Zonas pantanosas		0,04	Humedales y zonas pantanosas (zonas pantanosas sin árboles y de transición, en ocasiones con una turbera de más de 30 cm de espesor)		Zonas húmedas continentales		
		Turberas							
	Humedales marinos	Marismas			Marismas		Zonas húmedas litorales		
		Salinas marinas			Zonas llanas intermareales				
Humedales continentales	Salinas continentales		Salinas						
Artificial compuesto	Infraestructuras	Suministro de agua	Conducciones y canales	0,05	Canales artificiales	Cursos de aguas	Superficies de aguas		
Coberturas de agua	Aguas continentales	Cursos de agua		0,04	Ríos y cauces naturales				
		Láminas de agua	Lagos y lagunas		0,025	Lagos y lagunas			
Embalses			Embalses			Láminas de agua			
Cobertura artificial	Lámina de agua artificial								

Valores del coeficiente de rugosidad de Manning asignados a los usos del suelo del SIOSE y CLC2000.						
Clasificación de usos del suelo del SIOSE			n	Clasificación de usos del suelo del CORINE (2000)		
Coberturas de agua	Aguas marinas	Lagunas costeras	0,03	Lagunas costeras	Aguas Marinas	
		Estuarios		Estuarios		
		Mares y océanos	0,025	Mares y océanos		

En caso contrario, se podrán realizar salidas de campo para mejorar la estimación de la densidad de la vegetación.

El valor del coeficiente de rugosidad de Manning en el caso de los usos compuestos de tipo mosaico (regular e irregular) y de las asociaciones del SIOSE, se obtendrá como media de los números de Manning correspondientes a los usos simples que los integran ponderados según los porcentajes de superficie en los que están presentes.

Por lo general, se aconseja realizar la modelización hidráulica en base a la información más reciente sobre usos del suelo en el tramo de estudio, a menos que se tenga información suficiente como para plantear un escenario diferente. Por otra parte, durante el proceso de calibración del modelo hidráulico, puede ser de interés simular una avenida ocurrida en el pasado cuando el escenario de usos del suelo era diferente. En la medida de lo posible, se procederá a la modelización hidráulica de los caudales de la avenida bajo dicho escenario.

La capa de polígonos de usos del suelo con sus correspondientes valores del coeficiente de rugosidad de Manning se puede introducir como una capa adicional de información en algunos modelos, de tal forma que los valores de la rugosidad se incorporen automáticamente al modelo. En esta capa habrá que incluir también los polígonos correspondientes al cauce.

Rugosidad del cauce

Los valores de los coeficientes de fricción en el cauce vienen dados por la resistencia al flujo ejercida por los sedimentos que conforman el lecho y las márgenes del río y por la vegetación. Existe una gran variedad de métodos para estimar coeficientes de fricción que han sido obtenidos a partir de experimentos con modelos reducidos o prototipos que simulan distintas configuraciones del cauce. Como se ha visto anteriormente, el uso de la fórmula de Manning, que relaciona la velocidad del flujo con el coeficiente de fricción o rugosidad, está muy generalizado en la modelización hidráulica. La rugosidad en el cauce no puede estimarse sólo con la información sobre usos del suelo, ya que en su valor también influye, por ejemplo, la granulometría del lecho, la vegetación, etc. De esta forma, es necesario estimarlo y, siempre que sea posible, calibrarlo en base a datos reales de flujo de caudales.

Entre los procedimientos a aplicar se encuentra el método de Cowan. El *Soil Conservation Service* (SCS) propone el método de Cowan (Cowan, 1956) para la estimación de la rugosidad en cauces. Este método se basa en la estimación de un valor inicial de la rugosidad y su posterior modificación, según unos valores correctores, para obtener un valor final de la rugosidad. El *US Geological Survey* (USGS) modifica el método de Cowan y lo publica en una guía para la selección de la rugosidad del cauce como método de Cowan modificado (Arcement y Schneider, 1990). Este método expresa el coeficiente de rugosidad como:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) n_5 \quad (\text{II-9})$$

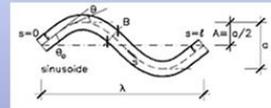
ESTUDIOS DE PARÁMETROS BÁSICOS:

Hidráulica → RUGOSIDAD

$$Q = V * S \quad V = \frac{I_0^{1/2} R_h^{2/3}}{n}$$

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * n_5$$

- n0: valor base para cauces rectos y uniformes.
- n1: valor adicional por la irregularidad en la sección recta.
- n2: valor adicional por variaciones en el cauce.
- n3: valor adicional por obstrucciones.
- n4: valor adicional por vegetación.
- n5: factor multiplicador por sinusoidad.



IMPRESINDIBLE → justificación del valor adoptado, utilizando sobretodo documentación gráfica (ortofotos, coberturas de rugosidad, reportaje fotográfico etc.) → SIG

Tipo de cauce y descripción	Valor de n		
	Mínimo	Normal	Máximo
A. Conductos cerrados que fluyen parcialmente llenos			
A1) Metal			
a) Latón liso	0.009	0.010	0.013
b) Acero			
Estriado y soldado	0.010	0.012	0.014
Ribeteado y en espiral	0.013	0.016	0.017
c) Hierro fundido			
Recubierto	0.010	0.013	0.014
No recubierto	0.011	0.014	0.016
d) Hierro forjado			
Negro	0.012	0.014	0.015
Galvanizado	0.013	0.016	0.017
e) Metal corrugado			
Subdrenaje	0.017	0.019	0.021
Drenaje de aguas lluvias	0.021	0.024	0.030
A2) No metal			
a) Lucita	0.008	0.009	0.010
b) Vidrio	0.009	0.010	0.013
c) Cemento			
Superficie pulida	0.010	0.011	0.013
Mortero	0.011	0.013	0.015
d) Concreto			
Alcantarilla, recta y libre de basuras.	0.010	0.011	0.013
Alcantarilla con curvas, conexiones y algo de basuras.	0.011	0.013	0.014
Bien terminado.	0.011	0.012	0.014
Alcantarillado de aguas residuales, con pozos de inspección, entradas, etc., recto.	0.013	0.015	0.017
Sin pulir, formaleta y encofrado metálico.	0.012	0.013	0.014
Sin pulir, formaleta y encofrado en madera lisa.	0.012	0.014	0.016
Sin pulir, formaleta o encofrado en madera rugosa.	0.015	0.017	0.020
e) Madera			
Machihembrada	0.010	0.012	
Laminada, tratada	0.015	0.017	
f) Arcilla			
Canaleta común de baldosas.	0.011	0.013	0.017
Alcantarilla vitrificada.	0.011	0.014	0.017
Alcantarilla vitrificada con pozos de inspección, entradas, etc.	0.013	0.015	0.017
Subdrenaje vitrificado con juntas abiertas.	0.014	0.016	0.018

g) Mampostería en ladrillo Barnizada o lacada	0.011	0.013	0.015
Revestida con mortero de cemento	0.012	0.015	0.017
h) Alcantarillados sanitarios recubiertos con limos y babas de aguas residuales, con curvas y conexiones.	0.012	0.013	0.016
i) Alcantarillado con batea pavimentada, fondo liso.	0.016	0.019	0.020
j) Mampostería de piedra, cementada.	0.018	0.025	0.030
B) Canales revestidos o desarmables			
B1) Metal			
a) Superficie lisa de acero Sin pintar	0.011	0.012	0.014
Pintada	0.012	0.013	0.017
b) Corrugado	0.021	0.025	0.030
B2) No metal			
a) Cemento Superficie pulida	0.010	0.011	0.013
Mortero	0.011	0.013	0.015
b) Madera Cepillada, sin tratar.	0.010	0.012	0.014
Cepillada, creosotada	0.011	0.012	0.015
Sin cepillar	0.011	0.013	0.015
Láminas con listones.	0.012	0.015	0.018
Forrada con papel impermeabilizante	0.010	0.014	0.017
c) Concreto Terminado con llana metálica (palustre)	0.011	0.013	0.015
Terminado con llana de madera	0.013	0.015	0.016
Pulido, con gravas en el fondo	0.015	0.017	0.020
Sin pulir.	0.014	0.017	0.020
Lanzado, sección buena	0.016	0.019	0.023
Lanzado, sección ondulada	0.018	0.022	0.025
Sobre roca bien excavada	0.017	0.020	
Sobre roca irregularmente excavada	0.022	0.027	
d) Fondo de concreto terminado con llana de madera y con lados de: Piedra labrada, en mortero.	0.015	0.017	0.020
Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0.017	0.020	0.024
Mampostería de piedra cementada, recubierta	0.016	0.020	0.024
Mampostería de piedra cementada	0.020	0.025	0.030
Piedra suelta o riprap	0.029	0.030	0.035
e) Fondo de gravas con lados de: Concreto encofrado	0.017	0.020	0.025
Piedra sin seleccionar, sobre mortero.	0.020	0.023	0.026
Piedra suelta o riprap	0.023	0.033	0.036

f) Ladrillo			
Barnizado o lacado	0.011	0.013	0.015
En mortero de cemento	0.012	0.015	0.018
g) Mampostería			
Piedra partida cementada	0.017	0.025	0.030
Piedra suelta o riprap	0.023	0.032	0.035
h) Bloques de piedra labrados	0.013	0.015	0.017
i) Asfalto			
Liso	0.013	0.013	
Rugoso	0.016	0.016	
j) Revestimiento vegetal	0.030	...	0.500
C. Excavado o dragado			
a) En tierra, recto y uniforme			
Limpio, recientemente terminado	0.016	0.018	0.020
Limpio, después de exposición a la intemperie.	0.018	0.022	0.025
Con gravas, sección uniforme, limpio.	0.022	0.025	0.030
Con pastos cortos, algunas malezas.	0.022	0.027	0.033
b) En tierra, serpenteante y lento			
Sin vegetación.	0.023	0.025	0.030
Pastos, algunas malezas.	0.025	0.030	0.033
Malezas densas o plantas acuáticas en canales profundos.	0.030	0.035	0.040
Fondo en tierra con lados en piedra.	0.028	0.030	0.035
Fondo pedregoso y bancas con maleza.	0.025	0.035	0.040
Fondo en cantos rodados y lados limpios.	0.030	0.040	0.050
c) Excavado con pala o dragado			
Si vegetación.	0.025	0.028	0.033
Matorrales ligeros en las bancas.	0.035	0.050	0.060
d) Cortes en roca			
Lisos y uniformes.	0.025	0.035	0.040
Afilados e irregulares.	0.035	0.040	0.050
e) Canales sin mantenimiento, malezas y matorrales sin cortar			
Malezas densas, tan altas como la profundidad del flujo.	0.050	0.080	0.120
Fondo limpio, matorrales en los lados.	0.040	0.050	0.080
Igual, nivel máximo del flujo.	0.045	0.070	0.110
Matorrales densos, nivel alto	0.080	0.100	0.140

D. Cauces naturales menores (ancho superior a nivel de crecida menor que 30 m)			
D1) Cauces en planicie			
1) Limpio, recto, nivel lleno, sin fallas o pozos profundos	0.025	0.030	0.033
2) Igual que arriba pero más piedras y pastos	0.030	0.035	0.040
3) Limpio, curvado, algunos pozos y bancos	0.033	0.040	0.045
4) Igual que arriba pero algunos pastos y piedras	0.035	0.045	0.050
5) Igual que arriba, niveles más bajos, pendiente y secciones más inefectivas	0.040	0.048	0.055
6) Igual que 4, pero más piedras	0.045	0.050	0.060
7) Tramos sucios, con pastos y pozos profundos	0.050	0.070	0.080
8) Tramos con muchos pastos, pozos profundos o recorridos de la crecida con mucha madera o arbustos bajos	0.075	0.100	0.150
D2) Cauces de montaña, sin vegetación en el canal, laderas con pendientes usualmente pronunciadas, árboles y arbustos a lo largo de las laderas y sumergidos para niveles altos			
1) Fondo: grava, canto rodado y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
2) Fondo: canto rodado y algunas rocas	0.040	0.050	0.070
E) Cauces con planicie crecida			
1) Pastos, sin arbustos			
· Pastos cortos	0.025	0.030	0.035
· Pastos altos	0.030	0.035	0.050
2) Áreas cultivadas			
· Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
· Cultivos maduros alineados	0.025	0.035	0.045
· Campo de cultivos maduros	0.030	0.040	0.050
3) Arbustos			
· Arbustos escasos, muchos pastos	0.035	0.050	0.070
· Pequeños arbustos y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
· Pequeños arbustos y árboles, en verano	0.040	0.060	0.080
· Arbustos medianos a densos, en invierno	0.045	0.070	0.110
· Arbustos medianos a densos, en verano	0.070	0.100	0.160
4) Árboles			
· Saucos densos, en verano, y rectos	0.110	0.150	0.200
· Tierra clara con ramas, sin brotes	0.030	0.040	0.050
· Igual que arriba pero con gran crecimiento de brotes	0.050	0.060	0.080
· Grupos grandes de madera, algunos árboles caídos, poco crecimiento inferior y nivel de la inundación por debajo de las ramas	0.080	0.100	0.120
· Igual que arriba, pero con el nivel de inundación alcanzando las ramas	0.100	0.120	0.160
F) Cursos de agua importantes (ancho superior a nivel de inundación mayor que 30 m). Los valores de <i>n</i> son menores que los de los cursos menores de descripción similar, ya que las bancas ofrecen menor resistencia efectiva.			
1) Sección regular sin rocas y arbustos	0.025	-	0.060
2) Sección irregular y áspera	0.035	-	0.100

Efecto	Factor	Condición	Valor	Comentario
Irregularidad en la sección recta	n_1	Suave	0	Canal muy liso
		Pequeña	0.001 - 0.005	Bancas algo erodadas
		Moderada	0.006 - 0.010	Lecho y bancas rugosas
		Fuerte	0.011 - 0.020	Bancas muy irregulares
Variaciones en el cauce	n_1	Gradual	0	Cambios graduales
		Alternado ocasionalmente	0.001 - 0.005	Cambios ocasionales de secciones pequeñas a grandes
		Alternando frecuentemente	0.010 - 0.015	Cambios frecuentes en la forma de la sección recta
Obstrucciones	n_1	Despreciables	0 - 0.004	Obstrucción menor que el 5% de la sección recta
		Pocas	0.005 - 0.015	Obstrucción entre el 5% y el 15% de la sección recta
		Algunas	0.020 - 0.030	Obstrucción entre el 15% y el 50% de la sección
		Muchas	0.040 - 0.060	Obstrucción mayor que el 50%
Vegetación	n_1	Poca	0.002 - 0.010	Profundidad del flujo mayor que 2 veces la altura de la vegetación
		Mucha	0.010 - 0.025	Profundidad del flujo mayor que la altura de vegetación
		Bastante	0.025 - 0.050	Profundidad del flujo menor que la altura de vegetación
		Excesiva	0.050 - 0.100	Profundidad del flujo menor que 0.5 la altura de la vegetación
Sinuosidad	n_1	Pequeña	1.00	Sinuosidad < 1.2
		Media	1.15	1.2 < sinuosidad < 1.5
		Fuerte	1.30	Sinuosidad > 1.5

REFERENCIAS

- [1] BOE, *Real Decreto 264/2021, de 13 de abril, por el que se aprueban las normas técnicas de seguridad para las presas y sus embalses*, [En línea]: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2021-5867>.
- [2] Dirección General del Agua, *Guía Técnica para la Clasificación de Presas*, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021. [En línea]: https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/seguridad-de-presas-y-embalses/guiatecnicaclasificacion_adaptacionants_nov2021_v16_tcm30-533050.pdf
- [3] Dirección General de Carreteras, *Norma 5.2-IC Drenaje superficial de la Instrucción de carreteras*, Ministerio de Fomento, 2018.
- [4] Instituto Geográfico Nacional, «Portal Web del Instituto Geográfico Nacional de España», Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, [En línea]. Available: <http://www.ign.es/web/ign/portal/inicio>.
- [5] CNIG, «Centro Nacional de Descargas de Información Geográfica», Ministerio del Transporte, Movilidad y Agencia Urbana, [En línea]. Available: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>.
- [6] M. Gómez Valentín y L. S. Nanía, *Ingeniería Hidrológica*, Segunda Edición. Grupo Editorial Universitario, 2006.
- [7] Témez Peláez, J.R., *Generalización y mejora del método racional*. Versión de la Dirección General de Carreteras de España. Revista Digital del CEDEX, 1992.
- [8] US Army Corps of Engineers, «HEC-RAS River Analysis System User's Manual», Hydrologic Engineering Center, California, 2016.
- [9] MITECO, «Mapa de Caudales Máximos en régimen natural», Gobierno de España, [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/snczi/Mapa-de-caudales-maximos/>.
- [10] REDIAM, «Red de Información Ambiental de Andalucía», Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente, Junta de Andalucía, [En línea]: <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam/>
- [11] CEDEX, «Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas», MITECO, [En línea]. Available: http://www.cedex.es/CEDEX/lang_castellano/.
- [12] SIOSE, «Sistema de Información de Ocupación del Suelo de España», Gobierno de España, [En línea]. Available: <https://www.siose.es/>.