



**CONAMA10**  
CONGRESO NACIONAL  
DEL MEDIO AMBIENTE

COMUNICACIÓN TÉCNICA

## **Estudio de zonas inundables y delimitación del dominio público hidráulico de los ríos Carrión, Ucieza, Valdeginete y Retortillo**

Autor: José Carlos Tomico del Río

Institución: AMBISAT, INGENIERÍA AMBIENTAL SL

e-mail: [jctomico@ambisat.com](mailto:jctomico@ambisat.com)

Otros Autores: Ramón Goya Azañedo (Confederación Hidrográfica del Duero), Miguel Ángel Cuadrado Rica (Confederación Hidrográfica del Duero), Luis Tito López Núñez (Ambisat, Ingeniería Ambiental S.L.), Juan Ramón Tejedor Gutiérrez (Ambisat, Ingeniería Ambiental S.L.). Agradecimientos: Carlos Gabriel Morales y M<sup>a</sup> Teresa Ortega Villazán (Universidad de Valladolid)

## RESUMEN

El Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, consciente de la importancia que tiene la determinación de las zonas inundables para la correcta prevención de los daños por inundaciones y para la preservación del estado ecológico de nuestros ríos ha decidido impulsar la delimitación general de las áreas inundables en el ámbito nacional.

Es dentro de este marco donde se ha llevado a cabo el “Estudio de zonas inundables y delimitación del dominio público hidráulico de los ríos Carrión, Ucieza, Valdeginete y Retortillo”. Esta delimitación abarca los siguientes aspectos:

### **Zonas inundables**

El área inundable se ha zonificado según el periodo de recurrencia de las inundaciones, delimitándose: la superficie correspondiente a la avenida de 50 años (episodios de inundación frecuentes), a la avenida de 100 años (episodios de inundación ocasionales) y a la avenida de 500 años (episodios excepcionales), cumpliendo así las indicaciones de la Directiva 2007/60.

### **Dominio Público Hidráulico**

Se han delimitado dentro del dominio público hidráulico probable aquellas áreas que se encuentran cubiertas por las aguas en la máxima crecida ordinaria, lo que ha sido puesto de manifiesto a partir de las evidencias geomorfológicas de la dinámica fluvial. Para ello se han aplicado criterios hidráulicos y geomorfológicos, basados en la información de inundaciones ocurridas en el pasado y en fotografías aéreas históricas y actuales.

### **Zonas de policía y servidumbre**

Estas zonas se han delimitado de acuerdo con la legislación vigente.

### **Zona de flujo preferente**

Esta zona se ha delimitado con el objeto de preservar la estructura y funcionamiento del sistema fluvial, dotando al cauce del espacio adicional suficiente para permitir su movilidad natural así como la laminación de caudales y carga sólida transportada, favoreciendo la amortiguación de las avenidas. Incluye la vía de intenso desagüe y las zonas de elevada peligrosidad para la avenida de 100 años de periodo de retorno. En su delimitación se ha desarrollado un modelo hidráulico coherente con la información histórica y geomorfológica de los cauces estudiados.

**Palabras Clave:** inundación; episodio



## ÍNDICE

<b>Introducción</b> .....	<b>4</b>
<b>Recopilación de antecedentes</b> .....	<b>4</b>
<b>Trabajos cartográficos (LIDAR) y topográficos</b> .....	<b>4</b>
<b>Estudio hidrológico</b> .....	<b>6</b>
<b>Estudio geomorfológico</b> .....	<b>7</b>
Análisis histórico .....	7
Análisis geomorfológico .....	8
<b>Estudio medioambiental</b> .....	<b>9</b>
<b>Estudio hidráulico</b> .....	<b>9</b>
Modelo hidráulico bidimensional del río Carrión (MIKE FLOOD).....	11
Modelo hidráulico unidimensional de los ríos Ucieza, Valdeginete y Retortillo (HEC-RAS) .....	13
<b>Delimitación del Dominio Público Hidráulico (DPH) y zonas inundables</b> .....	<b>15</b>
<b>Conclusiones</b> .....	<b>16</b>

## Introducción

El Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, en cumplimiento de la Directiva 2007/60 sobre evaluación y gestión de riesgos de inundación, ha decidido impulsar los trabajos de identificación de las áreas inundables en el ámbito nacional, consciente de la importancia que tiene la localización de dichas zonas para la correcta prevención y gestión de los efectos provocados por las inundaciones y para la conservación del buen estado de nuestros ríos.

Es dentro de este marco donde se ha llevado a cabo, por parte de la Confederación Hidrográfica del Duero, el “*Estudio de zonas inundables y delimitación del dominio público hidráulico de los ríos Carrión, Ucieza, Valdeginete y Retortillo*”.

Esta delimitación comprende las siguientes fases:

### Recopilación de antecedentes

En esta primera etapa de los trabajos se ha tratado de examinar toda aquella documentación técnica y administrativa disponible sobre las zonas de actuación. Para ello se consultaron todos los datos disponibles en la Confederación Hidrográfica del Duero, Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (CEH-CEDEX), la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Castilla y León, las Direcciones Generales del Agua y de Conservación de la Naturaleza. Así como en los Ayuntamientos de los municipios por los que discurren los cuatro cauces que fueron objeto del estudio.

Se ha prestado especial atención a la coordinación con los citados Organismos para garantizar la mayor transparencia y aportar toda la información relevante al estudio.

La información a recabar se basó, entre otros, en los siguientes aspectos que podían influir sobre el establecimiento de los límites del Dominio Público Hidráulico (DPH), zona de policía, zona de servidumbre, Zona de Flujo Preferente (ZFP) y zonas inundables asociadas:

- Información cartográfica, topográfica y fotogramétrica
- Información hidrológico-hidráulica y ambiental (datos climáticos, hidrológicos, hidráulicos, geológicos, espacios naturales, usos del suelo, etc.).
- Información catastral
- Planeamiento urbanístico

### Trabajos cartográficos (LIDAR) y topográficos

El objetivo de los estudios cartográfico y topográfico llevados a cabo ha consistido en la obtención de una cartografía de alta precisión (modelos digitales del terreno y elevaciones) a partir de un levantamiento con altímetro láser aerotransportado (LIDAR) completado con topografía de campo (perfiles batimétricos y caracterización de infraestructuras) y la toma de imágenes digitales de forma simultánea para obtener tanto

los datos brutos del conjunto de retornos LIDAR (*LIDAR raw point data*) como el conjunto de ortofotografías obtenidos a partir de ellos.

A tal efecto, se ha realizado el procesado básico de los datos LIDAR, el procesado completo de las imágenes digitales hasta convertirlas en ortofotografías y los controles de calidad necesarios para asegurar la obtención del producto final según las especificaciones de calidad establecidas inicialmente para el estudio. Así como el levantamiento de más de 1.000 perfiles transversales, entre los que se incluyen los realizados para cartografiar el lecho del cauce (batimetrías con ecosonda) y los correspondientes a la caracterización de las obras de paso identificadas en el ámbito del proyecto.

La zona de estudio se encuentra en la provincia de Palencia y transcurre a lo largo de 333,7 km de cauce, comprendidos en los ríos Carrión, Ucieza, Valdeginete y Retortillo, hasta cubrir una superficie total de unas 50.000 ha.

En principio el área de vuelo definida, se obtuvo a partir de una simulación hidráulica previa, que cubría una superficie de 45.500 ha, pero posteriormente fue necesario ampliarla, siendo la superficie resultante muy superior a la requerida a priori.

La nube de puntos LIDAR se ha obtenido tras realizar un vuelo de precisión y el posterior preprocesado básico de los datos. Para ello el vuelo se configuró de forma que permitiera la obtención de al menos 1 punto (retorno LIDAR) por metro cuadrado e imágenes digitales GSD de 20 cm de píxel.



***Ejemplo de productos cartográficos generados (MDE y MDT)***

En definitiva, el vuelo realizado en época de aguas bajas ha permitido obtener los productos (MDT y MDE), como puede verse en la figura adjunta, tal y como se establecía en los requerimientos técnicos del estudio.

## Estudio hidrológico

El objeto buscado durante el desarrollo de este estudio ha sido la determinación y análisis del régimen de caudales circulantes por el sistema de ríos Carrión, Ucieza, Valdeginete y Retortillo, que se han empleado posteriormente, como avenida de diseño para los estudios hidráulicos de inundación y delimitación del Dominio Público Hidráulico.

En este sentido, se han llevado a cabo estudios estadísticos tanto de datos de estaciones de aforo y pluviométricas, como estudios hidrometeorológicos de precipitación-escorrentía a partir del software HEC-HMS.

El análisis foronómico, se ha realizado a partir de los datos de las siete estaciones de aforo identificadas en la zona del estudio, de las cuales seis se localizan en el río Carrión, incluidas las ubicadas en los embalse de Compuerto y Velilla de Guardo, y una en el río Ucieza.

Se han obtenido las correspondientes distribuciones estadísticas de caudales mediante diversos métodos (Gumbel, SQRT, Log-Pearson III y GEV), con objeto de poder escoger la función de distribución que presentara una mayor sensibilidad de ajuste en cada caso, para, de esta manera, determinar los caudales máximos instantáneos para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años. El estudio estadístico de los datos foronómicos sería el de mayor garantía para cuantificar el caudal máximo, pero presenta dos inconvenientes fundamentales, que son: la escasez de estaciones en los cauces objeto de estudio y la falta de fiabilidad de los datos disponibles.

Por ello ha resultado imprescindible realizar un estudio hidrometeorológico de transformación de lluvia en escorrentía, a partir de las características morfológicas de la cuenca y la distribución espacio-temporal de la precipitación.

Las características morfológicas: topografía, dimensiones de la cuenca vertiente y trazado de la red hidrográfica, se han determinado sobre el modelo digital del terreno a escala 1:25.000 facilitado por la Oficina de Planificación Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Duero.

La definición de las precipitaciones de diseño consideradas para cada periodo de retorno del modelo hidrometeorológico, se ha hecho mediante la realización de un estudio pluviométrico de toda la cuenca vertiente del sistema de ríos Carrión, Ucieza, Valdeginete y Retortillo, a partir de los datos de más de 60 estaciones meteorológicas facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

Para el tratamiento de los datos pluviométricos y foronómicos, se ha empleado la aplicación informática CHAC (*versión prealfa 03k*), desarrollada por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, para lo cual ha sido necesario generar unos archivos en formato LEMA, a partir de los datos de precipitaciones máximas publicados por la AEMET y otro a partir de los datos registrados por la estaciones de aforo antes mencionadas.

Por tanto, los datos pluviométricos obtenidos han sido la base para la obtención de los hidrogramas de las avenidas y los caudales máximos asociados por medio de modelos hidrometeorológicos.

El modelo hidrometeorológico es el que tiene un mayor sentido físico e hidrológico y ha permitido estudiar aceptablemente el fenómeno de máxima crecida, pero sólo se han dado por válidos los resultados del mismo una vez que se ha calibrado el modelo con los datos de caudales obtenidos en el estudio foronómico. De esta forma se ha conseguido la conjunción de todos los datos disponibles y, a través del modelo hidrometeorológico calibrado, ha sido posible trasladar los datos foronómicos a toda la cuenca.

### **Estudio geomorfológico**

El estudio realizado se apoya fundamentalmente en dos grandes ejes, cada uno con una secuencia metodológica precisa.

- El *análisis histórico*, centrado en la elaboración de un catálogo de inundaciones desde el año 1860 hasta la actualidad, así como en el estudio evolutivo de la morfología fluvial a partir de la interpretación de las fotografías aéreas de diversos años, junto con el análisis de la ortofotografía digital obtenida de varias fuentes.
- El *análisis geomorfológico*, se ha realizado a partir de las fuentes documentales, cartográficas y bibliográficas, así como de la información que se ha extraído directamente del trabajo de campo. Para ello, el trabajo se ha apoyado en la cartografía topográfica digital existente hasta la fecha, junto a la proporcionada por las imágenes LIDAR elaboradas al efecto en el valle del Carrión.

#### Análisis histórico

Uno de los fundamentos básicos en el análisis de las inundaciones y del riesgo que puede conllevar su mayor o menor peligrosidad sobre un espacio determinado, lo constituye la información histórica que se tenga sobre las inundaciones acontecidas en el mismo y en su entorno inmediato.



***Evidencias geomorfológicas inventariadas (sedimentos fluviales/revocado en fachada)***

Se trata de manejar datos concretos, contar con información de episodios realmente ocurridos, valorar la intensidad y magnitud de los mismos, los espacios afectados y los efectos generados. Conocer el número, frecuencia, grado de intensidad y duración de los episodios ocurridos está en la base de cualquier estudio de peligrosidad del riesgo. Su análisis es ineludible por varias razones:

- Los datos históricos suelen abarcar un período temporal bastante más prolongado que la información de carácter meteorológica (observatorios) e hidrológica (aforos) de que se dispone.
- Su análisis ayuda a perfilar y delimitar el área inundable y, sobre todo, la recurrencia de sus episodios.
- Aporta información de calados en lugares y momentos concretos.
- Permite tener imágenes reales de los acontecimientos ocurridos, así como alusiones concretas a parajes por ellas afectados, amén de los efectos que ocasionan sobre determinadas infraestructuras (cortes de carreteras, infraestructuras inundadas, etc.).
- A partir de sus datos se puede establecer una tipología de inundaciones, al comprobar la existencia de acontecimientos diversos según la causa que las motiva y según los efectos que deparan.
- Permite calibrar los modelos hidrológico-hidráulicos, así como validar sus conclusiones.

### Análisis geomorfológico

La Geomorfología es una disciplina científica que se encarga de la descripción, análisis e interpretación espacial y temporal de las formas de relieve y de los depósitos recientes a ellas asociados (formaciones superficiales). Dentro de ella, la Geomorfología Fluvial se dedica al estudio de las formas y depósitos de los ríos y demás corrientes de agua (torrentes, arroyos...), por ello, el estudio de la génesis y propagación de las crecidas y avenidas fluviales, así como los efectos que deparan, desempeñan un papel relevante.

Su influencia, como señalan Diez Herrero, A. et al. (2008), se manifiesta en una triple vertiente:

- Configuracional, al condicionar las formas del relieve.
- Dinámica, por las continuas acciones que desarrollan los procesos fluviales y los productos resultantes (formas y depósitos).
- Evolutiva, por la existencia de tendencias y ritmos en la modificación del relieve con repercusiones evidentes en las zonas inundables.

Por ello, puede hablarse de los condicionantes geomorfológicos de las inundaciones que quedarían sintetizados en tres aspectos: morfográficos, morfodinámicos y morfoevolutivos, todo ello desarrollado a diferentes escalas espacio-temporales.

### **Estudio medioambiental**

De acuerdo al artículo 5 de la DMA y a su Anejo 2.1. (masas de agua superficiales), la evaluación de presiones e impactos obliga a determinar para cada masa de agua las presiones que son significativas, es decir, las presiones que puedan causar el incumplimiento de los objetivos ambientales que deberían mantenerse en cada masa de agua.

El estudio medioambiental llevado a cabo, se ha estructurado en tres fases claramente diferenciadas. La primera, denominada inventario de presiones (IMPRESS), en la que se ha tratado de establecer la situación actual del medio identificando los factores concretos afectados por la actividad humana.

En la segunda fase, se ha llevado a cabo un estudio en el que se ha evaluado el estado de la vegetación de ribera, cuyos resultados se han obtenido a partir de la estimación de los indicadores habituales del estado de las riberas y hábitat fluvial (QBR, etc.) en las diferentes zonas de los cauces objeto del presente estudio.

Por último, y como tercera fase, se ha analizado el estado ecológico de las masas de agua incluidas en el ámbito del estudio (DPH) y se han propuesto una serie de medidas correctoras de carácter general dirigidas a la recuperación y posterior protección del ecosistema comprendido en el Dominio Público Hidráulico superficial.

### **Estudio hidráulico**

En un principio se pensó desarrollar un modelo hidráulico unidimensional, para estudiar el comportamiento de las avenidas correspondientes a los distintos periodos de retorno considerados en los cuatro cauces que integran el ámbito del estudio. Así mismo se acordó realizar modelos hidráulicos bidimensionales únicamente en aquellas zonas en las que se apreciara la existencia de flujos de agua importantes, con trayectorias y condiciones hidrodinámicas distintas e independientes, de las que se dan en las secciones del cauce principal.

La geomorfología del cauce del río Carrión, presenta en toda la cuenca media y baja, de forma casi constante, una sucesión de cauces meandriformes, cauces anastomosados y numerosos cauces efímeros que han quedado colgados con el paso del tiempo.

Así mismo, a lo largo del río Carrión se han identificado numerosas incidencias de inundación en núcleos de población a distinta altura como son: Saldaña, Villoldo, Carrión de los Condes, Monzón de Campos, Grijota o Palencia.

Por estos motivos y tras analizar los resultados de un tramo reducido del estudio, utilizado como tramo piloto para la elaboración de la Guía Metodológica del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI), en el que se pudo constatar la bondad de los resultados del modelo hidráulico bidimensional, junto con los estudios de evidencias geomorfológicas de avenidas de inundación, se decidió realizar un estudio hidráulico bidimensional (MIKE FLOOD), en régimen variable, extendido a la totalidad de los 166,7 km de cauce del río Carrión considerados.

A modo de ejemplo, se adjunta a continuación una muestra de los resultados obtenidos con la modelización hidráulica bidimensional en el núcleo urbano de Palencia.



***Resultado del modelo hidráulico bidimensional (ciudad de Palencia)***

Las características de los ríos Ucieza, Valdeginete y Retortillo, son muy distintas pues se trata de cauces canalizados artificialmente, con secciones trapezoidales en tierras, e incluso, numerosos tramos de hormigón armado, con trazados rectilíneos y pendientes diseñadas para conseguir una pérdida mínima de cota piezométrica, que permita su aprovechamiento para el riego de mayores extensiones agrícolas. Además, gran parte del trazado está constreñido por la existencia de motas paralelas al encauzamiento.

Dadas las circunstancias descritas para los ríos Ucieza, Valdeginete y Retortillo, el modelo numérico por el que se ha optado para el estudio hidráulico de los mismos es el que estaba previsto inicialmente, consistente en un modelo hidráulico unidimensional, en régimen gradualmente variado (HEC-RAS).

### Modelo hidráulico bidimensional del río Carrión (MIKE FLOOD)

#### Soporte matemático

Esta es una herramienta de cálculo numérico del flujo de agua en lámina libre y régimen variable que resuelve las ecuaciones de Saint-Venant con esquemas numéricos explícitos basados en la técnica de los volúmenes finitos, dadas unas condiciones iniciales, unas condiciones de contorno, una rugosidad y unos parámetros de cálculo (incremento de tiempo de cálculo, umbral de seco-mojado).

#### Tramificación del ámbito

El entorno del río Carrión se ha dividido en doce tramos de estudio para su modelización hidráulica bidimensional. La tramificación realizada obedece fundamentalmente a dos criterios: un criterio espacial y otro funcional.

Desde el punto de vista espacial, tras las pruebas realizadas en un tramo piloto con mallas de distinto tamaño (resolución) y extensión, para poder hacer una estimación de los tiempos de cálculo necesarios para la cuenca completa, se fijaron los siguientes valores que han condicionado la extensión de los tramos de estudio:

- Tamaño de la celda de cálculo: 5x5 m.
- Número de celdas máximo: 1,6 millones de celdas por tramo.
- Longitud máxima: 15 km.
- Anchura: de 2,5 a 4 km.

Y en relación a la funcionalidad del modelo, la tramificación ha de recoger como condiciones de contorno, algunas de las infraestructuras y nodos identificados en el modelo hidrometeorológico, como por ejemplo los embalses de cabecera, con objeto de introducir los distintos hidrogramas obtenidos.

Así mismo, se ha fijado como criterio para una correcta modelización, situar las confluencias de los cauces secundarios con el principal en la zona central de los correspondientes tramos.

En todos los tramos, se han establecido zonas de solape de 500 a 800 metros de longitud con objeto de que se puedan disipar, fuera de las áreas de estudio, las aceleraciones y/o remansos que se pueden producir en las inmediaciones de las condiciones de contorno.

#### Modelo digital del terreno

La geometría empleada en el modelo es una malla de datos (grid) de elevaciones, esta geometría esta formada por celdas de tamaño 5x5 m, obtenidas a partir de la conversión de los datos del MDT en formato ASCII de resolución 1x1 m, generado a partir los datos del terreno tomados con tecnología LIDAR y la integración de los perfiles batimétricos y taquimétricos tomados en campo.

## Infraestructuras

Para la realización del modelo hidráulico bidimensional del río Carrión se han digitalizado 114 infraestructuras entre las que se encuentran puentes, azudes y obras de paso de diversa tipología.

Las características del flujo a través de las infraestructuras se han definido con un modelo hidráulico unidimensional. Para construir este modelo ha sido necesario obtener los datos geométricos que definen la sección de paso. A la hora de introducir los datos de la sección central existen dos casos, las estructuras de sección cerrada tipo “*Calvert*” que se corresponden con los puentes y las obras de paso; y las de sección abierta tipo “*Weir*” que hacen referencia a los aforos y azudes.

Además ha sido necesario trazar dos perfiles transversales en el modelo digital del terreno. Uno aguas arriba de la sección de paso a una distancia suficiente como para que la contracción del flujo de entrada no generase turbulencias importantes y otro aguas abajo a una distancia suficiente como para que la expansión del flujo de salida tampoco generara turbulencias importantes. En la medida de lo posible estos perfiles tenían que trazarse perpendiculares a la dirección del flujo para así crear un modelo más estable.

## Mapas de rugosidad

La rugosidad del terreno se ha incorporado al modelo mediante matrices de datos, con el valor del coeficiente de rugosidad de Manning ( $M=1/n$ ) para cada celda de cálculo. Estas mallas de rugosidad se han creado con un sistema de información geográfica a partir de mapas de vegetación, intersectados con parcelarios como el de catastro y con otros recintos o áreas de interés, digitalizados en entorno CAD para conseguir un mayor detalle.

## Hidrogramas de avenida

Como se ha explicado en puntos anteriores, este estudio se ha dividido en 12 tramos. En cada uno de ellos, se han modelado las avenidas para los periodos de retorno de 500, 100, 50 y 3 años; en régimen regulado para los tres primeros casos y en régimen natural para el último. Esto supone que se han estudiado 48 escenarios y por tanto son necesarios sendos hidrogramas procedentes del estudio hidrológico.

## Resultados

Como resultados, se han obtenido a partir de la modelización hidráulica combinada 2D y 1D, en los 12 tramos en que se ha dividido la llanura de inundación del río Carrión, las siguientes variables hidrodinámicas:

- H (m) Water depth- Profundidad o calado.
- P-Flux (m<sup>3</sup>/sg)- Componente de caudal según la dirección X.
- Q-Flux (m<sup>3</sup>/sg)- Componente de caudal según la dirección Y.
- U-Velocity (m/sg)- Componente de velocidad según la dirección X.
- V-Velocity (m/sg)- Componente de velocidad según la dirección Y.

- Current speed (m/sg)- Velocidad escalar.
- Time label- Hora de simulación en el modelo

### Modelo hidráulico unidimensional de los ríos Ucieza, Valdeginete y Retortillo (HEC-RAS)

#### Soporte matemático

En la estimación de velocidades y calados se ha aplicado el denominado método estándar por etapas (*Standard Step Method*), que resuelve la ecuación dinámica del flujo gradualmente variado igualando la energía en dos secciones consecutivas mediante un procedimiento cíclico de aproximaciones sucesivas.

Para ello se ha utilizado la aplicación HEC-RAS 4.0.0 (River Análisis System; USACE), que puede manejar una red completa de canales, un sistema dendrítico, o una localización singular en un río; y es capaz de modelizar perfiles en régimen subcrítico, supercrítico o mixto.

#### Tramificación del ámbito

En este caso no ha sido necesario tramificar los tres cauces objeto del estudio. Siendo posible realizar un modelo hidráulico unidimensional para cada uno de los cauces considerados como tramos únicos.

#### Modelo digital del terreno

Para la definición de los datos geométricos la base de partida es el Modelo Digital del Terreno obtenido mediante una cartografía de alta precisión (1x1 m), a partir de un levantamiento LIDAR con altímetro láser aerotransportado completado con topografía de campo (perfiles batimétricos y levantamiento de infraestructuras).

En aquellos casos en los que la extensión del MDT LIDAR no es suficiente para contener la zona inundable de los ríos Ucieza, Valdeginete y Retortillo, ha sido necesario ampliarlo a partir de la cartografía existente.

#### Infraestructuras y secciones transversales

Una vez recopilada la información existente sobre las características de las infraestructuras hidráulicas ubicadas a lo largo de los cauces considerados, se procedió a la realización de los trabajos de campo que permitieron comprobar la realidad de estos sistemas, quedando recogidas, entre otras, su localización exacta, sus características, estado de conservación, problemática, etc.

La caracterización geométrica de los cauces estudiados se ha llevado a cabo mediante la definición de perfiles transversales. Los datos de dichos perfiles se han calculado a partir del Modelo Digital del Terreno, obtenido mediante tecnología LIDAR y completado con topografía de campo (perfiles batimétricos y levantamiento de infraestructuras), de tal forma que cada uno de los perfiles transversales incluye los correspondientes puntos de la zona sumergida.

Para el río Ucieza se han definido un total de 377 perfiles, con una distancia de separación media inferior a los 200 m.

Para el río Valdeginete se han definido un total de 302 perfiles, con una distancia de separación media de 200 m.

Para el río Retortillo se han definido un total de 202 perfiles, con una distancia de separación media inferior a los 200 m.

### Mapas de rugosidad

Es preciso señalar que el valor de la  $n$  de Manning no adquiere un valor constante para un tramo determinado de una sección del cauce, sino que varía al variar el calado y sobre todo al aumentar la potencia de la corriente.

Como es sobradamente conocido, la resistencia que presenta un cauce al movimiento del fluido tiene dos componentes diferentes; la primera es la resistencia por rugosidad, en la que los factores que intervienen son la granulometría del material que forma el lecho del río y el valor que adquiere el número de Reynolds. La segunda componente de la resistencia es debida a lo que se denomina formas del lecho. Mientras que la primera componente es sensiblemente constante, la segunda no lo es, y es preciso analizar la configuración de formas que adopta el lecho del cauce para de esta forma poder predecir cuál es la resistencia que ofrece éste al movimiento.

La tipología del recubrimiento del lecho de los tres ríos para la obtención de los coeficientes  $n$  de Manning se recopilaron mediante visitas de campo.

La rugosidad del cauce se ha asociado al número de Manning, considerando el tipo de terreno, la cobertura vegetal y la edificación en la zona.

### Calibración del modelo

Para la calibración del modelo en régimen permanente se necesitan datos de caudal circulante y cota de agua en distintos puntos del tramo en estudio.

Dadas las limitaciones de la información de partida, la calibración del modelo ha consistido en un estudio de sensibilidad de la cota de agua a los coeficientes de rozamiento estimados en los modelos.

### Resultados

Tras la obtención de los caudales de cálculo, para períodos de recurrencia correspondiente a la máxima crecida ordinaria ( $T=3$  en Régimen Natural), 50, 100 y 500 años (todos ellos en Régimen Regulado) se ha procedido a la elaboración de los correspondientes modelos hidráulicos de simulación de flujo permanente. El resultado de la aplicación de los respectivos caudales a los modelos hidráulicos construidos ha sido la determinación del nivel de la lámina de agua y las velocidades del flujo en cada una de las secciones que caracterizan cada uno de los cauces.

De esta forma, quedan definidos los niveles alcanzados por la lámina de agua y las velocidades en los cauces a partir de la determinación de estos valores en las secciones representativas de los ríos estudiados. Se han calculado las cotas que alcanzaría la lámina de agua en los cauces analizados para cada período de retorno considerado.

### **Delimitación del Dominio Público Hidráulico (DPH) y zonas inundables**

En el artículo 2 de la Ley de Aguas se definen los bienes que integran el dominio público hidráulico del Estado. El reglamento del dominio público hidráulico, en el artículo 242 dice textualmente:

*“Art. 242. 1. El Organismo de cuenca procederá al estudio técnico de la hidrología del tramo que va a deslindarse, para, con base en la información meteorológica y foronómica disponible y mediante las correlaciones hidrológicas necesarias, deducir el caudal teórico de la máxima crecida ordinaria, en la forma que se establece en los apartados 1 y 2 del artículo 4 de este Reglamento.*

*2. Con este valor y las características topográficas de la corriente, se estimará en planos a escala conveniente la delimitación de la zona cubierta por las aguas en tales condiciones teóricas. Las líneas así trazadas constituirán la primera aproximación del deslinde.”*

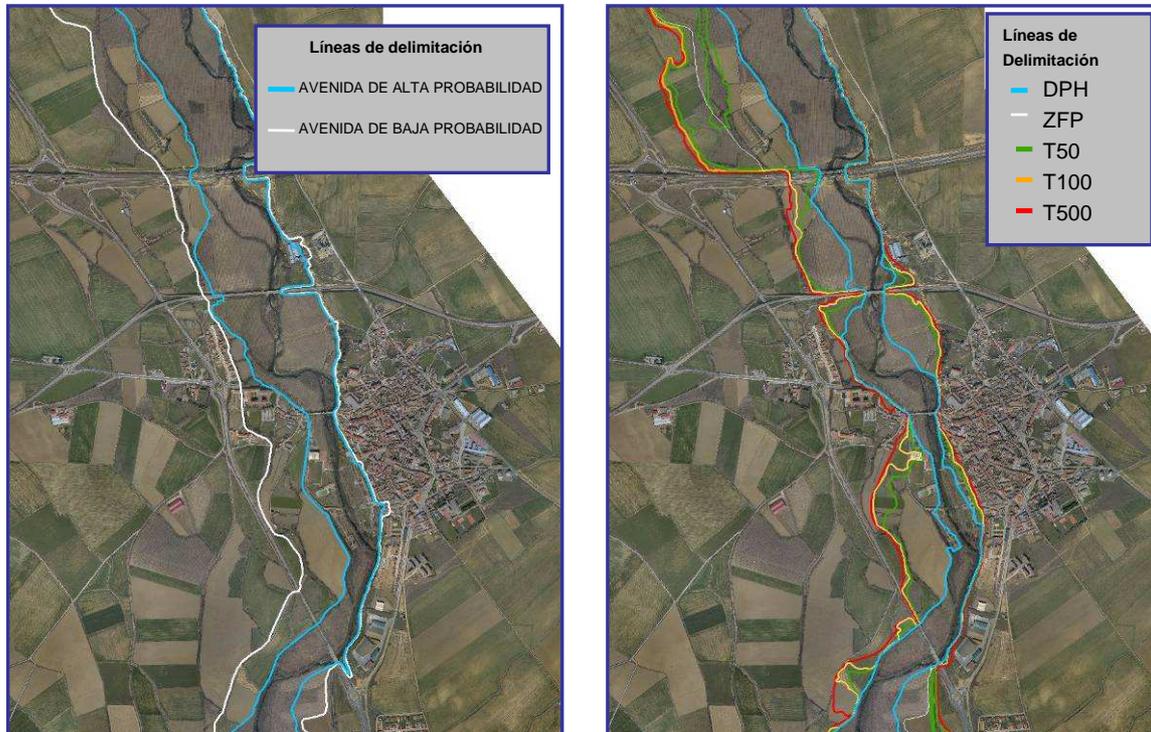
Para dar cumplimiento al apartado 2 de este artículo, una vez analizados los resultados del modelo hidráulico, junto con los resultados de los estudios geomorfológicos y ambientales, se han representado las líneas que delimitan el D.P.H. junto con las líneas de servidumbre y policía, a dos escalas diferentes. Concretamente se han representado a escala 1/1.000 únicamente en aquellos núcleos de población que han resultado de interés (Guardo, Saldaña, Carrión de los Condes, Palencia y Villamuriel), quedando representadas a 1/5.000 para el resto del ámbito del estudio, en base a los resultados obtenidos en el MDT y la ortofotografía.

El resto de líneas obtenidas (Zona de Flujo Preferente, avenidas de 50, 100 y 500 años de período de retorno) se ha representado a escala 1/5.000, siguiendo las directrices del Organismo contratante.

Las labores de trazado de dichas líneas han consistido en la delineación, de las zonas inundables correspondientes a los diferentes períodos de retorno, a partir de los ficheros ráster obtenidos como resultado en las simulaciones hidráulicas realizadas, tanto en el modelo unidimensional (HEC-RAS) como el bidimensional (MIKE FLOOD).

Siguiendo los criterios establecidos por el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (S.N.C.Z.I), en el caso de la línea correspondiente a la Zona de Flujo Preferente (Z.F.P) y al D.P.H la metodología seguida, ha tratado de integrar los resultados obtenidos mediante la aplicación tanto de criterios hidráulicos como geomorfológicos.

Finalmente, se han obtenido las líneas envolventes de los resultados de las simulaciones hidráulicas y de los obtenidos tras los estudios geomorfológicos realizados.



**Trazado de líneas de inundación**

Por último, a los resultados finales comentados se les ha aplicado un umbral de relevancia, para un calado de 15 cm, que se corresponde con el criterio de altura de bordillo utilizado en los estudios de avenidas en núcleos urbanos. De esta forma se han despreciado todos aquellos píxeles en los que el calado ha resultado inferior a dicho umbral, trazándose la línea correspondiente por los píxeles cuyo calado es significativo, es decir, superior a los 15 cm.

## Conclusiones

La realización del presente contrato ha permitido a la Dirección General del Agua (DGA) del Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino (MARM) contar con una correcta y concreta delimitación de las zonas inundables, Zona de Flujo Preferente (ZFP) y Dominio Público Hidráulico (DPH) en el ámbito del estudio realizado, con la que enriquecer el contenido del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI).

Además de una topografía de gran precisión de los cuatro cauces considerados. Y un conocimiento hidrológico de la cuenca asociada, con la consiguiente mejora en la ordenación territorial y en la prevención de catástrofes por inundación.

Como valor añadido para la DGA, asociado a la gestión y prevención de inundaciones, destacan los siguientes aspectos:

- Este estudio ha supuesto la realización del deslinde más grande llevado a cabo en nuestro país (333,7 km).
- Ha sido uno de los primeros estudios en los que se ha aplicado el RD 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril.
- Y su desarrollo ha incluido el mayor estudio hidráulico bidimensional realizado hasta el momento (166,7 km).