

El Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables en la Demarcación Hidrográfica del Duero

D. Francisco Javier Caballero Jiménez¹, D. Héctor Perotas Van Herckenrode¹, D. Jesús Guerrero González¹, Dña. Blanca Martínez Catllá¹, Dña. Inmaculada Fernández Arias¹, D. Ramón Goya Azañedo² y D. Miguel Ángel Cuadrado Rica²

¹ALATEC Ingenieros Consultores y Arquitectos S.A y ²Confederación Hidrográfica del Duero

jcaballero@alatec.es, hperotas@alatec.es, jguerrero@alatec.es, ifarias@alatec.es, rga.dt@chduero.es y mcr.ca@chduero.es

1 Introducción

En junio del año 2009, Alatec Ingenieros Consultores y Arquitectos S.A. en unión temporal de empresas con Azimut S.A., resultó adjudicataria por parte del el Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino (en adelante MARM)- Confederación Hidrográfica del Duero (en adelante CHD), de los trabajos para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de las Zonas Inundables en la cuenca del Duero.

La cuenca del Duero, es una cuenca internacional (llega hasta Portugal) y en la parte española es intercomunitaria, (se extiende por siete comunidades autónomas, la mayor parte en Castilla y León (98,32%), y el resto en Galicia, Cantabria, La Rioja, Castilla-La Mancha, Extremadura y Madrid).



Figura 1 Cuenca del Duero sobre mapa provincial de España

El ámbito ocupado por las zonas que están siendo estudiadas y que serán el objeto de la representación cartográfica, corresponde inicialmente a las siguientes delimitaciones:

- Superficie de estudio 187.500 Has.
- Longitud de río a delimitar zonas inundables de 2.500 kilómetros (la cuenca del Duero tiene más de 83.200 kilómetros de cauces de diferente entidad)

Los trabajos que se están desarrollando de han asociado en diferentes fases cuyo objetivo fundamental es:

- Análisis preliminar del riesgo de inundaciones y estudio de antecedentes de inundaciones, a fecha de hoy ejecutado.
- Realización de cartografía apoyada en vuelos LIDAR, también ejecutado.
- Estudio histórico-geomorfológico de los tramos, en ejecución.

- Revisión y adaptación de los estudios hidrológicos existentes, ejecutado.
- Realización de estudios hidráulicos con utilización de modelos numéricos, actualmente en ejecución.

Todo ello con el objeto final de elaboración de los mapas de peligrosidad por inundaciones, que incluyan las zonas geográficas con baja, media y alta probabilidad de inundación así como la caracterización de la zona inundable, es decir, la extensión de la inundación, el nivel que podría alcanzar el agua y la velocidad de la corriente, parámetros necesarios para la determinación del dominio público hidráulico, la zona de peligrosidad y la vía de intenso desagüe.

2 Identificación de áreas de riesgo - EPRI / ARPSIs

La entrada en vigor de la Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas (Directiva Marco del Agua) y de su transposición al derecho español a través del Texto refundido de la Ley de Aguas y de la nueva Directiva 2007/60/CE Europea de “Evaluación y Gestión del Riesgo de Inundación”, que entró en vigor el 26 de noviembre de 2007, introducen nuevos criterios a tener en cuenta para la protección del dominio público hidráulico y en la gestión del riesgo de inundaciones dirigida a la protección de personas y bienes.

La citada Directiva 2007/60/CE establece principalmente como actuaciones relevantes: la Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI) , que concluya en la identificación y preselección de unas Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSIs) (antes del 22 de diciembre de 2011), y la elaboración de Mapas de Peligrosidad por Inundaciones y de Mapas de Riesgo de Inundación que muestren las consecuencias adversas potenciales asociadas con diversos escenarios de inundación (antes del 22 de diciembre de 2013).

2.1 Metodología de ejecución de EPRI y ARPSIs

La metodología para alcanzar los objetivos previstos se apoya, en la recopilación y análisis de la información existente y disponible sobre inundaciones, lo cual debe permitir obtener con economía de medios una efectiva obtención de resultados en esta fase PRELIMINAR, posponiendo para estudios posteriores la delimitación detallada de las áreas con peligro de inundación y del riesgo correspondiente.

El análisis de la peligrosidad de inundación o inundabilidad, puede abordarse desde diferentes perspectivas metodológicas, (históricas, geológico-geomorfológicas, hidrológico-hidráulicas...), siendo en todo caso más efectivo el estudio combinado de todas ellas.

La metodología que se propone para la determinación de las peligrosidades se fundamenta en el método geomorfológico-histórico, por existir mayor información de este tipo que de estudios hidráulicos de inundaciones generalmente menos extendido. Está también basada en gran medida en las aplicaciones SIG de superposición y combinación gráfica de los diferentes factores implicados en el proceso.

Para efectuar el análisis de peligrosidad en el área de estudio se ha recopilado inicialmente toda la información general disponible a fin de obtener una información homogénea cada cuenca, subcuenca o tramo de cauce relativa a:

- Información topográfica del área de estudio. Análisis específicos de la fisiografía en la cuenca de estudio.
- Cartografía y descripción de las propiedades edafológicas.
- Cartografía y descripción de las características geológico-geomorfológico, que establezca.
- Cartografía de los diferentes usos del suelo y de la vegetación predominante.
- Localización de las diferentes obras de protección frente a avenidas existentes en la cuenca, si las hubiera.

Así mismo, en todos los peligros contemplados se ha recopilado la información referente a **eventos históricos**, así como la obtención de las series instrumentales más extensas posibles.

- Recopilación de información de inundaciones históricas.
- Análisis de intensidad y recurrencia de episodios

En conclusión se trata de determinar los PELIGROS DE AVENIDA E INUNDACIÓN FLUVIAL, teniendo en cuenta la escala de trabajo, y elaborar una cartografía base de peligros y riesgo de inundación (incluidas las orillas canalizadas) e integración en un GIS e incorporación al visor de inundaciones existente.

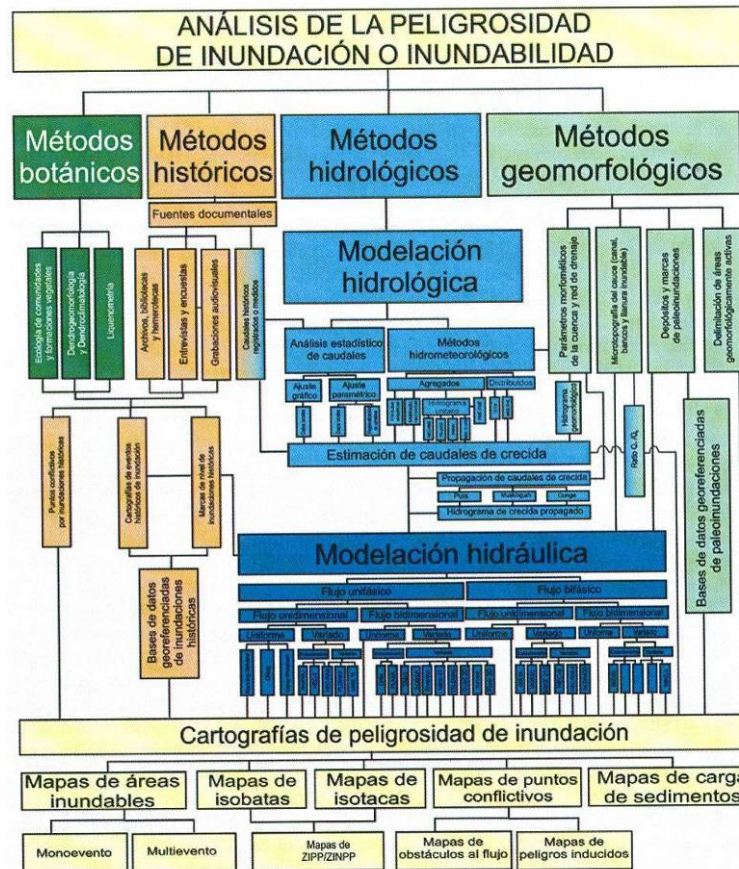


Figura 2 Cuadro resumen de los distintos métodos de análisis de la peligrosidad de inundaciones (Díaz 2002c)

Para ello, como esquema general de ejecución para la EPRI e identificación de las ARPSI's se ha seguido la metodología reseñada en el esquema anterior y consistente de forma general en: recopilación de la información histórica de episodios de inundación, recogida en el Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas (CNIH) y complementada con datos de hemerotecas y encuestas sobre el terreno, a analizar por un lado, y confrontar con datos procedentes de información geológica-geomorfológica que permiten la identificación de zonas aluviales y torrenciales por otro lado, y con datos relativos a la topografía de la cuenca, la red hidrográfica y los usos del suelo y sus cambios, así como con estadísticas de población. De igual modo se identificarán las infraestructuras hidráulicas existentes como presas, canales, etc y las grandes vías o ejes de comunicación como autopistas, carreteras o ferrocarriles que han contribuido a una nueva ordenación del territorio, y que en algunas áreas ha significado una importante modificación en el efecto de las inundaciones. Igualmente, para el conocimiento de las inundaciones también es importante la recopilación de los estudios existentes sobre delimitaciones de dominio público hidráulico (DPH) y de riesgo y/o peligrosidad por inundaciones e incluso la influencia del cambio climático en la distribución de las precipitaciones.

Para poder utilizar de una forma fácil y eficaz la información, generalmente muy amplia por la magnitud de la superficie del territorio de estudio que comprende la Cuenca del Duero, se propone el desarrollo sobre herramienta GIS convencional (ARCGIS) de una secuencia de aplicaciones que permita comparar y filtrar la información disponible. Para ello proponemos el análisis indicado sintéticamente en el gráfico anterior y desarrollado en apartados siguientes.

La información recopilada se ha completado con estudios complementarios en aquellas áreas donde la información ha sido escasa o es necesario aplicar criterios específicos de definición.

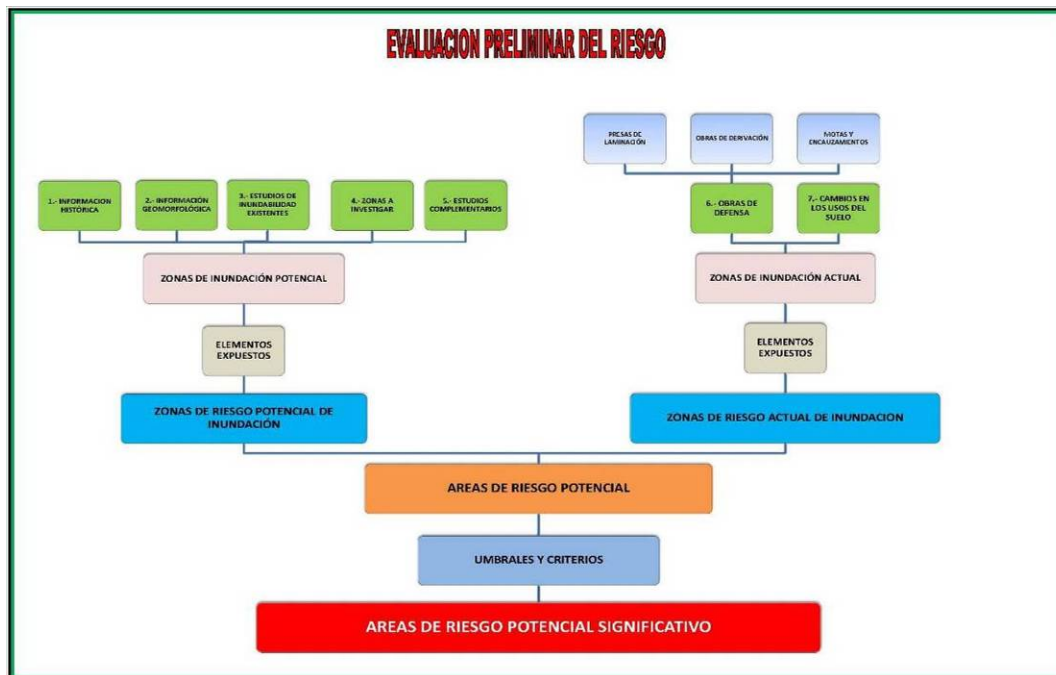


Figura 3 Esquema metodológico para determinación de la evaluación preliminar del riesgo de inundaciones

2.1.1 Recopilación y análisis de la información disponible

Se han recopilado datos y documentos existente y efectuado un análisis de ellos para valorar tanto el nivel de aportación de información como de la validez de la misma para la consecución de los objetivos propuestos.

Así mismo, se han realizado las operaciones necesarias para la conversión de todos los datos cartográficos e información georreferenciada al mismo sistema de referencia geodésico (ETRS89) con el fin de poder efectuar superposiciones y análisis de interacción entre ellos.

La utilización del sistema de referencia ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989), Sistema de Referencia Terrestre Europeo 1989, se fija en consonancia con el Real Decreto 1071/2007 de 27 de julio, por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España, y que establece un sistema ligado a la parte estable de la placa continental europea, y consistente con los modernos sistemas de navegación por satélite GPS, GLONASS y el europeo GALILEO.

La metodología desarrollada se ha adecuado a la información existente disponible, y en concordancia con los requerimientos de la Directiva 2007/60/CE y su transposición a la legislación española conforme al Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de “evaluación y gestión de riesgos de inundación”.

La información recopilada ha sido analizada y estructurada conforme a los diferentes métodos de evaluación preliminar de riesgos de inundación para alcanzar los objetivos siguientes según el dictado de la Directiva citada:

- Identificación de las zonas de peligro de inundación significativas, (artículo 4 de la Directiva 2007/60/CE) sobre la base cartográfica BCN25 citada y MDTs disponibles se han identificado aquellas zonas que han sufrido inundaciones en el pasado y que son susceptibles de tener inundaciones en un futuro, basada en el tratamiento de la siguiente información:
 - Información histórica (Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas – CNIH)
 - Información Geológica- Geomorfológica existente. Zonas aluviales y torrenciales.
 - Información recopilada de estudios existentes de peligrosidad de inundación y de datos hidrológico-hidráulicos (aforos, mapas de caudales, etc.)
 - Modificaciones y cambios en la ordenación de los terrenos potencialmente inundables por la existencia de nuevas infraestructuras.

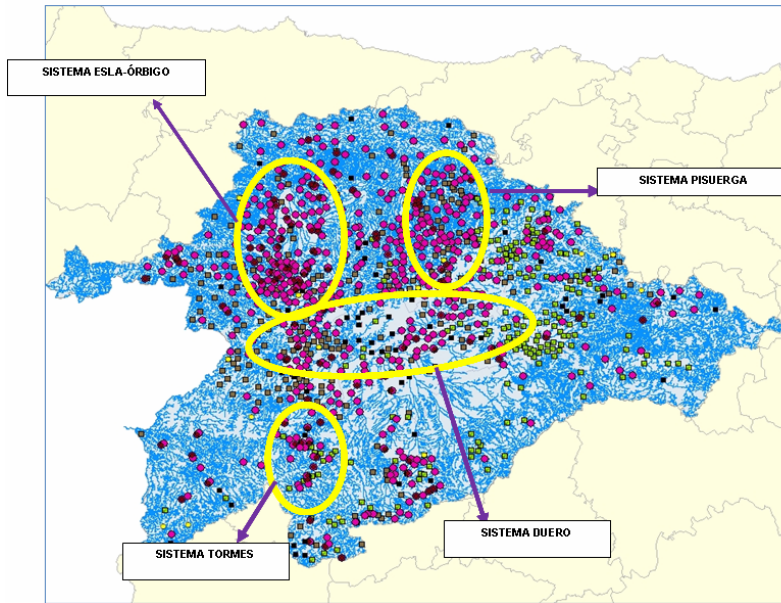


Figura 4 Distribución de episodios (eventos) de inundaciones en los distintos cauces de la Cuenca del Duero. Es apreciable la concentración de eventos que indican las zonas históricas de mayor riesgo.

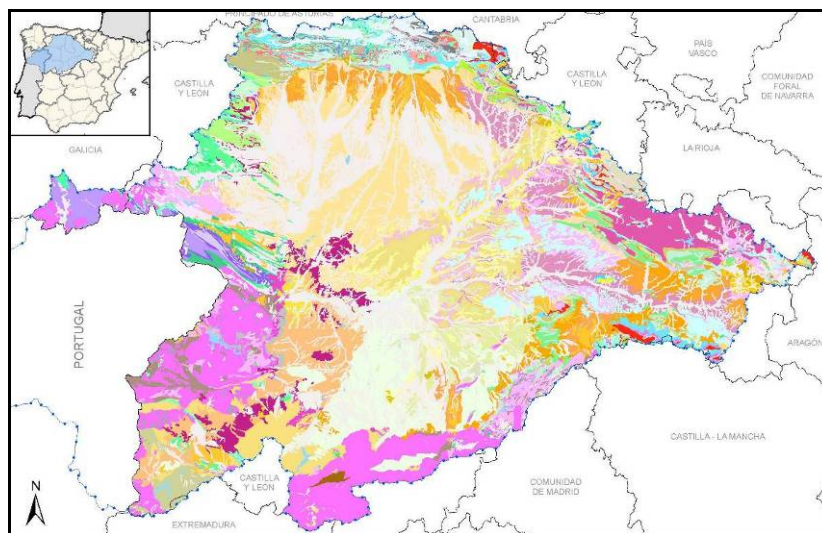


Figura 5 Mapa geológico de la Cuenca del Duero. Fuente C.H Duero



Figura 6 Imágenes fotográficas del vuelo americano del año 1957 (izquierda) y del PNOA del año 2007(derecha). Se aprecian las modificaciones sufridas en el cauce y llanuras de inundación y el riesgo sobrevenido.

- Determinación de las áreas potenciales de riesgo significativo de inundación. (artículo 5 de la Directiva 2007/60/CE) En esta fase se han delimitado las áreas con riesgos importantes ARPSIs, de los cuales se deberán realizar estudios de detalle y obtener la cartografía de riesgo de inundación, incluyendo las delimitaciones del dominio público hidráulico (DPH), zonas de flujo preferente (ZFP), etc. Para su determinación se han utilizado los documentos e información recopilada relativa a
 - Usos del suelo, actuales y pasados a partir del análisis de los datos del SIOSE, Corine, INE, Catastro, estudios existentes de riesgos de inundación y otros, y modificaciones y cambios en los usos del suelo por nuevas ordenaciones y actuaciones urbanísticas.

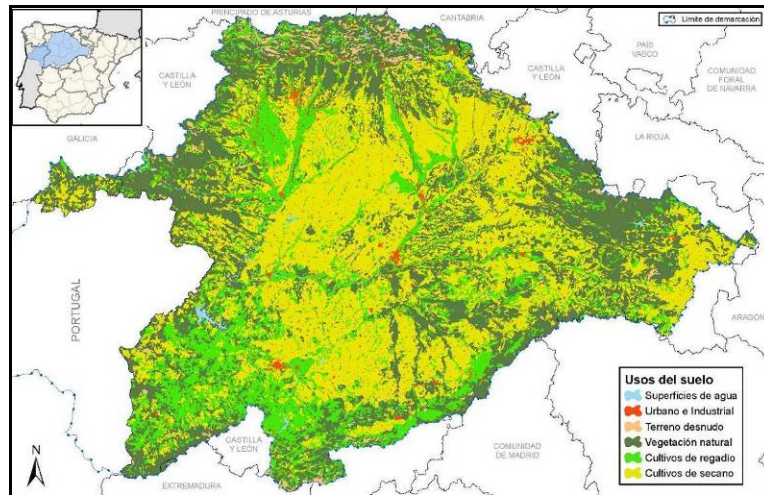


Figura 7 Distribución de usos del suelo la Cuenca del Duero. Fuente C.H Duero.

3 Análisis histórico y geomorfológico por cauces

3.1 Análisis histórico

Es necesario coordinar la evolución de los cauces con la sostenibilidad de los terrenos afectados por la actividad fluvial donde puedan seguir produciéndose los procesos dinámicos de desplazamientos y desbordamientos con mantenimiento ambiental de las márgenes y la conectividad de los cauces para poder lograra un equilibrio entre el régimen de caudales y las morfologías que se desarrollan

Los sistemas fluviales en general tienden a sufrir modificaciones en su cauce, con cambios tanto en planta como en su perfil, como consecuencia de su actividad natural, estos cambios en muchos casos se ven acelerados por actuaciones antrópicas de diferente índole ejecutadas en toda la cuenca hidrográfica.

El conocimiento de los episodios de inundaciones y sus consecuencias sobre las morfologías de los cauces es fundamental para poder establecer las medidas adoptar.



Figura 8 Imágenes de inundaciones históricas, en la imagen izquierda río Orbigo (año 1940) y en la derecha puente de Simancas (Valladolid) en marzo de 2001

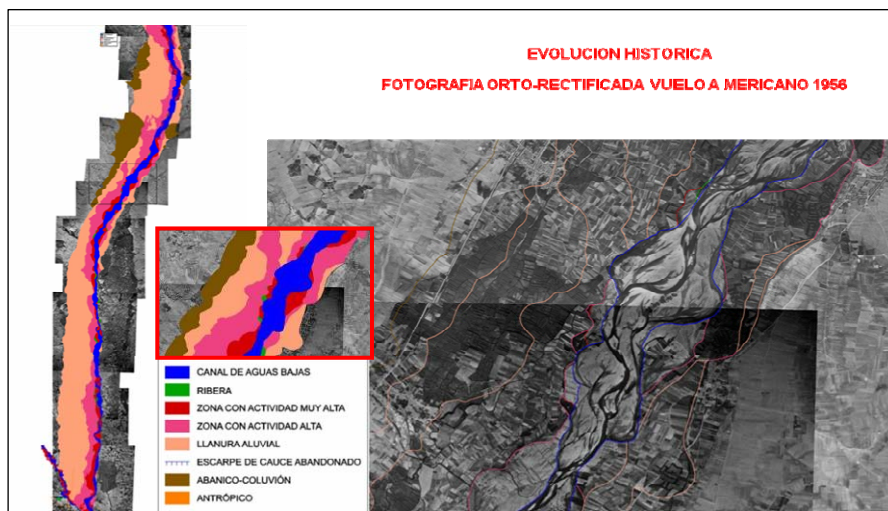


Figura 9 Inundaciones en la playa de las Moreras, río Pisuerga en Valladolid (marzo de 2001)

El análisis histórico se ha abordado fundamentalmente desde perspectivas diferentes.

- Recopilación de información sobre inundaciones históricas en fuentes documentales, desde los tiempos más remotos posible hasta la actualidad.
- Recopilación de información sobre inundaciones históricas a partir de una intensa campaña de encuestas a la población ribereña y a los ayuntamientos implicados.
- Incorporación de la información a una base de datos ya existente

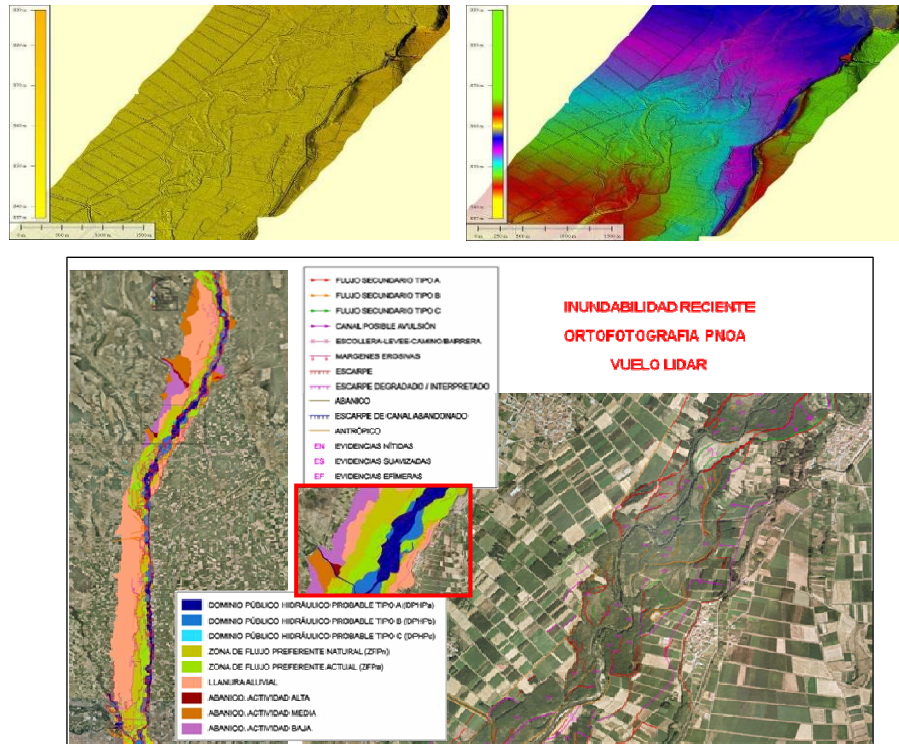
El objetivo ha sido delimitar sobre una cartografía digital de base los datos obtenidos referenciando tanto su posición geográfica como las características observadas, todo ello utilizando herramientas de gestión GIS.



3.2 Análisis geomorfológico

El **análisis geomorfológico**, se ha fundamentado en delimitar cartográficamente cada uno de los elementos o formas superficiales existentes en las zonas de estudio, describiéndolas, ordenándolas sistemáticamente e investigando su origen y desarrollo, estableciendo su comportamiento frente a la elevación del nivel de las aguas continentales en los diferentes eventos que puedan producirse.

Para ello se han utilizado los **datos de eventos históricos** y del **comportamiento de las formas de relieve** en esos acontecimientos, de los documentos gráficos disponibles, **planos y fotografías aéreas oblicuas o verticales** de diferentes épocas como el **Vuelo Americano** (años 1956-57) o el **vuelo del PNOA** (años 2007-2010) así como de los resultados obtenidos de la ejecución de **vuelos LIDAR** y **trabajos topo-cartográficos** de detalle, de diferente índole (fotogrametría y trabajos topográficos de campo), y complementado con una **campana de reconocimiento “in situ”**.



4 Estudio hidrológico

La filosofía del contrato pretende que, en gran medida (salvo para los estudios de régimen alterado), los trabajos a realizar en este campo estuvieran encaminados a contrastar los valores aportados por el Mapa de Caudales Máximos (aplicación CAUMAX v02). De esta forma, y de forma previa se realizó un estudio grosero en el que se determinaron una serie de caudales en puntos de control situados en el Duero y en sus principales afluentes, delimitando las cuencas aportantes y procediendo a su cálculo por el método racional de la instrucción 5.2.I.C de carreteras.

Estos valores dieron lugar a un primer contraste con los resultados obtenidos con CAUMAX y condujeron a los técnicos implicados a proponer la realización de nuevos modelos específicos en la conocida como región 25 que engloba a los cauces de los ríos Huebra, Tormes y Agueda, dado que en la misma se obtenían importantes diferencias de caudal y se consideraban excesivos los valores aportados por CAUMAX.

Finalmente, a petición de la Confederación Hidrográfica del Duero, se ha ejecutado un modelo hidrometeorológico de toda la cuenca, desde su nacimiento hasta la llegada a la frontera con Portugal, mediante el programa HEC-HMS.

La realización del modelo hidrometeorológico se ha estructurado en cuatro grandes fases. La primera ha consistido en el estudio detallado de la cuenca atendiendo a la distribución de ríos y delimitación de las subcuencas. El análisis de la precipitación constituye la segunda fase del trabajo y en la misma se han seleccionando las consideradas como mejores estaciones pluviométricas posibles para la construcción del modelo, desde el punto de vista de existencia de datos y de la buena distribución a lo largo y ancho de la cuenca. Se han extrapolado los pluviógrafos para obtener intensidades de lluvia mayores de acuerdo con las dimensiones de la cuenca y se ha aplicado un coeficiente reductor por área. En una tercera fase se ha realizado el modelo hidrometeorológico propiamente dicho, modelándose la respuesta de la cuenca en régimen natural. Por último, en la cuarta fase se han obtenido los caudales máximos correspondientes a distintos periodos de retorno, para diversos puntos definidos sobre la Cuenca del Duero.

Tras comparar el modelo realizado con CAUMAX las conclusiones que se pueden obtener es que ambos se ajustan bastante bien en toda la cuenca, con diferencias asumibles desde el punto de vista hidrológico (15-20%) salvo en la mencionada región 25, en la que las diferencias de caudal obtenidas son notables, ascendiendo los caudales del CAUMAX a casi el doble de los obtenidos con el cálculo hidrometeorológico.

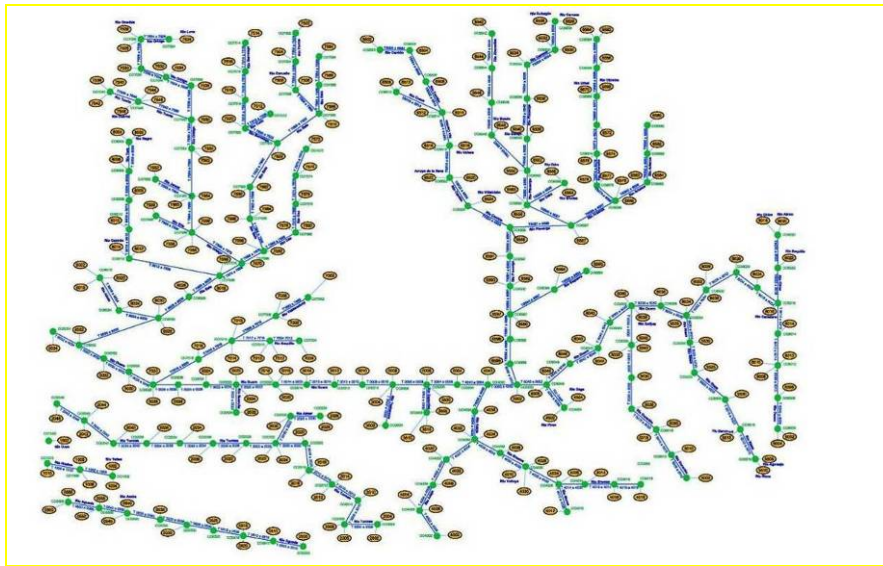


Figura 10 Esquema de modelo hidrometeorológico realizado.

5 Estudios hidráulicos

En este apartado se detalla el proceso seguido en la ejecución de los estudios hidráulicos, que si bien presentan un orden predeterminado, forman parte de un proceso global iterativo en el que la ejecución de un determinado paso puede suponer la vuelta a otro previo, hasta la obtención de los resultados definitivos.

5.1 Revisión de la cartografía LIDAR y elección del producto a emplear

El producto final obtenido del vuelo LIDAR se presenta en 4 tipos de archivos MDT, MDS, MDE y MDSE siendo:

- MDT: Modelo digital del terreno excluyendo las edificaciones y puentes.
- MDS: Modelo digital del terreno excluyendo las edificaciones.
- MDE: Modelo digital del terreno excluyendo los puentes.
- MDSE: Modelo digital del terreno incluyendo edificaciones y puentes

De modo general, mediante una inspección visual, se revisa la cartografía para la detección de errores tales como zonas de arbolado denso que en ocasiones no han permitido definir correctamente el terreno, puntos con cotas no reales, edificaciones no excluidas o que al ser eliminadas se rebaja en exceso generando un hueco en el terreno. Estos errores se corrigen en cada producto correspondiente.

En segundo término, y ya teniendo en cuenta la perspectiva hidráulica se revisan en los obstáculos situados sobre el cauce con la finalidad de eliminarlos de cara a la futura realización de los modelos en régimen natural que deben permitir que circule la máxima crecida ordinaria. De este modo se detectan y eliminan tableros, pilas o estribos de los puentes, así como algunas edificaciones situadas al borde del cauce.

Tras este proceso, de entre los 4 tipos de cartografía obtenida se ha optado por escoger como base para los modelos hidráulicos el MDT, que no incluye puentes ni edificaciones, ya que permite un mallado uniforme a partir del cual ir añadiendo los diferentes elementos del terreno. Así los taludes o muros se definen a través de líneas de rotura, las edificaciones con superficies de rugosidad elevada o con zonas de no mallado y los puentes

como elementos unidireccionales denominados “orificios” que permiten introducir las dimensiones y características de los mismos.

El resto de productos cartográficos se emplean como archivos auxiliares de trabajo que tratados correctamente a través de aplicaciones tipo SIG permiten identificar cambios bruscos de pendiente, zonas con agua en el momento del vuelo, superficies elevadas, etc.



Figura 11 Imagen tomada en la visita de campo al río Aranzuelo

5.2 Modelización con Infoworks Rivers

La modelización hidráulica se ha realizado con la aplicación informática *Infoworks Rivers* que permite la realización de modelos de flujo bidimensional gracias a un potente método de cálculo capaz de manejar un gran abanico de formas de cauces, tamaños y pendientes, pudiendo representar en las llanuras de inundación diferentes rugosidades y la totalidad de los elementos que se encuentran en las mismas tales como puentes, edificaciones, obras de paso, etc.

Los pasos seguidos para cada cauce a estudiar son: tramificación del cauce, realización de un modelo grosero que defina el polígono de cálculo, definición de los polígonos de rugosidad y digitalización del cauce, realización de modelos de aguas bajas y de aguas altas, post-procesos y presentación de los resultados finales.

5.2.1 Tramificación del cauce

Es evidente que para un mismo cauce el caudal diferirá longitudinalmente aumentando con el aumento de la superficie de la cuenca en cada punto. Sin embargo los modelos hidráulicos requieren como condición de partida que se introduzca el caudal que circula por el cauce en una longitud determinada.

Con el fin de que el error cometido en la introducción del caudal de cálculo sea el menor posible e intentando minimizar el tiempo de cálculo de cada modelo, se tramifican los ríos que presentan mayores variaciones de caudal o una gran longitud. El criterio general que se ha adoptado a la hora de tramificar un cauce es doble, por un lado se establece que las diferencias entre el caudal en el punto inicial del cauce en estudio y el punto final del modelo de cada tramo sean inferiores al 15-20% (error que se considera admisible en cualquier cálculo hidrológico), por otra parte se considera que la longitud total del tramo a modelizar no debe exceder los 50-60 kilómetros, puesto que a partir de esta longitud los modelos aumentan notablemente el tiempo de cálculo.

5.2.2 Definición de malla de baja precisión y rugosidad inicial. Modelo grosero

Los modelos hidráulicos de cualquier cauce se inician realizando un modelo grosero, que de una primera visión de las magnitudes de la inundación máxima tanto en calados y velocidades como en superficie inundada.

El objeto principal de este modelo es ajustar el polígono de cálculo lo máximo posible para definir el espacio de trabajo. Además este modelo tendrá una función complementaria como detector de errores cartográficos no localizados en la primera revisión realizada y servirá de referencia para conocer las poblaciones afectadas, zonas que requieren una ampliación cartográfica y las infraestructuras que deberán tenerse en cuenta en los modelos definitivos.

Las características del modelo grosero son: caudal máximo a simular (periodo de retorno de 500 años), un mallado de baja precisión por la elevada superficie de cada triángulo (500-1.000 m²) y una rugosidad uniforme suficientemente elevada en todo el polígono de simulación (0,045-0,050).

Se comienza realizando un primer polígono que abarque toda la cartografía disponible para de manera iterativa ir ajustando el polígono a la inundación obtenida, habitualmente con dos o tres iteraciones se puede dar por concluido el modelo grosero. En caso de considerarse necesario, en estos modelos previos se incorporan elementos definitorios como líneas de rotura para obtener una mayor precisión.

5.2.3 Definición de polígonos de rugosidad y digitalización del cauce

Dentro del polígono de cálculo definido en por el modelo grosero, se debe conocer las diferentes rugosidades del terreno tanto en el cauce como en las márgenes del mismo. Para ello, se digitaliza el cauce y se toman los polígonos de rugosidad del Corine Land Cover 2006 que se encuentren dentro de nuestro polígono de cálculo.

La información obtenida del CLC es revisada y corregida en función de los usos realmente existentes en el momento de realizar el modelo, prestando especial atención a las zonas urbanas que no estén incluidas en el mismo.

Con estos elementos se crea una capa *shape* de usos del suelo y a la que asignaremos diferentes rugosidades. Para ello nos servimos de la “*Guía Metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. Estudios Hidrológicos e Hidráulicos*” en la cual se incluye una tabla que asocia los usos del suelo del CLC con un número de Manning.

Las visitas realizadas a los cauces y las fotografías aéreas disponibles ayudarán tanto a delimitar los distintos usos del suelo como a asignarle una rugosidad correcta.

5.2.4 Modelos de aguas bajas y aguas altas

Concluido el pre-proceso se realizan los modelos definitivos en régimen permanente y que se dividen en modelos de aguas bajas y modelos de aguas altas.

El modelo de aguas bajas se empleará para simular caudales asociados a un periodos de retorno moderados, de hasta 10 años. Se caracteriza por un mallado de gran precisión en la zona del cauce, con triángulos de pequeña superficie. El modelo se mejora de forma iterativa, aumentando la zona de mallado de precisión en cada cálculo hasta incluir el total de la inundación. En las zonas colindantes al mallado de precisión el tamaño de triángulo será mayor si bien siempre de un tamaño reducido.

Tomando como base este modelo, se realiza el modelo de aguas altas que contendrá triángulos de mayor superficie que el anterior con la misma zonificación que en el modelo de aguas bajas. Este modelo será el empleado para las crecidas mayores de 10 años de periodo de recurrencia.

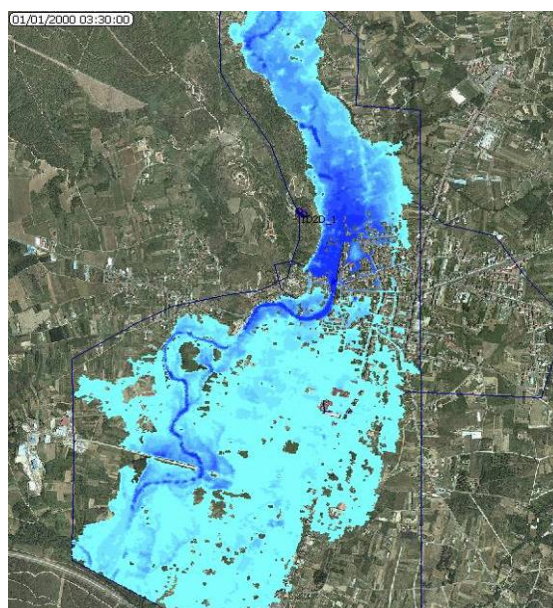


Figura 12 Ejemplo de modelización hidráulica en zona urbana

El tamaño de los triángulos en cada modelo dependerán del cauce y del tramo concreto a modelizar, así por ejemplo para cauces estrechos se hacen triangulaciones muy pequeñas que incluyan dentro una hipotética sección transversal de la zona más baja del cauce como mínimo 2 o 3 triángulos, de manera que se defina correctamente la morfología del cauce.

En ambos modelos se incluyen diferentes elementos de modelización tales como líneas de rotura, plataformas, puentes, obras de drenaje transversal, edificaciones, etc. Además se incluyen polígonos de menos superficie de triángulo para zonas que requieran mayor precisión o que son más complicadas de definir.

Nuevamente el proceso de inclusión o eliminación de elementos es iterativo, mejorando en función de los resultados que se vayan obteniendo con el fin de alcanzar un modelo final que simule de la manera más fiel posible la realidad.

Estos procesos se llevan a cabo empleado el mayor de los caudales previstos para cada tipo de modelo, Q10 para el modelo de aguas bajas y Q500 para el de aguas altas, puesto que serán lo que produzcan mayores superficies inundables.

5.2.5 Resultados finales: Zonas inundables, DPH y ZFP

Una vez finalizados y validados cada uno de los modelos se está en disposición de obtener las zonas inundables asociadas a cada periodo de retorno de estudio y las zonas de especial protección como la zona de dominio público hidráulico (DPH) y la zona de flujo preferente (ZFP).

Tanto las zonas inundables para cada periodo de retorno como el DPH se obtienen directamente simulando el caudal correspondiente. En el caso del DPH, como es conocido, se tratará del caudal de la máxima crecida ordinaria el cual no está asociado a un periodo de retorno fijo sino que varía según el cauce. A partir de este aplicando la definición del *Reglamento del Dominio Público Hidráulico*, se obtienen la zona de servidumbre (5 metros de anchura a cada lado del cauce) y la zona de policía (100 metros de anchura a cada lado del cauce).

El proceso de obtención de la zona de flujo preferente (ZFP) resulta más laborioso puesto que su definición es más compleja; según *el Reglamento del Dominio Público Hidráulico* la ZFP será la envolvente de la zona de inundación peligrosa (ZIP) y la vía de intenso desagüe (VID).

A su vez la ZIP viene definida como la envolvente de aquellas zonas que para la avenida de 100 años cumplan que el calado es mayor de 1 metro, la velocidad mayor de 1 m/s o bien la multiplicación del calado por la velocidad mayor de 0,5 m²/s. Mientras que la VID se define como la zona por la que pasaría la avenida de 100 años de periodo de retorno sin producir una sobreelevación mayor que 0,3 m. A esta última definición la Guía Metodológica añade la recomendación de no aumentar en más de un 10% la velocidad.

5.2.6 Post-proceso y presentación resultados

El último paso del estudio hidráulico consiste en la correcta presentación de los resultados, para lo cual se realiza un post-proceso en el que sirviéndose de las herramientas disponibles en los SIG y en los programas de dibujo se suavizan las líneas de inundación y se calculan los calados reales en cada punto del terreno.

El producto final consiste en una colección de capas *shape* con los polígonos correspondientes a cada zona inundable calculada, así como los ficheros *raster* con los valores de los calados obtenidos.

6 Conclusiones

El estudio se está desarrollando siguiendo las directrices establecidas para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables en el Real Decreto por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico y se centrará en la determinación de la peligrosidad frente a las inundaciones en el ámbito de la totalidad de las aguas continentales de la Demarcación Hidrográfica del Duero y entre otras finalidades aportará datos a las administraciones competentes con utilización prioritaria en materia de ordenación del territorio, planificación urbanística y protección civil, para prevenir y minimizar los efectos de las inundaciones y crecidas fluviales y como una información imprescindible para incrementar la seguridad de los ciudadanos y sus bienes.