

Modelo hidráulico bidimensional del río Besós, desde la confluencia de los ríos Congost y Mogent hasta la desembocadura

***Técnica y Proyectos S.A.: Alexandre Plaza Castel, Àngel Barrero Franquet,
Noemí Guerrero Guerrero, Miguel Ángel Gago Lara***

***Agència Catalana de l'Aigua: Eva Crego Liz, Àlex Gràcia Tarragona, Lluís Godé Lanao,
Evelyn García Burgos, Joan Verdú Arnal***

aplaza@typsa.es abfranquet@typsa.es nguerrero@typsa.es

ecrego@gencat.cat agracia@gencat.cat

1 Introducción

La “Planificación de los Espacios Fluviales” (PEF) se está desarrollando en Cataluña desde el año 2000 por parte de la Agencia Catalana del Agua (ACA). Su principal objetivo es la preservación del espacio fluvial para dar cumplimiento por un lado a los principios de la Directiva Marco del Agua (DMA, 2000/60/CE) en lo que respecta al conocimiento de los hábitats y estructuras de las riberas, y por otro lado a la Directiva de Gestión y Evaluación del Riesgo de Inundación (2007/60/CE) con el fin de conocer la peligrosidad existente y definir las medidas de protección necesarias para mitigarla. El objetivo general de las PEF es avanzar en la resolución y ordenación de los diversos conflictos hidráulicos, ambientales y morfodinámicos vinculados a la gestión del agua y el medio hídrico del espacio fluvial.

Entre diciembre de 2007 y febrero 2011 TYPESA participó en la elaboración del proyecto de “Planificación del espacio fluvial de la cuenca del Besós”, que ha sido cofinanciado en el marco del programa operativo FEDER 2007-2013. La cuenca del río Besós está ubicada entre las cordilleras Prelitoral y Litoral catalanas, entre las cuales se sitúa la depresión del Vallès. Los principales cursos fluviales de la cuenca nacen en la cordillera Pre-litoral y discurren por la misma hasta llegar a la depresión del Vallès, donde confluyen con el río Besós. Éste ocupa la parte central de dicha depresión, para finalmente cruzar la cordillera Litoral a la altura de Montcada i Reixac y desembocar en el mar Mediterráneo al norte de la ciudad de Barcelona.

La superficie de la cuenca es de 1026 km² y su principal característica es el elevado porcentaje de urbanización (20%). En las márgenes de los principales cursos fluviales se asientan núcleos de población como Montmeló, Mollet del Vallès, Montcada i Reixac, Sant Adrià del Besós o Barcelona, se concentran importantes zonas industriales y pasan algunas de las principales infraestructuras viarias de Cataluña. Este hecho, junto con la elevada torrencialidad típica de las precipitaciones del clima mediterráneo, hace que el riesgo asociado a las inundaciones sea elevado. Inundaciones como las del año 1962 (441 muertos y 374 desaparecidos) o las del año 1994 (4 muertos, 3 desaparecidos y varias infraestructuras dañadas) son una muestra del potencial destructor de las avenidas que se pueden producir en la cuenca, quedando de manifiesto la importancia de una correcta planificación del espacio fluvial.

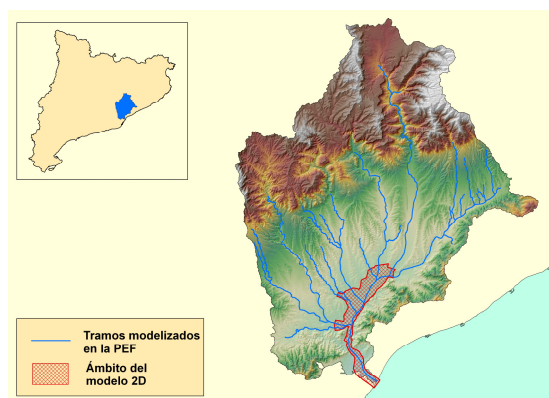


Figura 1 Cuenca del río Besós.



Figura 2 Avenida del 25 de septiembre de 1962 del río Ripoll en Montcada i Reixac.

2 La planificación del espacio fluvial de la cuenca del Besós

Los objetivos concretos de la PEF son la determinación de los caudales de diseño de la cuenca, la delimitación de las zonas inundables para diferentes periodos de retorno, la evaluación del estado ecológico de los ecosistemas fluviales, la evaluación del estado morfodinámico, la zonificación del espacio fluvial, el planteamiento de una serie de medidas orientadas a resolver los problemas detectados y la definición de los criterios de gestión, intervención y ocupación del espacio fluvial con el objetivo final de sensibilizar, informar y concienciar a la población.

Para dar respuesta a estos objetivos los trabajos se dividen en cuatro grandes bloques:

1. Caracterización del medio físico y biótico.
2. Diagnóstico del medio físico.
3. Pronóstico y propuesta de actuación.
4. Plan de gestión específico del espacio fluvial.

La diagnosis del medio físico se divide a su vez en diagnosis de inundabilidad, diagnosis morfodinámica, diagnosis ambiental y diagnosis de estructuras e infraestructuras presentes en el espacio fluvial. La diagnosis de inundabilidad consta de un estudio pluviométrico, un estudio hidrológico y un estudio hidráulico. En el estudio hidráulico se modelizan 270 km de cursos fluviales que incluyen el río Besós y sus principales afluentes (ríos Congost, Mogent y Ripoll y las rieras del Tenes, Caldes y Seca). La mayor parte de los modelos se ha realizado mediante un modelo hidráulico unidimensional (HEC-RAS). No obstante, en la parte baja de la cuenca ha sido necesaria la realización del modelo bidimensional.

A continuación se describen de forma resumida el estudio pluviométrico y el estudio hidrológico realizados para la determinación de los caudales de diseño utilizados en los modelos hidráulicos.

2.1 Diagnóstico pluviométrico e hidrológico

En el estudio pluviométrico se caracterizan las precipitaciones de la cuenca mediante el análisis extremal de las mismas, la asociación de frecuencias de ocurrencia, la obtención de curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia, la caracterización de hietogramas de tormenta reales y sintéticos y la distribución espacial de la lluvia.

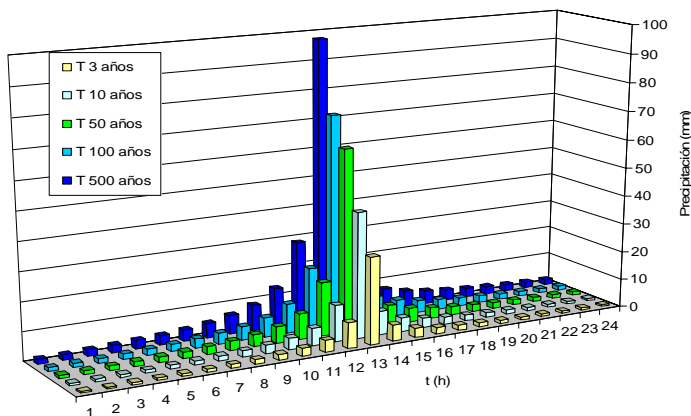


Figura 3 Hietogramas sintéticos para los distintos periodos de retorno de cálculo.

Para ello se han analizado distintas fuentes de información: datos de lluvia cincominutales y diarios de las estaciones pluviométricas del SAIH de la ACA, datos de lluvia diezminutal de las estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico de Cataluña (SMC), datos de lluvia diaria máxima mensual procedentes de las estaciones pluviométricas del Instituto Nacional de Meteorología (INM) y mapas de isolinéas de precipitación diaria máxima de la Dirección General de Carreteras (DGT) y del SMC. El conjunto de la información ha permitido la generación de hietogramas sintéticos de lluvia asociados a los distintos periodos de retorno, que son parte fundamental para la posterior modelización hidrológica de la cuenca (Figura 3).

En el estudio pluviométrico de la cuenca del río Besós es especialmente destacable el análisis realizado sobre la evolución espacio-temporal de los fenómenos de precipitación. En concreto se han analizado los sistemas convectivos de mesoescala cuasi-estacionarios, caracterizados por generar precipitaciones muy importantes en latitudes medias. Estos sistemas de precipitación son estructuras de tormenta de grandes dimensiones, con duraciones que pueden ser de un día o superiores, que generan lluvias de forma persistente e intensa y con una velocidad media de desplazamiento inferior a los 15 km/h. A partir de este análisis se ha comprobado que la evolución espacio-temporal de la precipitación más realista es aquella en la que el núcleo de tormenta tiene una alineación aproximada N-S y una trayectoria SO-NE, con un desfase de una hora entra cada una de las franjas que se muestran en la Figura 4.

Una vez determinados los hietogramas de diseño se ha realizado el estudio hidrológico para la determinación de los caudales de avenida. En primer lugar se han analizado los antecedentes históricos de inundaciones en la cuenca y los datos de las diferentes estaciones de aforo. Por otra parte se ha determinado el periodo de retorno correspondiente a la máxima crecida ordinaria (MCO). Posteriormente se han comparado los caudales obtenidos mediante formulación empírica, el método racional y un modelo hidrometeorológico.

Para la construcción del modelo hidrometeorológico se ha utilizado el programa HEC-HMS y su interfaz HEC-GeoHMS de preproceso mediante herramientas GIS. En primer lugar se ha dividido la cuenca en subcuencas principales (correspondientes a los principales afluentes del río Besós) y éstas a su vez en subcuencas más pequeñas. Para ello se ha utilizado un modelo digital del terreno (MDT) de 30x30 m de tamaño de celda. El modelo hidrometeorológico está formado por 85 subcuencas de cálculo, 51 tramos de propagación de hidrogramas y 91 nodos de cálculo. En la Tabla 1 se muestran las principales características de las subcuencas principales y del conjunto de la cuenca del Besós.

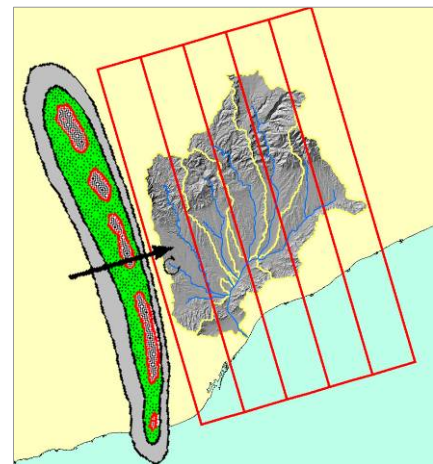


Figura 4 Evolución espacio-temporal de la precipitación.

Para la obtención de la lluvia neta se ha utilizado el método del “Soil Conesevation Service” (SCS), que asume la existencia de un umbral de escorrentía (P_0) por debajo del cual las precipitaciones no provocan escorrentía directa. El umbral de escorrentía se ha determinado a partir de una cobertura de usos del suelo, la pendiente del terreno y el tipo de materiales geológicos de la cuenca.

El modelo hidrometeorológico ha sido validado comparándolo con datos pluviométricos y fonónicos de eventos reales de lluvia.

Como resultado del modelo hidrometeorológico se obtiene un hidrograma en cada uno de los nodos de cálculo. En la Tabla 2 se muestran los principales resultados del modelo hidrometeorológico.

Tabla 1 Características físicas y tiempos de concentración de las distintas subcuencas principales del río Besós

Subcuenca	Longitud (km)	Diferencia de cota (m)	Pendiente (%)	Superficie urbanizada (%)	Tc Témez (h)	Tc California (h)
Río Mogent	29,5	399	1,3%	14,7%	5,8	4,7
Río Congost	44,4	6734	1,5%	12,2%	8,0	6,1
Río Tenes	43,8	958	2,2%	20,6%	6,8	5,3
Riera de Caldes	31,9	901	2,8%	15,7%	5,3	3,7
Riera Seca	17,2	315	1,8%	23,1%	3,4	2,8
Río Ripoll	42,1	633	1,5%	27,1%	6,8	5,9
Besós completo	63,2	741	1,2%	20,9%	10,1	8,9

Tabla 2 Caudales pico y volúmenes de los hidrogramas resultantes de la modelización hidrometeorológica (HEC-HMS) de la cuenca del río Besós en distintos puntos de cálculo.

Punto cálculo	Río Mogent completo		Río Congost completo		Río Tenes completo		Riera Caldes completa		Riera Seca completa		Río Ripoll completo		Río Besós completo	
	Q (m ³ /s)	V (hm ³)	Q (m ³ /s)	V (hm ³)	Q (m ³ /s)	V (hm ³)	Q (m ³ /s)	V (hm ³)	Q (m ³ /s)	V (hm ³)	Q (m ³ /s)	V (hm ³)	Q (m ³ /s)	V (hm ³)
Área (km ²)	181		222		180		112		28		221		1026	
T (años)	Q (m ³ /s)	V (hm ³)	Q (m ³ /s)	V (hm ³)	Q (m ³ /s)	V (hm ³)	Q (m ³ /s)	V (hm ³)	Q (m ³ /s)	V (hm ³)	Q (m ³ /s)	V (hm ³)	Q (m ³ /s)	V (hm ³)
3 (MCO)	178	3,9	152	4,3	161	3,6	54	1,7	34	0,6	174	4,3	444	18,8
10	404	8,1	352	8,9	351	7,2	152	3,7	77	1,3	343	8,6	1.054	38,4
50	806	15,6	729	17,0	661	13,7	351	7,3	151	2,4	677	16,2	2.115	73,6
100	1.011	19,5	927	21,3	816	17,1	460	9,3	190	3,0	862	20,2	2.714	92,1
500	1.526	29,7	1.437	32,5	1.164	26,0	750	14,6	287	4,6	1.373	30,7	4.210	140,6

3 Modelo hidráulico bidimensional del río Besós

3.1 Justificación

La mayor parte de los 270 km de cursos fluviales incluidos en la diagnosis hidráulica de la PEF del Besós se han modelizado mediante un modelo hidráulico unidimensional (HEC-RAS). Sin embargo en la parte baja de la cuenca, donde se encuentra el río Besós, existen los siguientes condicionantes que limitan el uso de un modelo unidimensional:

1. Las llanuras de inundación se amplían, llegando a alcanzar varios centenares de metros.
2. Los terraplenes de las infraestructuras que atraviesan las llanuras de inundación interrumpen y encauzan el flujo desbordado.
3. Se produce la confluencia del río Besós con sus principales afluentes.

Con estos condicionantes la reproducción del comportamiento de las avenidas mediante un modelo unidimensional se complica y es poco realista, por lo que se ha optado por la realización de un modelo bidimensional.

3.2 Descripción del ámbito

El modelo hidráulico bidimensional del río Besós cubre una superficie de unos 40 km². Incluye todo el recorrido del río Besós, desde la confluencia entre los ríos Congost y Mogent hasta la desembocadura, y un tramo de longitud variable de cada uno de sus afluentes principales. Este tramo de afluentes se ha incluido en el modelo bidimensional debido a que en la zona de confluencia el flujo ya es claramente bidimensional. Por otra parte se ha establecido un tramo de solape entre los modelos unidimensionales de los afluentes y el modelo bidimensional con el fin de compatibilizar resultados.

De este modo el modelo incluye el río Besós (18,4 km) y los tramos finales del río Mogent (0,5 km), del río Congost (1 km), de la riera de Tenes (2 km) y su afluente la riera Seca (1,5 km), de la riera de Caldes (2,6 km), de la riera Seca (3,8 km) y su afluente la riera de Polinyà (1,1 km), y del río Ripoll (3 km) y su afluente la riera de Sant Cugat (2,6 km). La longitud total de cursos fluviales incluidos en el modelo es de 36,5 km.

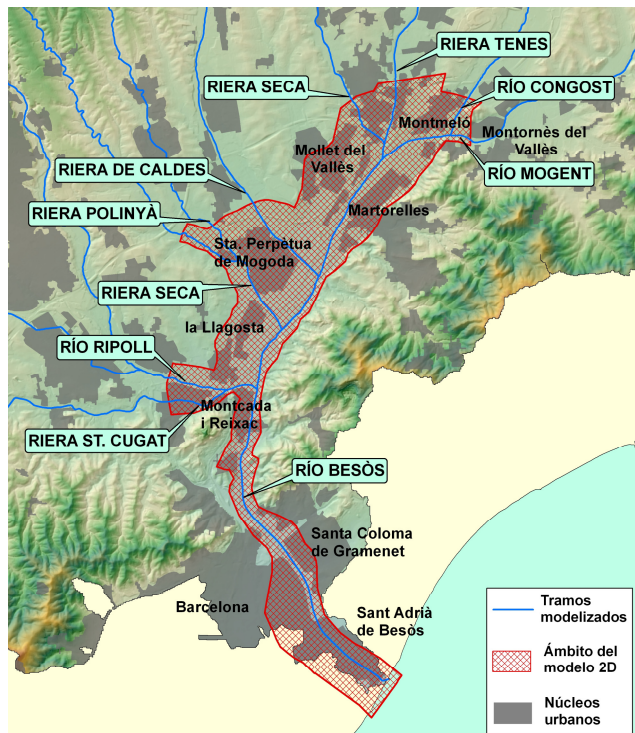


Figura 5 Ámbito del modelo bidimensional.

El ámbito del modelo se sitúa entre los municipios de Paret del Vallès, Montmeló, Montornès del Vallès, Martorelles, Mollet del Vallès, Santa Perpètua de Mogoda, La Llagosta, Sant Fost de Campsentelles, Montcada i Reixac, Ripollet, Santa Coloma de Gramenet i Sant Adrià de Besós. Según datos de densidad de población de estos municipios en el año 2010 (IDESCAT), dentro del ámbito del modelo bidimensional habitarían unas 170.000 personas.

El 64% de la superficie del modelo está ocupada por suelo urbano, suelo industrial o infraestructuras según datos de la cobertura de usos del suelo.

Algunas de las principales infraestructuras de Catalunya cruzan el ámbito, principalmente siguiendo una alineación paralela a los cauces principales. Éstas son la autovía C-17, la autopista C-33, la ronda litoral de Barcelona, la línea de ferrocarril Barcelona-Portbou, o la línea de alta velocidad Barcelona-Girona. Estas infraestructuras suelen situarse sobre importantes terraplenes que interrumpen el flujo natural del agua en caso de desbordamiento. En el caso de la línea de alta velocidad, los terraplenes ocupan parcialmente el cauce del río Besós en algunos tramos.

3.3 Software utilizado

El software utilizado ha sido el SOBEK de *Delft Hydraulics Software* en su versión 2.12.001 de mayo de 2009. Este código ha sido desarrollado por el *WL / Delft Hydraulics*, en colaboración con el *National Dutch Institute of Inland Water Management and Wastewater Treatment (RIZA)* y las principales consultoras de ingeniería hidráulica holandesas.

Se trata de un modelo numérico integrado que permite simular acopladamente el comportamiento unidimensional de redes de flujo (cauces principales) con el comportamiento bidimensional de las llanuras de inundación. El algoritmo que utiliza permite tratar el flujo en régimen mixto (transiciones supercrítico-subcrítico y a la inversa), así como frentes de onda. Además de ser 100% conservativo permite reproducir los fenómenos de secado-mojado (*drying-flooding*) sin necesidad de introducir caudales ficticios. SOBEK incorpora un editor tipo SIG que facilita la construcción del modelo y el análisis y tratamiento de resultados.

Desde el punto de vista computacional, el modelo está dividido en un módulo unidimensional y uno bidimensional basado en una malla regular de elementos cuadrados. Los dos módulos están acoplados de forma implícita y se resuelven simultáneamente en base a las ecuaciones completas de Saint-Venant (continuidad y conservación de la cantidad de movimiento) mediante un esquema en diferencias finitas. Para la conservación de la cantidad de movimiento los módulos 1D y 2D se resuelven por separado, ya que velocidades y caudales son independientes. La continuidad viene marcada por igualdad de niveles en los nodos de conexión (Dhondia & Stelling, 2002).

3.4 Definición geométrica

El modelo está formado por una parte unidimensional para los cauces principales, y una parte bidimensional para las llanuras de inundación, definida por un MDT. La conexión entre la parte 1D y la parte 2D se produce en el momento en que el nivel de agua en la parte 1D alcanza la cota más baja de alguno de los dos extremos de la sección, y viceversa.

Para la construcción de la parte 1D del modelo se ha utilizado el programa HEC-RAS y sus herramientas de preproceso. Una vez generada la geometría de la parte 1D con HEC-RAS se ha importado desde SOBEK.

El MDT de cálculo tiene un tamaño de celda de 15x15 m y ha sido obtenido a partir de un MDT de 1x1 m de los cauces principales y un MDT de 2x2 m de las llanuras de inundación, ambos generados a partir de vuelos LIDAR. No obstante el MDT introducido en SOBEK no es el obtenido directamente de pasar los MDT 1x1 y 2x2 a 15x15 m, sino que se le ha aplicado un tratamiento previo.

El primer paso ha sido rellenar en el MDT 15x15 los cauces incluidos en la parte 1D del modelo, de modo que no se duplicara la capacidad de los mismos (Figura 2a). Posteriormente se han sobreelevado las celdas del MDT 15x15 por las que pasan terraplenes o motas hasta la cota máxima del MDT original, ya que en el paso a 15x15 se suaviza la altura de los puntos altos (Figura 2b). De este modo se reproduce correctamente la obstrucción al flujo que representan estos puntos altos. Por último se han sobreelevado las celdas coincidentes con los puentes y pasarelas hasta la cota superior del tablero, ya que la definición de estructuras en SOBEK sólo permite introducir la obertura, sin tener en cuenta el tablero que queda por encima.

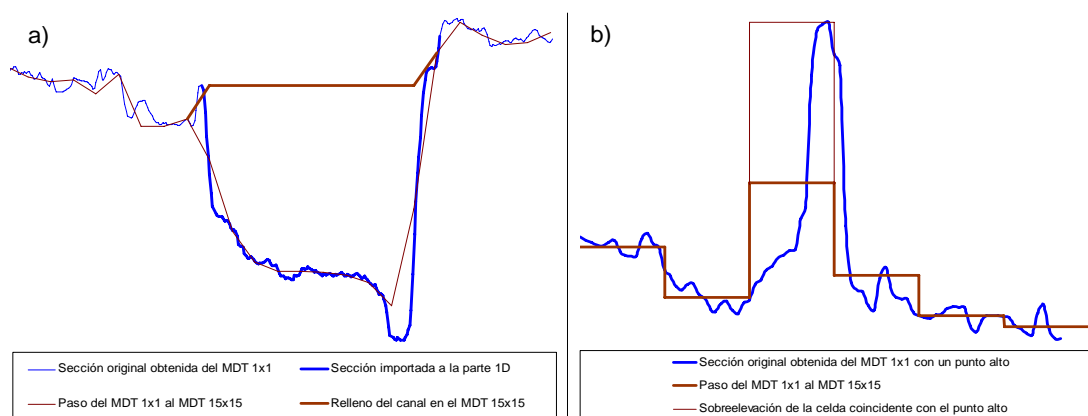


Figura 6 Tratamiento del MDT. a) Relleno del canal; b) Sobreelevación de puntos altos.

Por otra parte, tal y como se ha comentado anteriormente, la línea de alta velocidad se sitúa paralelamente al cauce principal del río Besós. Su terraplén tiene hasta 9 m de altura en algunos tramos, por lo que representa una importante barrera al flujo desbordado de los cauces principales. No obstante, en el momento de la realización de los vuelos LIDAR para la construcción de los MDT la línea se encontraba en construcción, de modo que ha habido que incorporar el terraplén, los viaductos, los pasos inferiores y las obras de drenaje al modelo para que éste no quedara obsoleto en el momento de finalización de las obras.

Para la definición de las estructuras de la parte 1D (puentes, pasarelas, viaductos, azudes, motas, encauzamientos, muros, traviesas etc.), se ha utilizado la información obtenida de una campaña de reconocimiento de campo y de una serie de levantamientos topográficos de las mismas realizados por el Instituto Cartográfico de Cataluña. En cuanto a las estructuras de paso, dado que SOBEK sólo permite la introducción de un solo ojo simétrico, el procedimiento seguido ha sido: 1) crear la estructura con HEC-RAS; 2) buscar la abertura equivalente; 3) crear la estructura en SOBEK con esa abertura equivalente; 4) comparar el nivel de agua obtenido para un determinado caudal entre la estructura modelizada en SOBEK y HEC-RAS; 5) ampliar o reducir la sección equivalente de modo que los niveles obtenidos con SOBEK sean similares a los obtenidos con HEC-RAS (Figura 7).

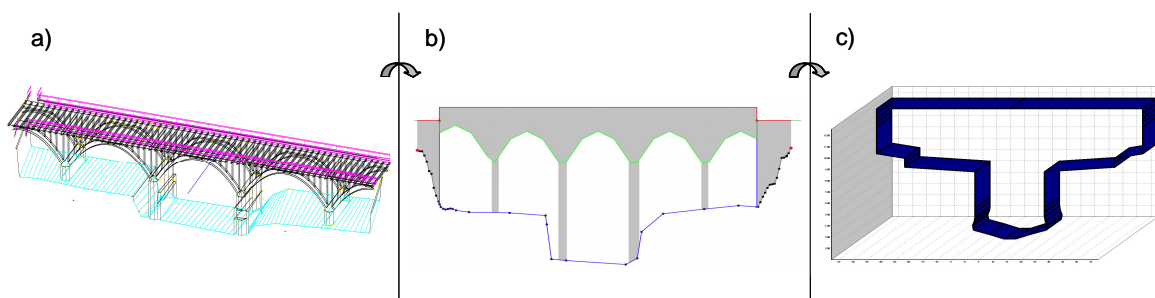


Figura 7 Introducción de las estructuras en SOBEK: a) Levantamiento topográfico; b) Sección HEC-RAS; c) Sección SOBEK equivalente.

Paralelamente se han inventariado los pasos inferiores y obras de drenaje presentes en la parte 2D del modelo y se han introducido en el modelo SOBEK mediante la utilización de *culverts*. Estos elementos, ubicados en tramos de conexión 1D-2D, permiten el paso del agua en la parte 2D bajo los terraplenes de las diferentes infraestructuras viarias.

Finalmente cabe hacer referencia a la determinación del coeficiente de rugosidad de Manning. En la parte 1D del modelo el coeficiente se ha determinado en base a tablas y formulaciones empíricas (Chow, 1959, Arcement & Shneider, 1989), partiendo de la información obtenida de las secciones de reconocimiento realizadas durante la campaña de campo. No obstante, es sabido que existe cierta diferencia entre los resultados obtenidos con HEC-RAS y la parte 1D de SOBEK, debido esencialmente a la metodología de cálculo. Para corregir esta diferencia se puede aplicar un factor de corrección en el valor del coeficiente de rugosidad de Manning, de modo que los resultados sean equivalentes. En este caso se ha incrementado el valor del coeficiente de Manning en SOBEK en 0,006 unidades. En la parte 2D del modelo el coeficiente de rugosidad se ha determinado a partir del mapa de coberturas de suelo de Catalunya (MCSC), asignando un valor de rugosidad a cada una de las categorías (nivel 3 del MCSC) en base a unas tablas de correspondencias desarrolladas por la ACA (ACA, 2003).

3.5 Hidrogramas de entrada y condiciones de contorno

El modelo consta de 21 puntos de entrada de caudal y una condición de contorno de nivel fijo en la desembocadura. Los hidrogramas se han obtenido del modelo hidrológico para cada uno de los periodos de retorno.

De los 21 puntos de entrada de caudal, 9 corresponden al inicio de los tramos 1D del modelo, y 12 a puntos intermedios (*lateral flows*) que representan subcuencas de tránsito.

Un aspecto importante a tener en cuenta, es que según el criterio seguido en las PEF, del modelo hidrológico se obtiene el resultado para cada nodo de cálculo teniendo en cuenta el área de su cuenca tributaria con el coeficiente reductor de área correspondiente. De este modo, no tiene el mismo coeficiente reductor de área un

punto situado al final de la cuenca del río Congost que uno situado en la desembocadura de la cuenca del Besós al mar. En este sentido en el modelo bidimensional cada punto de entrada de caudal debería tener asociado un hidrograma obtenido con el coeficiente reductor de área correspondiente, pero de este modo el modelo perdería coherencia global (se penalizarían los resultados en la parte final del modelo). Por este motivo se ha utilizado para todos los puntos de entrada de caudal el hidrograma obtenido con el coeficiente reductor de área correspondiente a la salida de la cuenca.

Como condición de contorno de nivel fijo en la desembocadura se ha considerado que el mar está a la cota +1,5 m, correspondiente a una situación desfavorable con temporal marítimo de levante.

A modo de resumen, en la Tabla 3 se muestran las principales características del modelo:

Tabla 3 Principales características del modelo bidimensional del río Besós.

Superficie del MDT	40 km ²
Tamaño de celda de MDT	15 x 15 m
Longitud total de tramos 1D	36,5 km
Nº de secciones en los tramos 1D	603
Nº de puentes y pasarelas (<i>bridges</i>)	58
Nº de azudes (<i>weirs</i>)	12
Nº de pasos inferiores y obras de drenaje (<i>culverts</i>)	63
Puntos de entrada de caudal (hidrogramas) en el inicio de tramos 1D	9
Puntos de entrada de caudal (hidrogramas) en puntos intermedios de la parte 1D	12
Intervalo de cálculo	30'
Volumen total de entrada para T=3 años (M.C.O)	18,6 hm ³
Volumen total de entrada para T=10 años	38,1 hm ³
Volumen total de entrada para T=50 años	73,2 hm ³
Volumen total de entrada para T=100 años	91,7 hm ³
Volumen total de entrada para T=500 años	140,2 hm ³
Duración de la simulación para T=3 años (M.C.O)	2h 10'
Duración de la simulación para T=500 años	10h 40'

3.6 Postproceso y resultados

Una vez hechas las simulaciones para cada uno de los periodos de retorno de cálculo se ha procedido al postprocesado de los resultados para la obtención de calados, velocidades y extensión de las superficies de inundación. Éste se ha basado en la unificación de los resultados de la parte 2D con los de la parte 1D del modelo, y en el refinado de los resultados de la parte 2D con tamaño de celda de 15x15 m correspondiente al MDT de cálculo a un tamaño de celda de 1x1 m. Para ello se han utilizado herramientas GIS.

Como resultados de la simulación de la parte 2D, SOBEK genera un grid de calados, niveles y velocidades para cada uno de los intervalos de tiempo de la simulación (en este caso cada 15'), de los cuales se obtiene la envolvente máxima en forma de grid de 15x15 m, que posteriormente se pasa a 1x1 m.

En el caso de la parte 1D, SOBEK proporciona la evolución temporal del calado para cada una de las secciones de cálculo, de la cual se extrae el valor máximo. El postprocesado de la parte 1D se basa en la transformación de este valor máximo del calado en las secciones a un grid de calados con tamaño de celda 1x1 m con la extensión del canal principal.

Una vez obtenidos los grids de calados 1x1 tanto de la parte 1D como de la parte 2D, se han unido y se ha procedido a la generación de las líneas de inundación, es decir a la delimitación de los contornos con calado nulo. Para ello se ha utilizado un procedimiento de refinado en el que se ha aprovechado al máximo la información de los MDT 1x1 y 2x2 de partida, de manera que los contornos se adaptan correctamente al terreno. Una vez generadas las líneas de inundación se ha procedido a la eliminación de zonas inundadas desconectadas y de islas con superficie inferior a 500 m².

En las figuras siguientes se muestran algunos ejemplos de los resultados del modelo. Cabe destacar que los resultados presentados en este artículo son genéricos y no se corresponden a ningún caudal o periodo de retorno concreto.

En la Figura 8 se puede ver como a la altura del puente del polígono industrial de Martorelles (1) parte del agua que circula por la parte 2D del modelo se introduce en la parte 1D para atravesarlo. El resto del agua se acumula aguas arriba del puente y termina desbordando por la margen izquierda (2). El agua que se desborda por la margen derecha de la riera de Tenes se acumula y termina pasando por encima de la carretera C-33 (4) y por los pasos inferiores de la línea de ferrocarril de Barcelona a Portbou y de la Avenida de Can Pran de Mollet del Vallès (5). Por otra parte se puede ver como el terraplén de la línea de alta velocidad (3) evita que el agua desborde por la margen derecha del Besós, o que el agua desbordada por la margen derecha de la riera de Tenes entre al Besós.

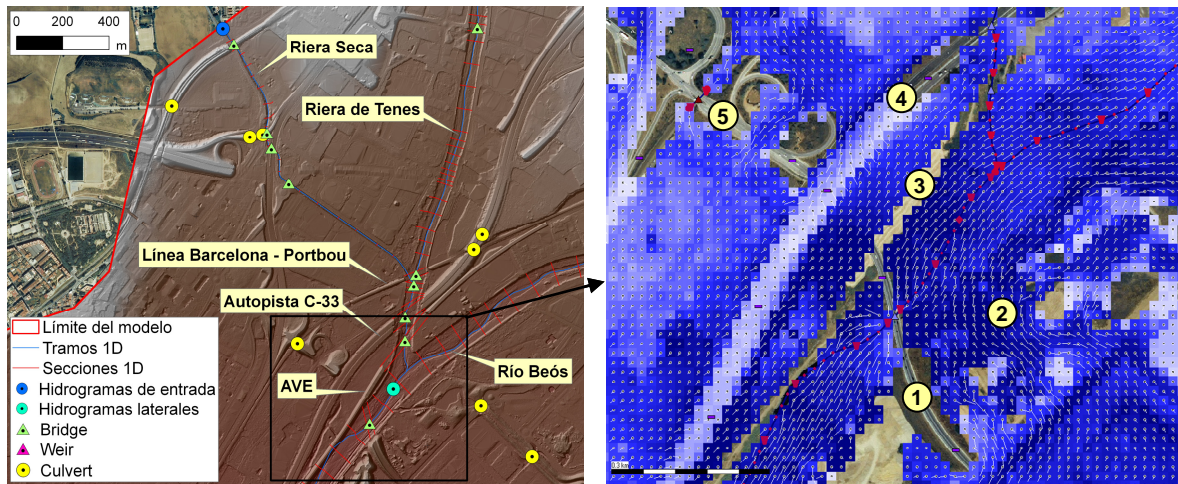


Figura 8 Resultados del modelo a la altura de la confluencia entre la riera de Tenes y el río Besós. Izquierda: esquema de los elementos del modelo. Derecha: visor de resultados del SOBEK.

En la Figura 9 se puede ver como aguas arriba del puente de la línea del ferrocarril de Barcelona a Portbou el agua desborda hacia la margen izquierda de la riera de Caldes (1) inundando la zona de la Verneda de Can Pere Gil, en La Llagosta. A su vez el agua acumulada en esta zona pasa bajo la línea del ferrocarril a través de una obra de drenaje (2) y vuelve a entrar en la riera de Caldes aguas abajo del puente. Por otra parte se puede ver como el agua desbordada por la margen derecha del Besós en zonas situadas más al norte atraviesa los pasos inferiores situados en el nudo entre la carretera C-17, la línea del ferrocarril y la carretera C-59 (3), y termina sobrepasando la carretera C-33 y la línea de alta velocidad (4).

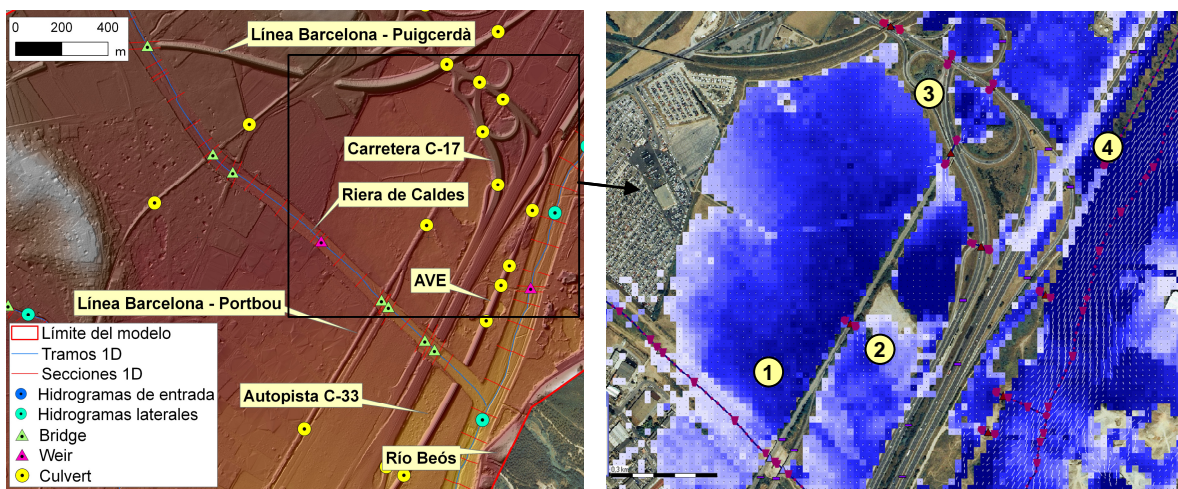


Figura 9 Resultados del modelo en la margen izquierda de la riera de Caldes, cerca de la confluencia con el Besós. Izquierda: esquema de los elementos del modelo. Derecha: visor de resultados del SOBEK.

4 Evaluación de la peligrosidad y zonificación del espacio fluvial

En el marco de los trabajos de la PEF se ha determinado en ciertos puntos del ámbito territorial el grado de peligro vinculado a las circunstancias hidrológicas y/o hidráulicas que inciden sobre él, como primer paso para el análisis del riesgo global en el territorio. Para ello, y como aproximación al riesgo, se evalúa el grado de afectación a partir del riesgo de inundaciones, entre otros criterios, que es función de la exposición de distintos elementos (bienes, personas, servicios y procesos) a ellas, del peligro de la inundación que produce la afectación y de su vulnerabilidad al mismo.

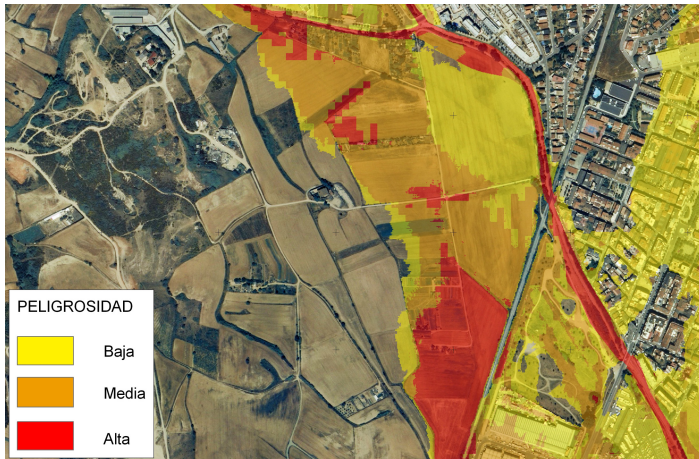


Figura 10 Nivel de peligrosidad aguas abajo de la confluencia de la Riera Seca y la Riera de Polinyà.

Mediante el análisis de la exposición se determina el ámbito espacial afectado por el riesgo de inundaciones y los elementos afectados por ellas.

La evaluación del peligro se obtiene a partir del producto entre el grado gravedad y la probabilidad de ocurrencia del fenómeno, siendo el primero de ellos función de la velocidad, el calado y el producto entre ambos, dando lugar a una clasificación de la inundación en: zona de inundación grave, moderada y leve.

La probabilidad de la riada se cuantifica asignando un factor al periodo de retorno de la misma. De esta manera se cuantifica el peligro potencial de la inundación y se clasifica en alto, medio y bajo.

Una de las propuestas más importantes surgidas de los trabajos de la PEF es la zonificación de los espacios fluviales que pretende ser una herramienta para la gestión y un elemento de referencia en la planificación territorial. Propone un criterio de compatibilidad de fácil y directa aplicación, entre los usos del suelo y el territorio con los factores del riesgo de inundación y los criterios de protección de los valores naturales del medio.

En el marco de los trabajos de la PEF del Besós se han zonificado los espacios fluviales según cuatro zonas: deslinde estimado, zona fluvial, sistema hídrico y zona inundable, de acuerdo a la definición de zonas derivada del Reglamento de Urbanismo de Cataluña, que es una de las dos legislaciones vigentes.

La metodología utilizada en los trabajos de la PEF se basa en la superposición de diversas capas de información (ortofotografías aéreas a escala 1/5000, fotografía aérea antigua, zonas inundables resultantes de la diagnosis, diagnosis del estado de conservación del bosque de ribera, información catastral, planeamiento urbanístico, etc.) que permiten la proyección en planta del cauce y de los espacios fluviales adyacentes obteniendo así una propuesta de zonificación.

En el proceso de definición de la zonificación del espacio fluvial se han aplicado una serie de criterios (específicos y particulares) con el objeto de considerar los distintos aspectos hidráulicos, morfodinámicos, ambientales, legales y de factibilidad, así como su interacción sobre el espacio.

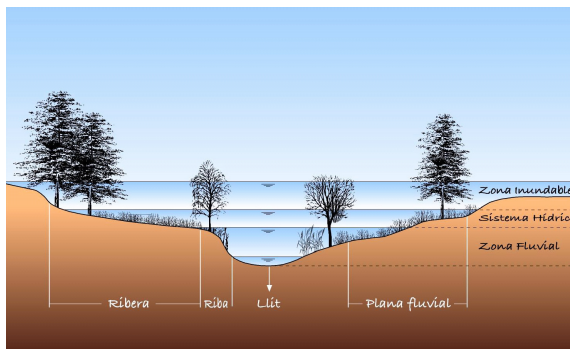


Figura 11 Esquema simplificado del espacio fluvial.

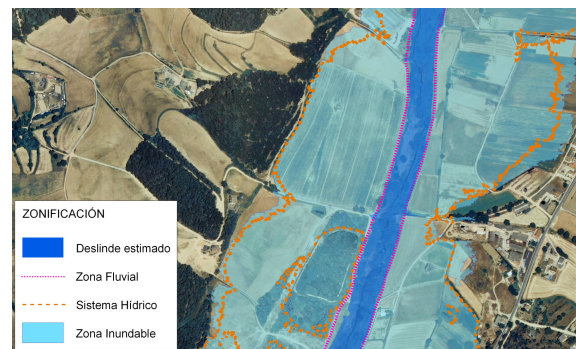


Figura 12 Zonificación del espacio fluvial en un tramo del Río Mogent.

5 Conclusiones

El proyecto de “Planificación del espacio fluvial de la cuenca del Besós” ha sido desarrollado por TYPESA para la Agència Catalana del Agua para dar cumplimiento a la Directiva Marco del Agua (DMA, 2000/60/CE) y a la Directiva de Gestión y Evaluación del Riesgo de Inundación (2007/60/CE).

La cuenca del río Besós tiene una superficie de 1026 km² de los cuales aproximadamente el 20% están urbanizados. En las márgenes de los ríos principales se asientan algunos de los núcleos urbanos más poblados de Cataluña.

En primer lugar se ha resumido el estudio pluviométrico a partir del cual se ha obtenido la lluvia de diseño, y el estudio hidrológico con el que se han obtenido los caudales e hidrogramas de cálculo para el estudio hidráulico. La correcta definición del estudio hidrológico y su calibración y validación con eventos reales es fundamental para obtener unos caudales de diseño realistas.

La mayor parte de los 270 km de río incluidos en la PEF del Besós se ha modelizado mediante un modelo hidráulico unidimensional (HEC-RAS). No obstante, en la parte baja de la cuenca, donde se encuentra el río Besós, ha sido necesaria la realización de un modelo hidráulico bidimensional debido a la extensión de las llanuras de inundación y a la presencia de infraestructuras viarias que condicionan el flujo natural del agua. El programa utilizado ha sido el SOBEK de *Delft Hydraulics Software*.

Se ha resumido el proceso de construcción y refinado del MDT 15x15 de cálculo. Se ha mostrado como con un correcto tratamiento previo se puede minimizar la pérdida de resolución que implica el paso de los MDT 1x1 y 2x2 de origen al MDT 15x15.

Posteriormente se ha comentado la metodología seguida para el postproceso de resultados y se han mostrado unos resultados genéricos en los que se puede ver el claro comportamiento bidimensional del flujo. El uso de herramientas GIS para la generación de grids de calados y líneas de inundación permite recuperar la precisión perdida en el paso de un MDT 1x1 a un MDT 15x15.

Se ha resumido la metodología seguida para la evaluación de la peligrosidad asociada a las inundaciones y la zonificación del espacio fluvial. La utilización de un modelo bidimensional facilita la obtención e interpretación de los resultados para la posterior asociación de los calados y velocidades del flujo al factor de gravedad de la inundación.

Finalmente, se ha puesto en manifiesto la importancia de los proyectos de Planificación de los Espacios Fluviales llevados a cabo por la Agencia Catalana del Agua para una correcta ordenación del espacio fluvial, en especial en una cuenca tan antropizada como la del río Besós.

6 Agradecimientos

Los autores quieren agradecer su esfuerzo a las más de 20 personas que han participado en la elaboración del proyecto de “Planificación del espacio fluvial de la cuenca del Besós” durante los más de tres años de duración de los trabajos.

7 Referencias bibliográficas

Agència Catalana de L'aigua, 2003. *Recomanacions tècniques per als estudis d'inundabilitat d'àmbit local*. Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient.

Arcement, G.J., Schneider, V.R., 1989. *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains*. United States Geological Survey Water-supply, Paper 2339.

Chow, V.T., 1959. *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill.

Dhondia, J. F., Stelling, G. S., 2002. *Application of One Dimensional – Two Dimensional Integrated Hydraulic Model for Flood Simulation and Damage Assessment*. Conference on HydroInformatics 2002, Cardiff, UK.

WL | Delft Hydraulics, 2004. *SOBEK Technical Reference Manual*. WL | Delft Hydraulics.