

# EFFECTOS DE LAS FUENTES CARTOGRÁFICAS EN LOS RESULTADOS DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA DE CRECIDAS

A. Casas Planes, G. Benito, V. R. Thorndycraft, M. Rico

## Resumen:

En este trabajo se ha analizado el efecto de la cartografía en los resultados derivados de los modelos hidráulicos. Se han creado siete modelos de elevaciones del terreno (MDT) desarrollados a partir de tres fuentes cartográficas diferentes: un levantamiento por posicionamiento global GPS, un modelo digital de elevaciones a partir de datos altimétricos de alta resolución LIDAR (Light Detection And Ranging) y una cartografía vectorial de curvas de nivel. Los modelos cartográficos de partida han sido analizados y los resultados del modelo hidráulico se evaluaron en tres contextos diferentes: 1) los propios resultados del modelo: relación caudal-altura de la lámina de agua, 2) la sensibilidad relativa del modelo hidráulico a cambios en el parámetro de resistencia al flujo según el modelo cartográfico utilizado y 3) la delineación del área de inundación. Los cálculos hidráulicos se han basado en un modelo unidimensional (HEC-RAS). El trabajo demuestra la importancia de los modelos cartográficos, al obtener variaciones de 4.5 m en la determinación de la altura de la lámina de agua y de un 50% en la estimación del área inundada para las mismas condiciones de contorno.

**Palabras clave:** Modelo Hidráulico, GPS, Batimetría, SIG, LIDAR, MDT, río Ter, HEC-RAS.

## INTRODUCCIÓN

Los modelos hidráulicos permiten estimar el riesgo de inundación en áreas adyacentes a ríos relacionando el caudal de la corriente con la altura de la lámina de agua, la duración y la extensión del área inundada. La topografía, tanto del cauce como de la llanura de inundación, constituye el factor limitante más importante en la modelación hidráulica y su representación como variable de entrada al modelo determina en gran medida la hidráulica de la crecida modelizada y la extensión del área inundada (Nicholas y Walling, 1997; Horritt y Bates, 2001a). Debido al escaso gradiente de las llanuras de inundación, una pequeña variación en la representación topográfica de la altura de la lámina de agua puede dar lugar a una importante diferencia

en la estimación del área inundada (Bates y De Roo, 2000). Las importantes repercusiones que estas diferencias tienen en la gestión de riesgos y en particular en el cálculo de riesgo de inundaciones y con ello, en la clasificación y determinación de áreas inundables del territorio, en España según la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones (B.O.E. 14-2-95), da una idea de la relevancia de esta cuestión. En la práctica, la cartografía de base utilizada en la modelación hidráulica está condicionada por la disponibilidad o economía de los datos (Cobby y Mason, 1999; Gomes Pereira y Wicherson, 1999). Es, por tanto, importante valorar los errores asociados a la utilización de diferentes datos de elevaciones del terreno para su utilización en modelos hidráulicos de inundaciones.

Centro de Ciencias Medioambientales, CSIC, Serrano, 115bis, 28006 Madrid, España.  
Tlf: 91 7452500 ext 213, e-mail: acasasp@cma.csic.es

Artículo recibido el 17 de marzo de 2004, recibido en forma revisada el 22 de mayo de 2005 y aceptado para su publicación el 10 de junio de 2005. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

La exactitud y precisión de estos modelos de elevaciones del terreno está determinada por el modo en que han sido obtenidos los datos y el tratamiento de los mismos. Los datos del terreno pueden obtenerse mediante un levantamiento topográfico o bien mediante técnicas de fotogrametría o teledetección. Los modelos obtenidos mediante técnicas GPS o topografía clásica, ofrecen una alta precisión y son adecuados y factibles de afrontar para pequeñas áreas (Brasington *et al*, 2000). La calidad de estos datos dependerá de la precisión de la medida y de la densidad y distribución de los puntos medidos. La calidad de los modelos obtenidos mediante técnicas fotogramétricas (Lane *et al*, 1994) o a partir de imágenes de teledetección (Marks y Bates, 2000) depende del muestreo y de la calidad de la imagen. Estas técnicas proporcionan menos resolución en la obtención de datos puntuales pero más homogeneidad y uniformidad en los mismos.

Los modelos superficiales del terreno pueden representarse de dos formas: por la unión en redes de los puntos con datos (red de triángulos irregulares o RTI) o por mallado regular (Burrough y McDonnell, 1998). El uso de mallas regulares para la representación de un modelo del terreno a una escala general no es el adecuado para el análisis hidráulico de cauces. Este modo de representación del terreno no permite definir con detalle áreas con relieve complicado al no poder variar la resolución (Bonham-Carter, 1996). La redes de triángulos irregulares son más utilizadas en la modelación de inundaciones dado que consiguen una mejor representación de la geometría del río al permitir el ajuste de la densidad de la red a la cantidad de variación de los datos (Bates *et al*, 1996). El modelo RTI admite datos adicionales como puntos de máxima cota o de depresiones y líneas de ruptura. Estas líneas de ruptura nos permiten representar los elementos característicos del terreno como márgenes, cauce, afluentes, además de construcciones como carreteras, diques y azudes, que influyen de forma decisiva en el comportamiento hidráulico del río o cauce modelizado.

Hasta la fecha, han sido realizados algunos estudios sobre el efecto de la resolución espacial en modelos de inundación (Werner, 2001; Hardy, 1999; Horritt y Bates, 2001b; Omer *et al*, 2003; Horritt, 2000); así como sobre el origen de los datos de los MDTs (Ruiz *et al*, 2002; Wilson y Atkinson, 2003) utilizados en modelos de inundación raster. Este trabajo evalúa el efecto de las distintas fuentes altimétricas del MDT discretiza-

dos en una RTI en la precisión de los resultados de un modelo hidráulico uni-dimensional: caudal, elevación de la lámina de agua y extensión del área inundada. Asimismo, se establecen unos criterios de selección del modelo cartográfico, en base tanto al coste en tiempo y dinero de la generación y tratamiento de cada metodología como de finalidad del modelo hidráulico y la precisión requerida en sus resultados. De manera que la mejor solución es, en cada caso, aquella que mejor se ajuste al propósito del modelo y será función de la resolución del problema planteado. El estudio presentado proporciona el rango de error inicial a asumir al seleccionar una cartografía de partida determinada, impuesta por disponibilidad o por determinación económica o del medio. Para ello, se han propuesto una serie de metodologías de obtención, tratamiento y análisis de diversas fuentes cartográficas para su incorporación en la modelación hidráulica de inundaciones, y posteriormente se han cuantificado las diferencias entre cada uno de los resultados del modelo hidráulico con cada una de dichas metodologías. Para este estudio, se han generado siete modelos del terreno creados a partir de tres fuentes básicas: 1) levantamiento por posicionamiento global, 2) modelo digital de la superficie a partir de datos topográficos de alta resolución LiDAR, 3) cartografía vectorial de curvas de nivel, y (4 a 7) estas mismas fuentes, en diferentes combinaciones, mejoradas con datos de campo.

## METODOLOGÍA

### Área de estudio y modelos cartográficos

Se han generado siete modelos para representar la topografía del cauce y de las llanuras de un tramo de 2 km del río Ter situados a 5 km aguas abajo de Girona, ayuso de la confluencia con el río Onyar, a su paso por Sant Julià de Ramis (Figura 1a). Hasta este tramo el río Ter presenta una superficie de cuenca de unos 1.850 km<sup>2</sup>. Los caudales máximos registrados se obtuvieron el 18 octubre de 1940 con 2.350 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> en la Estación de Roda de Ter. El tramo estudiado presenta una longitud de 2 km con una pendiente media del cauce de 0,001 m/m, y un índice de sinuosidad de 1,3. En este tramo, el río Ter ha desarrollado una llanura de inundación excavada en margas, arenas y arcillas del Eoceno de 1300 m de anchura, que se reducen a 90 m (cauce y barras laterales) en un estrechamiento formado por material volcánico del Paleozoico, aguas abajo de Sant Julià de Ramis. En la fotografía aérea de 1957 se observa

## EFFECTOS DE LAS FUENTES CARTOGRÁFICAS EN LOS RESULTADOS DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA DE CRECIDAS

una configuración geomorfológica que podemos considerar en régimen semi-natural, dado que la regulación del río Ter se produce a partir de 1971, tras la construcción de las presas de Sau, Susqueda y el Pastoral. El curso de río Ter en ese momento es de tipo mixto braided-meandriforme con abundantes barras transversales y centrales y desarrollo de *point bars*. Este patrón es característico de ríos con abundante carga de fondo (gravas y bloques). La actividad y cambios fluviales con este tipo de régimen semi-natural resultan frecuentes, con una zona activa de barras de crecimiento rápido o moderado que comprende una franja de unos 100-150m. En la fotografía aérea de 1986 se observa una importante transformación en la geomorfología fluvial, motivada tanto por la regulación del río Ter como consecuencia de la construcción de presas, así como de las numerosas actuaciones humanas y la estabilización de barras centrales y laterales por la vegetación riparia. Las especies vegetales que caracterizan las riberas de esta zona son el sauce (*Salix alba*) y el fresno (*Fraxinus angustifolia*), aunque también aparecen especies acompañantes como el chopo (*Populus nigra*), el álamo blanco (*Populus alba*) o el olmo (*Ulmus minor*). Las llanuras de inundación están aprovechadas con plantaciones de choperas y tierras de cultivo.

En total, siete modelos del terreno fueron generados a partir de: (1-3, Tabla 1) las tres cartografías base, (4-5, Tabla 1) dos modelos basados en la información LiDAR (Light Detection and Ranging) mejorado con puntos GPS del terreno, y puntos GPS + batimetría, respectivamente; y (6-7, Tabla 1) dos modelos con la cartografía digital de las curvas de nivel (escala 1:5000) mejoradas con puntos GPS, y GPS + batimetría, respectivamente.

El levantamiento de alta resolución detallado del tramo de estudio se llevó a cabo en julio de 2002 utilizando un GPS Trimble 4700 en modo RTK (Real Time Kinematic), basado en un radioenlace entre el equipo móvil y el de referencia que permite el posicionamiento del receptor móvil en tiempo real (Fix y Burt, 1995). La utilización

de un GPS responde a las ventajas de poder obtener una cartografía de alta resolución (2-3 cm), sin quedar limitados por las líneas de visibilidad entre la estación base y el punto medido, con la obtención de datos en tiempo real (imprescindible para la obtención de la batimetría) y por su rapidez (dos segundos por punto con cinco satélites) (Brasington *et al*, 2000). Se utilizaron tres puntos de control en vértices geodésicos de primer orden de la Red Nacional, obteniéndose un error cuadrático medio horizontal de 19 mm y vertical de 15 mm. La metodología en la captura de puntos se basa en el levantamiento sistemático de los perfiles transversales de interés espaciados en función de los cambios en la geomorfología del canal (Keim *et al*, 1999) (Figura 1b). Ésta se vio finalmente determinada por la dificultad del terreno, la vegetación que impedía la visibilidad de los satélites y la gran inversión de tiempo necesaria. Se tomaron los puntos de fuerte cambio de pendiente, las barras fluviales y los puntos inferior y superior de los bancos. Los puntos en que la visibilidad era reducida fueron medidos con una estación total Sokkisha set 3B de Sokkia (resolución 3", precisión 1", alcance 1.500/2.000 m), con base en puntos calibrados con las medidas GPS, estableciendo nuevas poligonales de control.

El lecho del río fue medido usando una ecosonda Navisound 50 (resolución 1 cm, rango de profundidad de 0,2-650 m) montada sobre una barca y conectado al receptor móvil del GPS en modo RTK, (Navitronic Systems AS, 1993). Los datos de la estación base recibidos por radio proporcionan control horizontal y vertical en la toma de datos. Ambos estaban conectados a un ordenador portátil que recibe el dato de la posición planimétrica x, y desde el GPS y el dato de profundidad z desde el trasductor y los gestiona en un programa de navegación (Trimble Hydropro v. 1.5). La batimetría del río se planificó previamente en forma de perfiles transversales al eje del río y se barrieron en la medida en que la recepción de satélites, la profundidad y la geomorfología del río lo hacían posible.

Tabla 1. Resumen de los modelos cartográficos generados

	Modelos RTI del terreno	Nodos	Triángulos
1	Levantamiento GPS	3.485	6.869
2	MDT LiDAR 1 m	154.943	307.100
3	Curvas de nivel 1:5.000	1.386	2.413
4	MDT 1 m mejorado con batimetría	157.323	311.860
5	MDT 1 m mejorado con batimetría y puntos del terreno GPS	172.916	345.436
6	Curvas de nivel 1:5.000 mejorado con batimetría	3.768	7.177
7	Curvas de nivel 1:5.000 mejorado con batimetría y puntos del terreno GPS	5.423	10.041

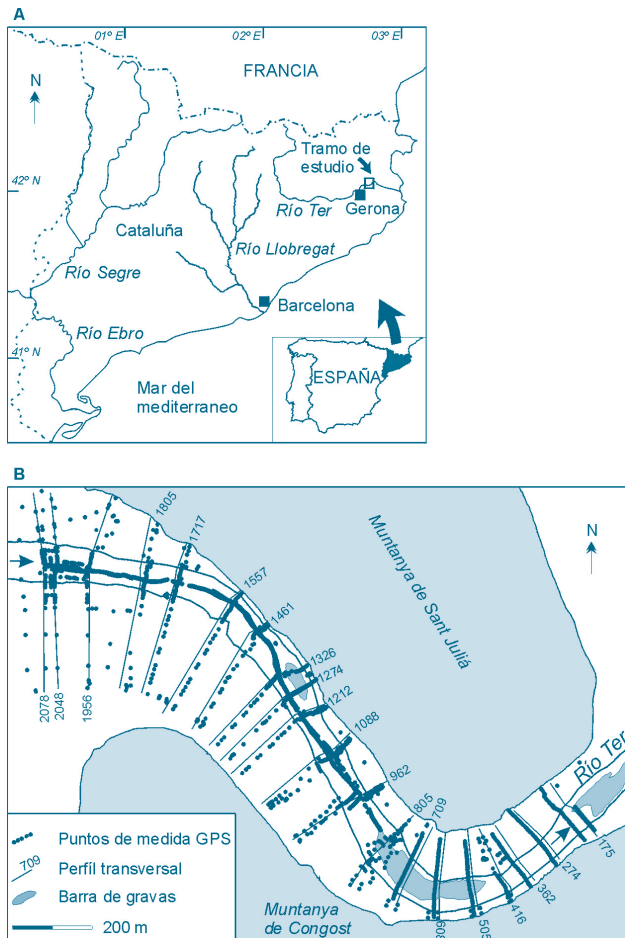


Figura 1. Figura 1. a) Localización del tramo de estudio a su paso por Sant Julià de Ramis. b) Mapa de los puntos medidos con GPS, incluyendo la batimetría. Las secciones transversales están numeradas según la distancia (m) desde el extremo aguas abajo del tramo modelado

El Modelo Digital del Terreno a partir de datos altimétricos láser de alta resolución (LiDAR) ha sido proporcionado por el Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC) y los puntos han sido medidos con un sistema Optech ALTM 3025 con una resolución vertical de  $\pm 10-15$  cm. El sensor LiDAR (detección y medida de la luz) es un sistema aerotransportado de medición del terreno, utilizado principalmente para la generación de modelos digitales del terreno (Ackermann, 1999). El sistema de distanciametría láser utilizado opera generando un pulso láser dirigido al terreno desde una altura de 2.300 m y captura la energía reflejada por el mismo, calculando la distancia al terreno a partir del tiempo transcurrido. Un escáner de espejo dirige los pulsos láser en la dirección perpendicular a la línea de vuelo para permitir la cobertura en la toma de puntos para un ancho de pasada de 402 m, mientras que el movimiento del avión facilita las

medidas en el sentido de vuelo (Baltasvias, 1999). La distancia calculada, junto con las medidas de orientación y posición del sensor proporcionada por los sistemas de GPS/IMU (sistema de posicionamiento global por satélite/ sistema de referencia inercial de alta precisión), permiten la obtención y postproceso de las coordenadas  $x, y, z$  del terreno (Wehr y Lohr, 1999). El modelo digital de elevaciones resultante tiene una resolución de 1m en el sistema de referencia oficial ED50, proyección UTM, huso 31, con cotas ortométricas.

La cartografía digital de las curvas de nivel de la zona con una equidistancia de 5 m se obtuvieron del Instituto Cartográfico de Cataluña, en forma de coberturas vectoriales de la base topográfica 3D a escala 1:5000 (BT-5M). La cartografía procede de la digitalización de dicho mapa. El sistema de referencia es el oficial ED50, la proyección UTM huso 31 y las cotas son ortométricas.

### Modelo hidráulico

Para la modelación de la inundación se utilizó el modelo 1D, unifásico en régimen gradualmente variado, resuelto por el método estándar por etapas (Chow et al, 1988), programado en el modelo HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center, 1998a). La utilización de una herramienta SIG para el tratamiento de los datos geométricos del río a partir de la topografía y para la delimitación del área de inundación, permite realizar posteriores análisis para obtener mapas de inundabilidad y riesgos, así como mejorar su representación gráfica. En este trabajo se ha utilizado la extensión del SIG ArcView denominada HEC-GeoRAS (Hydrologic Engineering Center, 2002) que tiene la capacidad de exportar la localización de los perfiles transversales como coordenadas xyz del modelo del terreno para la incorporación en HEC-RAS de la geometría del tramo. Además, permite importar los resultados del modelo de altura de la inundación en el SIG, donde la intersección de la altura de la lámina de agua con el perfil transversal permite la representación gráfica sobre el modelo superficial del terreno de las áreas inundadas (Tate, 1999). Esta aproximación permite recoger más adecuadamente la variación de la pendiente de la lámina de agua entre secciones que otras técnicas de interpolación como los métodos geoestadísticos, o mediante análisis de vecindad (Werner, 2001). El mapa de los coeficientes de Manning para cada uno de los materiales con diferentes rugosidades del lecho y las llanuras se construyó a partir de la observación de la ortoimagen de la zona a escala 1:5.000 (Figura 2) y de los

## EFFECTOS DE LAS FUENTES CARTOGRÁFICAS EN LOS RESULTADOS DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA DE CRECIDAS

apuntes de campo, estableciéndose los siguientes valores del coeficiente de Manning  $n$  (Tabla 2), (Hydrologic Engineering Center, 1998b); Martín Vide, 2002).

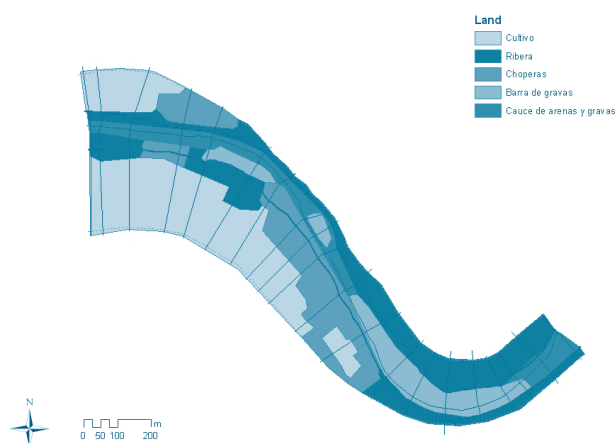


Figura 2. a) Datos geométricos de entrada del modelo HEC-RAS. Línea central de flujo, límite de bancos, polígonos de Manning por uso de la tierra (land use) y trayectos de flujo en la llanura de inundación. b) Posición de las secciones transversales situadas sobre la ortoimagen.

Tabla 2. Coeficientes de Manning

Descripción	Valor
Barra de gravas	0,030
Cauce de arenas y gravas	0,026
Choperas	0,055
Cultivo	0,040
Vegetación de ribera	0,065

Los cálculos hidráulicos se realizaron en régimen subcrítico (número de Froude inferior a 1,0), imponiendo la profundidad crítica como condición de contorno aguas abajo. Dicha condición es provocada por la presencia de un fuerte encajonamiento del río Ter en materiales calizos. El modelo está computado desde aguas abajo y a 612 m del inicio del tramo se estabiliza el perfil y vuelven a aparecer las condiciones de contorno de flujo crítico. El cálculo se realizó para un rango de caudales entre 50 y 3.000  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ , en intervalos de 50  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ , lo que permite obtener la curva de gastos del tramo. La modelación de la inundación constó de tres pasos, que fueron: 1) la extracción de la geometría del río (Figura 2) a partir de un modelo RTI del terreno, una ortoimagen digital de la zona a escala 1:5.000 y de notas de campo; 2) la simulación hidráulica con HEC-RAS, y 3) la delineación del área inundada sobre el modelo

del terreno para cada uno de los caudales introducidos y la generación de un modelo raster de la inundación con datos de la profundidad del agua en cada punto.

HEC-RAS representa la inundación como un dato de altura de agua para cada perfil transversal para cada caudal simulado. Estos datos de elevaciones junto con los datos de elevación del terreno se utilizan para delinear el área de inundación y determinar la profundidad de la lámina de agua. Con la altura de la lámina de agua para cada perfil transversal, para cada caudal de inundación, se obtiene el modelo TIN de la superficie de agua triangulando a partir de elementos vectoriales. La línea de la lámina de agua se utiliza como línea de ruptura y como polígono que limita los perfiles transversales se utiliza de límite de la extensión areal de la superficie de agua. Este modelo TIN es independiente del modelo TIN del terreno, ya que se calcula interpolando las alturas de la lámina de agua entre perfiles transversales importadas a lo largo de cada perfil transversal.

## RESULTADOS

### Análisis de la precisión de los modelos cartográficos

Para evaluar la precisión de los modelos cartográficos, se utilizaron como puntos de control, puntos medidos con técnicas GPS representativos de la geometría del cauce y la llanura, distribuidos por la zona de estudio. El error de cada superficie se calculó como la diferencia entre el valor medido del punto de control con GPS en campo y el valor interpolado del punto en cada modelo. Los resultados de la comparación se muestran en la Tabla 3 donde se observa que el error cuadrático medio (ECM) del modelo LiDAR del terreno está dentro de la precisión que presentan los modelos realizados con este tipo de datos, mientras que los datos del canal de aguas bajas presentan un ECM mayor (1,6 m), ya que el láser no penetra la superficie del agua. El modelo de curvas de nivel tiene un error cuadrático medio de 2,7 m y 6,3 m para el terreno y el cauce respectivamente, ya que con la curva de nivel más próxima al río no queda detallada la topografía del cauce ni la llanura. La Figura 3.a resulta representativa para mostrar el efecto de los diferentes modelos en una sección transversal cualquiera del tramo, y pone de manifiesto que las diferencias entre las superficies van a determinar la hidráulica del modelo.

Tabla 3. Estadísticos de los errores (m) de los modelos de elevaciones del terreno y de la batimetría respecto de puntos de control medidos en campo mediante técnicas GPS.

Estadísticos	MDT (terreno)		MDT (cauce de aguas bajas)	
	LiDAR	C. Nivel	LiDAR	C. Nivel
Nº puntos de control	272	281	119	119
Error Máximo	3,992	5,765	4,231	9,260
Error Mínimo	0,002	0,004	0,010	4,440
Error Medio	0,257	2,042	1,281	6,272
Desviación Típica	0,370	1,853	0,967	0,985
Error Cuadrático Medio	0,302	2,756	1,603	6,349

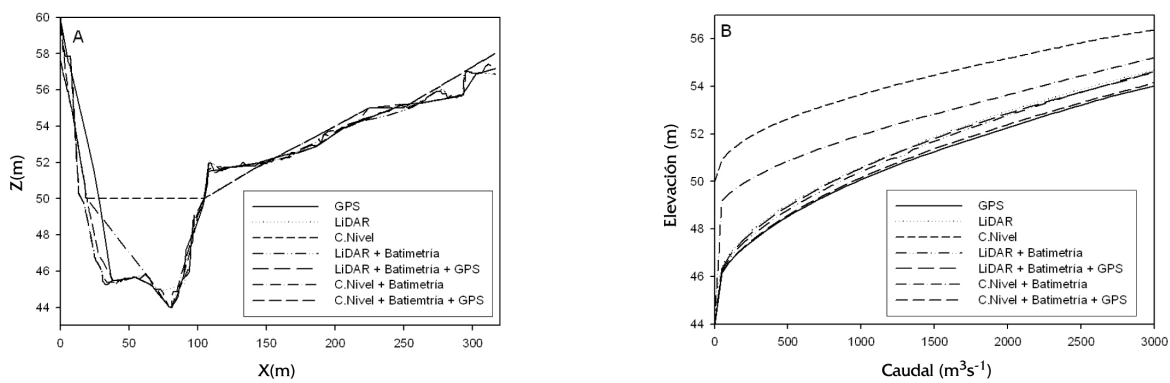


Figura 3. a) Ejemplo de geometrías de la sección transversal 1326 representada por los distintos modelos cartográficos, donde se observan importantes discrepancias en su representación. Ver localización en la figura 2. b) Curva de gastos correspondientes a la sección 1326.

### Resultados del modelo hidráulico. Curvas de gastos (Q-h)

En este apartado se han comparado las salidas del modelo de caudal y altura para cada perfil transversal en las siete cartografías generadas. En todas las secciones transversales, las curvas de gastos resultantes de los siete modelos cartográficos comparten un patrón de resultados similar (Figura 3.b). Las cartografías procedentes del mapa de curvas de nivel proporcionan alturas muy superiores a las obtenidas a partir del resto de las cartografías. Tan sólo cuando ésta es combinada con datos GPS del terreno y del canal se consiguen resultados razonables. Al igual que éstas, el resto de las cartografías mejoran en la medida en que se incorporan puntos medidos del terreno y del cauce. En todos los casos, las menores alturas son las obtenidas a partir del levantamiento GPS de alta resolución, aumentando la altura de la lámina de agua conforme disminuye la escala y resolución de la cartografía de partida. Se observa que la cartografía raster mejora progresivamente conforme incorporamos puntos del cauce y de las llanuras, mientras que la mejora en el caso de la cartografía digital de curvas de nivel es mucho más notable.

Algunas curvas de gasto presentaron una diferencia muy pequeña entre los datos GPS y el modelo LiDAR, lo que era de esperar, ya que esos perfiles coinciden con zonas de cauce somero por lo que ambas cartografías son muy parecidas y, por tanto, los resultados.

Cada una de las simulaciones realizadas ha sido comparada con los resultados obtenidos a partir de la topografía procedente del levantamiento GPS de alta resolución. Se ha tomado la cartografía GPS como referente del mejor modelo por la precisión centimétrica con que fueron medidos los perfiles transversales de entrada al modelo, en base a los cuales el modelo hidráulico realiza todos sus cálculos. La variación que introduce cada cartografía en la obtención de la lámina de agua para cada perfil analizado ha sido calculado para caudales de simulación de 500, 1.000, 1.500, 2.000, 2.500 y 3.000 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. La Figura 4 presenta los datos del error cuadrático medio (ECM) en la obtención de la elevación de la lámina de agua. Con este gráfico se pone de manifiesto el grado de ajuste que proporciona la utilización de cada cartografía para cada caudal. La cartografía digital de curvas de nivel no presenta detalle alguno en

## EFFECTOS DE LAS FUENTES CARTOGRÁFICAS EN LOS RESULTADOS DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA DE CRECIDAS

la representación del cauce ni de las llanuras cercanas, por lo que el error en la determinación del calado es mayor para caudales pequeños, disminuyendo el error al aumentar el caudal (hasta 2,1 m de 500 a 3.000 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>). El error cuadrático medio en el caso de la cartografía LiDAR aumenta ligeramente con el caudal (~0,3 m de 500 a 3.000 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>), probablemente debido al error introducido por el filtrado de los datos altimétricos para construir el modelo digital del terreno y aproximado al ECM propio del modelo. En general, todos los modelos mejoran su ajuste con la incorporación de datos de campo (GPS) llegando estas mejoras en el caso de la cartografía basada en curvas de nivel a los 4,5 metros (~2 m al incorporar batimetría, ~4,41 m al incorporar batimetría GPS y datos terreno GPS). La mejora en la cartografía láser al incorporar datos GPS es de unos 0,3 m en su error cuadrático medio.

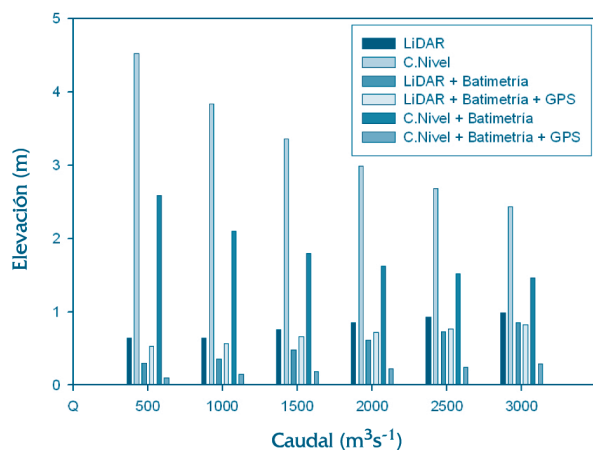


Figura 4. Error medio cuadrático (ECM) en el cálculo de la elevación de la lámina de agua de los perfiles analizados con cada modelo cartográfico respecto del modelo GPS.

### Sensibilidad relativa de la fuente cartográfica y los parámetros del coeficiente de fricción del modelo

En este apartado se examina la sensibilidad de los modelos hidráulicos a la variación del coeficiente  $n$  de Manning para cada modelo cartográfico utilizado. Se presentan catorce casos de simulación diferentes, resultado de combinar cada una de las siete cartografías desarrolladas, con dos valores del coeficiente de Manning. La cuantificación de la sensibilidad de los modelos hidráulicos a las variaciones del coeficiente de Manning se ha obtenido al multiplicar este factor por 0,75 y 1,25 y comparar los resultados con los obtenidos utilizando el de partida, para cada modelo cartográfico.

De esta manera, se pretende obtener el rango de influencia de la modificación del coeficiente de Manning según la cartografía utilizada en el modelo hidráulico. Se calculó el error cuadrático medio en calado de los perfiles estudiados y se representaron estos errores en función de los diferentes caudales 500, 1.000, 1.500, 2.000, 2.500 y 3.000 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (Figura 5).

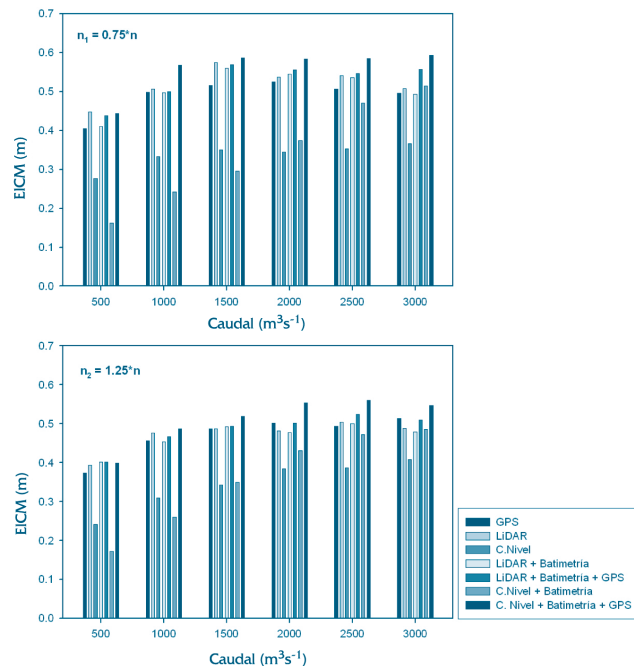


Figura 5. Variación media (m) del calado para diferentes caudales según cada modelo cartográfico modificando el coeficiente de Manning  $n$ .

El modelo cartográfico de curvas de nivel es el menos afectado por la variación del coeficiente de Manning (ECM ~0,34 m al multiplicar por 0,75; ~0,35 m al multiplicar por 1,25), la menor variación se obtiene para caudales pequeños (0,28 m para un caudal de 500 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>). Esta influencia aumenta conforme se incorporan datos GPS del terreno y de la batimetría al modelo cartográfico y dan lugar a los mayores errores (ECM de 0,56 y 0,51 para los factores 0,75 y 1,25, respectivamente). La cartografía láser para ambos factores varía en mayor medida respecto de la de curvas de nivel (ECM ~0,5 m) pero mantiene este valor al incorporar datos GPS del terreno. En todos los modelos cartográficos las menores variaciones se presentan para los caudales más bajos (500 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>). En general puede verse cómo para cualquier caudal, a mayor precisión del modelo cartográfico, mayor sensibilidad presenta el modelo hidráulico a variaciones del valor del coeficiente de fricción.

Tabla 4. Variación del área de inundación para cada modelo cartográfico expresado como un porcentaje del área total inundada obtenida utilizando el modelo LIDAR de 1 m de resolución mejorado con puntos GPS del cauce y de la llanura.

Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Modelos Cartográficos					
	GPS	LIDAR	C.Nivel	LIDAR + Bat.	CN + Bat.	CN + Bat + GPS
500	4,895	0,094	62,824	0,026	32,725	5,273
1.000	2,700	0,037	55,133	0,016	32,252	0,157
1.500	8,636	0,047	37,661	0,002	18,459	3,647
2.000	8,244	0,197	38,133	0,040	13,879	4,015

CN: Curvas de Nivel  
Bat: Batimetría

### Cuantificación del efecto de la cartografía en la extensión del área de inundación

En la Figura 6 se representan los datos de la simulación del área inundada al paso de 1.000 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> según las diferentes cartografías. Los resultados muestran una tendencia clara de aumento de área de inundación conforme la precisión de la cartografía es menor. Esto tiene su paradigma más acusado en el uso de la cartografía obtenida a partir de las curvas de nivel, en la que el cauce no queda apenas representado, ni en profundidad ni en extensión y por tanto el agua ocupa desproporcionadamente más espacio de la llanura de inundación.

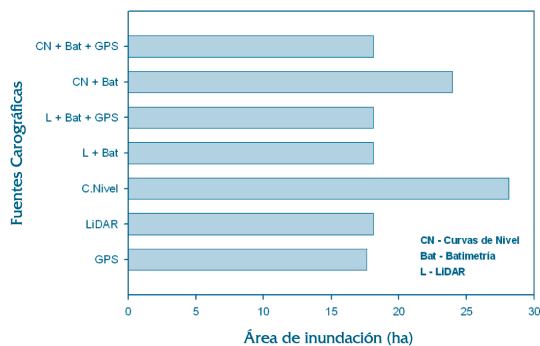


Figura 6. Área inundada en función del modelo cartográfico para un caudal de 1000 m<sup>3</sup>/s.

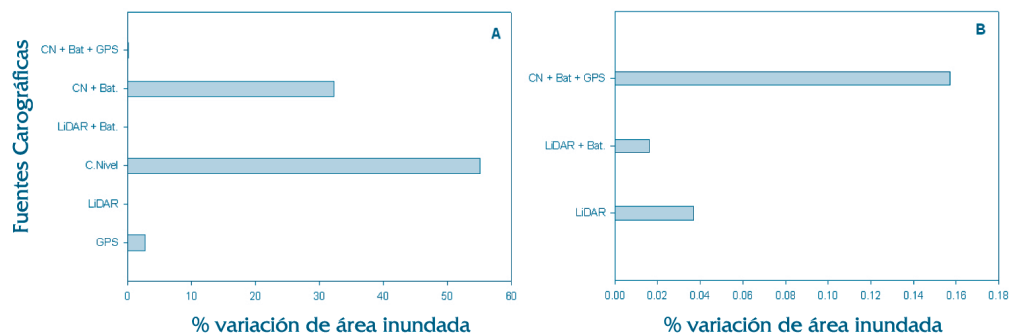


Figura 7. Porcentaje de variación del área de inundación a) para cada modelo cartográfico para un caudal de 1000 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> b) para los modelos cartográficos más precisos para un caudal de 1000 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>

En la Tabla 4, el análisis de la extensión del área inundada está expresada en porcentaje del dominio inundado respecto del modelo de referencia, obtenido utilizando el modelo digital del terreno LiDAR de un metro de resolución de toda el área de estudio mejorada con los puntos de la llanura y del cauce medidos con GPS, donde las zonas representativas y de transición del río se obtuvieron con precisiones centimétricas.

La cuantificación de este porcentaje de variación (Tabla 4) o su representación gráfica (Figura 7a y 7b) pone de manifiesto la enorme diferencia que resulta en la estimación de las áreas de inundación entre la cartografía GPS o LiDAR y la obtenida con curvas de nivel con una equidistancia de 5 metros, dejando clara su poca adecuación para la obtención de este tipo de mapas de delineación de áreas inundadas. El comportamiento de los modelos mejorados a partir de los datos LiDAR es muy parecido entre sí. La cartografía GPS en este caso presenta variaciones de hasta un 8% para caudales grandes (1.500 – 2.000 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>). Esto puede ser debido a que los datos de campo fueron tomados siguiendo perfiles transversales y en puntos singulares del terreno. Por tanto, en las zonas entre perfiles donde se carece de datos, las zonas inundadas están determinadas por la interpolación de estos perfiles, lo que introduce cierto error en la representación de la inundación en las llanuras aluviales.



## EFFECTOS DE LAS FUENTES CARTOGRÁFICAS EN LOS RESULTADOS DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA DE CRECIDAS

En la Figura 8 se muestran las diferentes áreas inundadas en función de la cartografía utilizada sobre una ortoimagen de la zona. Obsérvese las enormes diferencias que presenta el modelo de curvas de nivel para un caudal de  $1.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  respecto a los modelos GPS y LiDAR, según la cual parte de las infraestructuras y viviendas próximas al río quedarían inundadas.



Figura 8. Gráficos con las delineaciones de las áreas inundadas para un caudal de  $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  en función de la cartografía fuente sobre la ortoimagen.

### DISCUSIÓN

A la vista de los costes en tiempo y dinero (Tabla 5) y de la precisión obtenida en los modelos hidráulicos (Tabla 6), se pueden establecer algunos criterios de selección del modelo cartográfico para

este tipo de trabajos. La utilización de una cartografía de curvas de nivel a escala 1:5.000 resulta inefectiva, a pesar de su bajo precio. Al incorporar datos GPS, el modelo se encarece pero mejora en gran medida en la obtención de la altura de la lámina de agua, a la vez que incorpora las incertidumbres propias de la interpolación entre perfiles medidos en la estimación del área inundada. Estas cartografías generan láminas de agua más elevadas y una mayor área de inundación por lo que en el caso de la gestión de riesgos, las consecuencias de su utilización proporcionan un margen de seguridad. La utilización del modelo LiDAR resulta económicamente viable para grandes áreas y ofrece resultados muy aproximados tanto en la determinación de la altura de la lámina de agua ( $\text{ECM} = 0,85 \text{ m}$ ), como en la estimación del área inundada ( $\% \text{ error} = 0,2$ ). Los resultados del modelo LiDAR mejoran en menor medida al incorporar datos GPS, siendo en este caso más importante la mejora en la determinación del calado, ya que se calcula con base a los perfiles medidos.

La comparación de los ECMs debidos a la cartografía en la estimación de la altura de la lámina de agua (figura 4) y los derivados de la estimación del coeficiente de Manning (figura 5) muestra un predominio de la cartografía como fuente de mayor error. El porcentaje del ECM derivado la estimación del coeficiente de Manning respecto del error producido por la cartografía se muestra en la tabla 7. El ECM en la estimación del coeficiente de Manning supone un 60% y un 12% para la cartografía LiDAR y de curvas de nivel respectivamente del ECM debido a la cartografía.

Tabla 5. Resumen del coste aproximado por hectárea de la obtención de las cartografías de partida

ANÁLISIS DE COSTES			
Cartografía	Coste aproximado, €/ha	Tiempo de Ejecución	ECM, m (MDT)
Levantamiento GPS	8,60	5 ha/d	0,1
Modelo LiDAR	12	7500 ha/h	0,3
Modelo Curvas de Nivel	0,17	/	2,7
Batimetría	300	1 ha/d	0,2

Precios sin IVA a diciembre de 2003  
Área mínima, 1 ha =  $0,01 \text{ km}^2$

Tabla 6. Resumen del ECM en la determinación del calado y el % de error en el cálculo del área inundada

Modelo Cartográfico	ECM*, m en calado	Error*, % de área inundada
GPS	0,00	8,20
LiDAR	0,85	0,20
C. Nivel	2,98	38,10
LiDAR + Batimetría	0,61	0,04
LiDAR + Batimetría + GPS	0,72	0,00
C. Nivel + Batimetría	1,62	13,90
C. Nivel + Batimetría + GPS	0,21	4,10

\* para un caudal de  $2.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

ECMs en la altura de la lámina de agua de más del 50% producidos por la estimación del coeficiente de Manning en las diferentes cartografías y un valor superior en el caso de la cartografía de la de curvas de nivel optimizada con puntos del terreno y batimetría, en la que el porcentaje llega a ser de 260% del error producido por la cartografía nos indica la importancia de la estimación de este parámetro en la modelización hidráulica y la mayor influencia de éste en el modelo cuanto más preciso es el modelo cartográfico utilizado.

Tabla 7. Porcentaje del ECM debido a la estimación del coeficiente de Manning respecto el ECM derivado de la cartografía, para una caudal de 2000m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

Modelo Cartográfico	% (n * 0,75)	% (n * 1,25)
GPS	-	-
LiDAR	63	57
CNivel	12	13
LiDAR + Bat	89	78
LiDAR + Bat + GPS	77	70
CNivel + Bat	23	27
CNivel + Bat + GPS	267	253

Finalmente, y conforme a estudios previos (Marks y Bates, 2000; French, 2003; Charlton *et al*, 2003) podemos señalar la fuente de datos LiDAR como un novedoso y determinante medio de caracterización de la topografía de llanuras de inundación de los ríos, por su específica adecuación para su utilización en modelos hidráulicos. Esta fuente de datos proporciona información topográfica espacialmente distribuida de alta resolución del área de estudio, lo que favorece especialmente la incorporación de nuevas secciones basadas en datos reales en modelos unidimensionales. Por otra parte, la creciente tendencia de los últimos años a utilizar modelos hidráulicos bidimensionales y tridimensionales hace del todo necesaria la utilización de este tipo de información distribuida. Los modelos digitales superficiales y del terreno obtenidos a partir de datos aéreos de altimetría láser suponen una solución óptima, cuyo tratamiento específico para su mayor rendimiento en incorporación a estos modelos hidráulicos es aún objeto de investigación (Bates *et al*, 2003; Raber *et al*, 2003; Cobby *et al*, 2003). En cualquier caso, la solución en la elección de la cartografía no será única y vendrá determinada por la finalidad y los requerimientos del estudio hidráulico.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han aplicado una serie de metodologías de tratamiento y análisis de diversas fuentes cartográficas para su incorporación en la modelación hidráulica de inundaciones. En cada caso, se ha cuantificado el grado de precisión y error que resulta de la utilización de estos modelos cartográficos en el modelo hidráulico HEC-RAS. Las conclusiones más importantes que se pueden extraer de este estudio son:

- 1) Los resultados de la modelación hidráulica dependen en gran medida de la cartografía de partida con que se modeliza el terreno. Se ha obtenido un error cuadrático medio de 4,5 m en la determinación de la altura de lámina de agua utilizando el modelo cartográfico de curvas de nivel. Este error disminuye en 2 m al incorporar datos de batimetría y en 4,4 m al incorporar datos de batimetría y del terreno GPS, con lo que se consiguen corregir sus resultados casi en su totalidad. Por su parte la cartografía láser presenta un ECM de 0,3 m.
- 2) Los modelos calculados con cartografía obtenida a partir de curvas de nivel proporcionan unas alturas de la lámina de agua muy superiores a las obtenidas con el resto de las cartografías. Las menores alturas las proporcionan los modelos obtenidos a partir de datos GPS, aumentando esta altura conforme la definición de la cartografía disminuye.
- 3) El error cuadrático medio calculado en la determinación de la altura de la lámina de agua obtenida a partir de la cartografía digital (1: 5.000) disminuye a medida que aumenta el caudal del modelo hidráulico, hasta 2,1 m de 500 a 3.000 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. En la cartografía láser el error cuadrático medio aumenta ligeramente con el caudal (0,3 m de 500 a 3.000 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)
- 4) En general puede observarse que para cualquier caudal, una misma modificación del coeficiente de Manning tiene mayor influencia en los resultados del modelo hidráulico, cuanto mayor detalle presente el modelo cartográfico utilizado. Entre los modelos cartográficos utilizados se ha observado una mayor influencia en la cartografía elaborada a partir de datos LiDAR del terreno (ECM~0,5 m) y una menor influencia en el modelo construido a partir de curvas de

nivel (ECM~0,3 m). Lo que señala la mayor relevancia en la estimación del coeficiente de Manning cuanto más preciso sea el modelo cartográfico utilizado.

- 5) El ECM derivado de la estimación del coeficiente de Manning es del 60 y 12% para el caso de las cartografías LiDAR y de curvas de nivel respectivamente, del producido por efectos del modelo cartográfico. Lo que pone de relieve la importancia en la determinación de este parámetro, al producir errores en algunas cartografías de magnitudes comparables (89% en el caso de cartografía LiDAR optimizada con batimetría) a las producidas por la utilización de diferentes modelos cartográficos.
- 6) La estimación del área inundada presenta variaciones medias de hasta un 50 % para un modelo cartográfico de curvas de nivel. La cartografía GPS varía en un 8 %, mientras que las cartografías elaboradas a partir de datos láser y la de curvas de nivel mejorada con todos los datos GPS varía en menos de un 1 %.

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el ámbito del proyecto SPHERE (Systematic, Palaeoflood and Historical data for the improvEment of flood Risk Estimation), financiado por la Comisión Europea (contract number EVG1-CT-1999-00010), y del proyecto PALEOCAP financiado por la CICYT (REN2001-1633/RIES). Los autores quieren agradecer al ICC (Institut Cartogràfic de Catalunya) y en particular a Antonio Ruiz, la provisión de los datos LiDAR utilizados en este estudio. Finalmente, agradecer a los evaluadores cuyos comentarios ayudaron a mejorar el manuscrito original.

### REFERENCIAS

- Ackermann, F. (1999). Airborne laser scanning – present status and future expectations. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, pp. 64-67.
- Baltsavias, E.P. (1999). "Airborne laser scanning: basic relations and formulas". *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, pp. 199-214.
- Bates, P.B., Anderson, D.A., Price, D.A., Hardy, R.J., Smith, C.N. (1996). "Analysis and Development of Hydraulic Models for Floodplain Flows". En: Anderson, D.A., Walling, D.E. and Bates, P.B. eds. *Floodplain Processes*, John Wiley & Sons Ltd.
- Bates, P.B., De Roo, A.P.J. (2000). "A simple raster-based model for flood inundation simulation". *Journal of Hydrology*, 236, pp.54-77.
- Bates, P.D., Marks, K.J., Horritt, M.S. (2003). "Optimal use of high-resolution topographic data in flood inundation models" *Hydrological Processes*, 17, pp. 537-557.
- Bonham-Carter, G.F. (1996). *Geographic Information Systems for Geoscientists - Modelling with GIS*. Pergamon, Oxford.
- Brasington, J., Rumsby, B.T., McVey, R.A. (2000). "Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high-resolution GPS-based survey". *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, pp. 973-990.
- Burrough, P.A., McDonnell, R.A. (1998). *Principals of Geographical Information Systems*, Oxford University Press.
- Charlton, M.E., Large, A.R.G., Fuller, I.C. (2003). "Application of airborne LiDAR in River environments: The River Coquet, Northumberland, UK" *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, pp. 299-306.
- Chow V.T., Maidment D.R., Mays L.W. (1988). *Applied Hydrology*, MacGraw-Hill, Inc., New York.
- Cobby, D.M., Mason, D.C. (1999). "Image processing of airborne scanning laser altimetry for improved river flood modeling". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56, pp. 121-138.
- Cobby, D.M., Mason, D.C., Horritt, M.S., Bates, P.D. (2003). "Two-dimensional hydraulic flood modelling using a finite-element mesh decomposed according to vegetation and topographic features derived from airborne scanning laser altimetry" *Hydrological Processes*, 17, pp. 1979-2000.
- Fix R.E., Burt T.P. (1995). "Global Positioning System: an effective way to map a small catchment". *Earth Surface Processes and Landforms*, 20, pp. 817-827.
- French, J.R. (2003) "Airborne LiDAR in support of geomorphological and hydraulic modelling", *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, pp. 321-335.
- Gomes Pereira, L.M., Wicherson, R.J. (1999). "Suitability of laser data for deriving geographical information: a case study in the context of management of fluvial zones". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54 (2-3), pp. 105-114.
- Hardy, R.J., Bates, P.D., Anderson, M.G. (1999). "The importance of spatial resolution in hydraulic models for floodplain environments". *Journal of Hydrology*, 216, pp. 124-136.
- Horritt, M.S. (2000). "Development of physically based meshes for two-dimensional models of meandering channel flow". *International Journal for numerical methods in engineering*, 47, pp. 2019-2037.
- Horritt, M.S., Bates, P.D. (2001a). "Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach". *Hydrological Processes*, 15 (5), pp. 825-842.

- Horritt, M.S., Bates, P.D. (2001b). "Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow". *Journal of Hydrology*, 253, pp. 239-249.
- Hydrologic Engineering Center (1998a). *HEC-RAS, River Analysis System User's Manual, Version 3.1*, Davis, California.
- Hydrologic Engineering Center (1998b). *HEC-RAS Hydraulic Reference Manual*, Davis, California.
- Hydrologic Engineering Center (2002). *HEC-GeoRAS: An extensión for support of HEC-RAS using Arcview User's Manual, Versión 3.1*, Davis, California.
- Keim, R.F., Skaugset, A.E., Bateman, D.S. (1999). "Digital terrain modeling of small stream channels with a total-station theodolite". *Advances in water resources*, 23, pp. 41-48
- Lane S.N., Chandler J.H., Richards K.S. (1994). Developments in monitoring and terrain modelling small-scale river bed topography, *Earth Surface Processes and Landforms*, 19, pp. 349-368.
- Marks, K., Bates, P. (2000). "Integration of high resolution topographic data with floodplain flow models". *Hydrological Processes*, 14, pp. 2109-2122.
- Martín Vide, J.P. (2002). *Ingeniería de ríos*. Ediciones UPC, Barcelona.
- Navitronic Systems AS (1993). *Navisound 50 Operators Manual*, Denmark.
- Nicholas, A.P., Walling, D.E. (1997). "Modelling flood hydraulics and overbank deposition on river floodplains". *Earth Surface Processes and Landforms*, 22 (1), pp. 59-77.
- Omer, C.R., Nelson, E.J., Zundel, A.K. (2003). "Impact of varied data resolution on Hydraulic Modeling and Floodplain Delineation". *Journal of the American Water Resources Association*, 39(2), pp. 467-475.
- Raber, G., Jensen, J.R., Schill, J.R., Schuckman, K. (2003). "Creation of digital terrain models using an adaptive LiDAR vegetation point removal process" *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 68, 12, pp. 1307-1315.
- Ruiz, A.; González, X.; Herms, I. & Bastianelli, L. (2002). "Flood Risk Mapping Based on Airborne Laser Scanner Data: case of the Llobregat River". En: *Proceedings of the Int. Conference on Flood Estimation*, 6-8 March 2002, Bern, Switzerland.
- Tate, E.C. (1999). *Floodplain mapping using HEC-RAS and ArcView GIS*, Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin.
- Wehr, A., Lohr, U. (1999). "Airborne laser scanning—an introduction and overview" *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, pp. 68-82.
- Werner, M.G.F. (2001). Impact of grid size in GIS based flood extent mapping using a 1D flow model. *Phys.Chem.Earth (B)*, Vol. 26, No 7-8, pp.517-522.
- Wilson, M.D., Atkinson, P.M. (2003). "A comparison of remotely sensed elevation data sets for flood inundation modeling". *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Geocomputation*. University of Southampton, U.K.