

# Análisis de la validez de la cartografía satelital para su uso en la estimación de zonas inundables

Ruiz, O.<sup>a</sup>, Sánchez, J.M.<sup>b1</sup> y Álvarez, C.<sup>b2</sup>

<sup>a</sup>Grupo de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (GIHA). Escuela Politécnica de La Almunia (EUPLA). Universidad de Zaragoza. c/ Mayor s/n · 50100 La Almunia de Doña Godina (Zaragoza) email: oruiz@unizar.es, <sup>b</sup>Escuela Técnica Superior Ingenieros Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria. Avda. de los Castros, s/n 39005 Santander email: <sup>b1</sup>javier.sanchez@unican.es, <sup>b2</sup>cesar.alvarez@unican.es

Línea temática C | Agua y ciudad

---

## RESUMEN

El estudio de las avenidas de los ríos dispone de una base científica y de unas herramientas de cálculo suficientes para una adecuada valoración de los riesgos de inundación, sin embargo, la cartografía adecuada no siempre está disponible, bien por su elevado coste, bien por el tiempo requerido para su obtención por procesos convencionales. La cartografía satelital gratuita puede ser la respuesta, aunque su precisión es notablemente inferior a la habitual en estos estudios. Aprovechando una cuenca bien conocida, se analizan algunas de las cartografías disponibles, comparándolas en una primera fase con el LiDAR del CNIG y en una segunda fase comparando los resultados de una simulación bidimensional sobre la misma zona. La comparación del satélite ASTER muestra diferencias geométricas muy significativas mientras que para el STRM tanto la geometría como el resultado de la simulación, en situaciones de determinación de inundaciones con caudales de elevado periodo de retorno, son, a priori, aceptables.

**Palabras clave** | determinación de áreas de inundación; cartografía satelital;

---

## INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son un tema que entra y sale de la actualidad a base de desgracias, prácticamente ninguna parte del mundo está libre de ellas. Las inundaciones causan problemas tanto en países desarrollados como no desarrollados aunque, evidentemente, los últimos sufren más las consecuencias. Las graves inundaciones de Japón causadas por el tifón Etau hace dos años, las mayores en décadas, provocaron 7 muertos y 100.000 desplazados; las inundaciones en el sudeste asiático causadas por el ciclón Komen causaron en las mismas fechas cientos de muertos y millones de desplazados. Estos son dos ejemplos comparables pero hay muchos más, aunque unas veces salten a primera fila de la actualidad y otras no.



**Figura 1** | Inundaciones en la India, agosto 2015 (fuente: Web CNN)

Las inundaciones, como otros fenómenos naturales, son difíciles de combatir y de predecir, y sus efectos están frecuentemente incrementados por los usos y costumbres humanos. En la mayoría de los casos, su repetitividad no es garantía de ausencia de daños, en el último mes, las inundaciones en la isla japonesa de Kyushu han dejado 16 muertos y 500.000 desplazados, y las provocadas por el ciclón Mora más de 200 muertos y más de 3 millones de afectados en Sri Lanka y Bangladesh. Las llanuras de inundación de los ríos han sido focos de atracción para los asentamientos humanos desde tiempo inmemorial.

Sin embargo, la tendencia actual de las administraciones responsables de la ordenación del espacio es la contraria: la planificación y la gestión del riesgo de inundación busca eliminar las constricciones al río, liberándole en las zonas de baja vulnerabilidad para que recupere una movilidad perdida, mientras que se protege las zonas de mayor riesgo. Se puede constatar con facilidad que las edificaciones de la mayoría de los asentamientos tradicionales están fuera, o estuvieron fuera, de la zona de inundaciones más frecuentes, mientras que las zonas de cultivo son susceptibles de inundación con una frecuencia mayor. Sin embargo, la presión demográfica (particularmente significativa en zonas desfavorecidas), el desarrollo urbanístico y otras razones, que podrían formar una larga lista, han llevado a ocupar espacios más cercanos al río, pero en esta modificación de los usos del suelo los ríos tampoco colaboran, porque, salvo zonas donde estén encauzados, los cauces se mueven y se transforman evolucionando año a año, o de avenida en avenida, cuando su energía es mayor y, por tanto, su capacidad de modelar el terreno.

El Cambio Climático es otro elemento a tener en cuenta cuando se fija la vista en las inundaciones, ya que de hecho en numerosas ocasiones estas se usan como prueba de la existencia del mismo. Los efectos del Cambio Climático provocarán, en muchas zonas del mundo, una disminución de las precipitaciones pero produciéndose de forma concentrada. Esta concentración aumenta la intensidad de las precipitaciones lo cual es sinónimo de incremento de las inundaciones y sus consecuencias.



**Figura 2** | Foto desde el avión del río Mekong donde se aprecian multitud de meandros abandonados e inundados (fuente: el autor)

Estos hechos justifican que las inundaciones sean un fenómeno permanentemente estudiado. En España se está desarrollando el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI), que “sirve de ayuda a los organismos de cuenca en la emisión de informes sobre autorizaciones en el Dominio Público Hidráulico y zona de policía, en la gestión de avenidas en conexión con el S.A.I.H. (Sistema Automático de Información Hidrológica) y en la planificación de las actuaciones de defensa frente a inundaciones; agiliza la planificación y gestión de inundaciones por los servicios de Protección Civil; facilita la transmisión de información sobre zonas inundables a las administraciones competentes en planificación territorial y empresas promotoras; y permite a los ciudadanos conocer la peligrosidad de una zona determinada” (<http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/snczi/>). El SNCZI está motivado por la Directiva Europea 2007/60/CE Europea de “Evaluación y Gestión del Riesgo de Inundación”, que incluye la necesidad de la evaluación preliminar del riesgo de inundación y la realización de los mapas de peligrosidad por inundaciones y de mapas de riesgo de inundación. Cambiando al otro extremo del mundo, en Iberoamérica, el Banco Interamericano de Desarrollo, está desarrollando los estudios de vulnerabilidad frente a riesgos naturales en numerosas ciudades de los países que están en su zona

de influencia, y entre los riesgos analizados se encuentran los riesgos de inundación. En los países asiáticos, el Asian Development Bank está apoyando numerosos proyectos “Flood Risk Management” en China, Vietnam, Mongolia, Nepal,...

La primera fase de todos estos estudios es la obtención de la información básica para su realización, en la que una parte importante es la obtención de una base cartográfica. Es frecuente en este aspecto que el proyecto no incluya su realización, ya que se ha podido realizar en otro contrato específico o que se deba aprovechar información existente, que ha podido ser realizada específicamente para el estudio de inundaciones, o no. Cuando la cartografía existente tiene una escala 1:50.000, con curvas de nivel cada 20 metros y no se puede, no se quiere o, como ocurre lamentablemente en muchos casos, no hay dinero para realizar la campaña de campo requerida para dar soporte a los modelos hidráulicos, resulta imprescindible buscar soluciones que permitan realizar el trabajo de forma razonable o, simplemente, renunciar a la realización del estudio, con las consecuencias que esta última decisión puede tener sobre futuros trabajos.

La situación cartográfica en distintos países de nuestro entorno es muy diferente, pero a modo de ejemplo, indicar que a principio del siglo XIX en Gran Bretaña se empezó a desarrollar la cartografía “one inch” (una pulgada por milla, escala 1:63.360) y antes de que acabara el siglo estaban terminadas las series escala 1:10.560 (“six inches”) y escala 1:2.500 de todo el territorio. En España, la cartografía 1:50.000 se inició en 1875 y no se terminó hasta los años sesenta del siglo XX (Vicente, 2012), iniciándose también en el siglo XX la serie 1:25.000. En la última década la evolución ha sido vertiginosa, facilitándose numerosos productos cartográficos en las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE), si nos centramos en el ámbito de este artículo, destacar que todas las comunidades autónomas facilitan el acceso libre a través de Internet de cartografía a escala 1:5.000, y el Instituto Geográfico Nacional pone a disposición el Modelo Digital del Terreno (MDT), obtenido mediante interpolación de modelos digitales del terreno de 5 metros de paso de malla procedentes del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), además del PNOA LiDAR, con una densidad de 0,5 puntos/metro y una precisión altimétrica obtenida mejor de 20 cm RMSE Z (<http://pnoa.ign.es/presentacion>).

Por tanto, se pretende contrastar los resultados obtenidos a partir de una cartografía con una equidistancia de 20 m, en ocasiones la única posible, con otra caracterizada por una precisión altimétrica de 20 cm y, por supuesto, queremos/necesitamos resultados muy semejantes, puesto que se quiere llegar al mismo resultado, la determinación de las zonas de inundación. ¿Hasta qué punto es necesaria la precisión cartográfica que disfrutamos en España para obtener unos resultados razonables en un estudio de inundaciones? ¿Qué alternativas disponemos usando fuentes cartográficas internacionales para mejorar esta información básica? Estas preguntas son las que se quiere responder con esta investigación. La diferencia de precisión es evidente y obvia pero, ¿cuánto afecta esta diferencia si comparamos la cartografía desde el punto de vista de un modelo hidráulico? ¿Cuál es el límite de precisión que produce unos resultados razonables?

---

## MATERIAL Y MÉTODOS

Se propone realizar el estudio en una cuenca conocida, con abundante información disponible y para la que exista información cartográfica accesible en diferentes escalas de comparación, con el objetivo de utilizar la información cartográfica de la mayor precisión disponible en la simulación y comparar los resultados obtenidos con modelos del terreno de menor precisión.

La cuenca que se está tomando como banco de pruebas es la correspondiente al río Jalón. Esta cuenca abarca una superficie de 9.718 km<sup>2</sup> y forma parte del tramo medio de la Cuenca del Ebro, en el noreste de la península Ibérica, siendo su principal afluente por la margen derecha. Nace en la Sierra Ministra, en la paramera de Medinaceli (Soria), tiene una longitud de 223,7 km y desemboca en el Ebro a la altura de Alagón (CHE, 2013). Los principales afluentes del río Jalón son los ríos Jiloca y Piedra.

El punto más alto de la cuenca se encuentra en el Pico Tablado, próximo al lugar de nacimiento del río Manubles, con una altitud de 1.747 msnm, mientras que la menor cota se localiza en la desembocadura a una altitud de unos 210 msnm. La pendiente media es del 0,68%.

La parte superior de la cuenca del río Jalón tiene un relieve muy abrupto dejando muy poco espacio al cauce, al estar encajado en el relieve no se observa el desarrollo de llanuras de inundación pero si una serie de terrazas más o menos cercanas al

cauce. En este tramo de cabecera, el cauce está muy influido por las infraestructuras, destacando el encauzamiento del río en Ateca.

En el tramo entre Ateca, donde se le une el río Manubles, y Calatayud, se encuentra una zona de llanura de inundación sin un gran desarrollo pero suficiente para dotar de una capacidad hortofrutícola a la zona que motivó el asentamiento árabe que dio origen a la ciudad. Se observan en esta zona numerosos restos de cauces abandonados, unos consecuencia de la propia dinámica fluvial y otros frutos de encauzamientos realizados por el hombre.

Agua abajo de Calatayud y hasta Ricla, la orografía vuelve a dominar a la dinámica fluvial, encajando nuevamente el río y transformando la rica llanura de inundación en terrazas bajas. En el tramo entre Ricla y Urrea de Jalón, la formación de abanicos por los arrastres de materiales de los barrancos mantiene un cauce encajado y aguas abajo de este punto ya se abre la llanura hasta la desembocadura en el río Ebro, en el que se observan continuos meandros que, añadidos a la existencia de meandros abandonados, influirán en la simulación de la llanura de inundación.

El tramo final del río discurre por las terrazas del Ebro por lo que debe perder un desnivel importante para llegar hasta este último, por ello, este tramo tiene más pendiente que la llanura aguas abajo de Urrea de Jalón.

Esta diversidad de entornos orográficos hace de este río un candidato ideal para valorar el comportamiento de la simulación hidráulica al enfrentarse a distintas condiciones y bases cartográficas de diferentes precisiones.

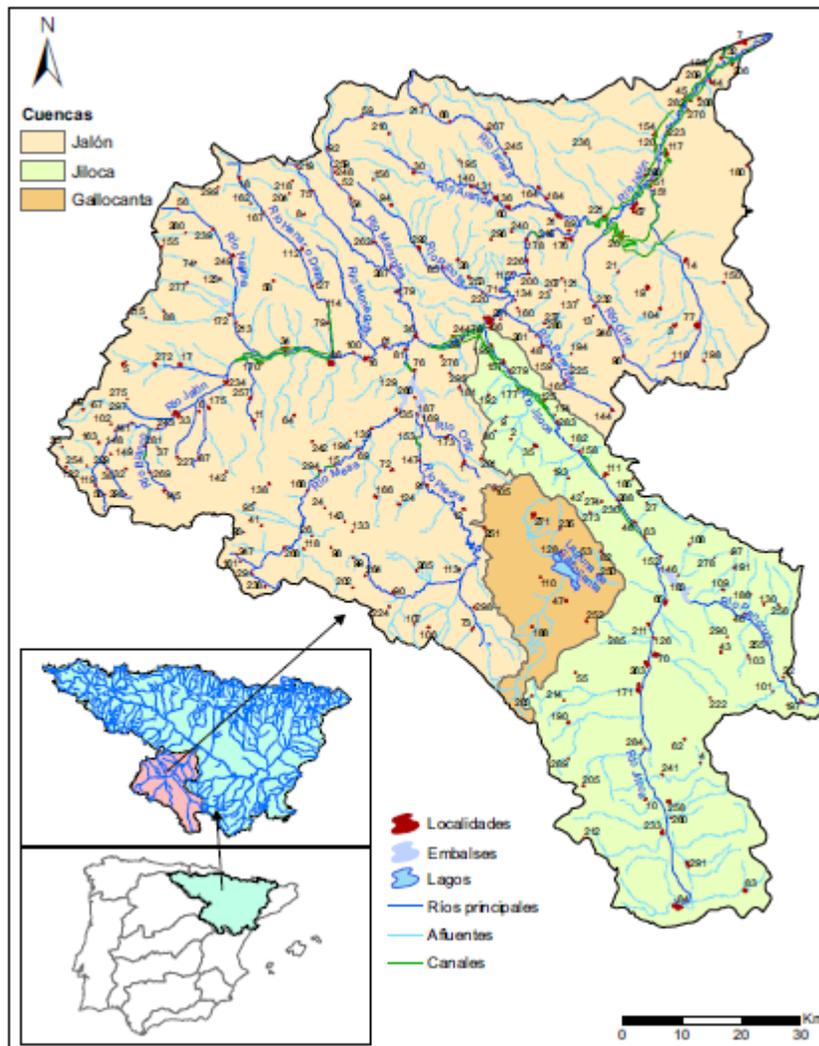


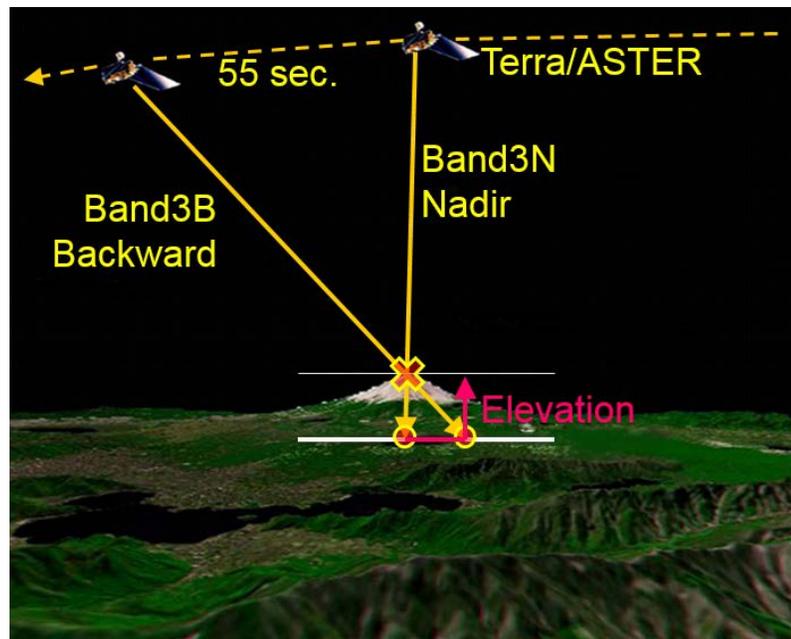
Figura 3 | Cuenca del río Jalón (fuente: Borrador del Plan Hidrológico del Río Jalón)

## ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM)

El ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI) y la NASA desarrollaron el Proyecto ASTER Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM), que obtiene un Modelo Digital del Elevaciones (MDE o DEM en su denominación inglesa) de toda la Tierra capturado por el sensor "ASTER", desarrollado por el METI y situado en el satélite Terra de la NASA.

El DEM está obtenido mediante estereoscopia, utilizando dos telescopios, uno en dirección nadir y otro hacia atrás consiguiendo imágenes estereoscópicas con una superposición del 60% tomadas cada 15 metros sobre el plano horizontal.

El ASTER GDEM cubre la superficie terrestre entre 83° de latitud norte y 83° de latitud sur, y se distribuye dividido en ficheros ráster, formato GeoTIFF de una banda, según una cuadrícula de un grado sexagesimal. Los rasters están compuestos por celdas de 1 segundo de arco, a la que corresponde una resolución espacial en torno a 30 m. en el Ecuador, que contienen la elevación referida al geoide WGS84 / EGM96 en la versión 2 del ASTER. (Tetsushi Tachikawa et al).



**Figura 4** | Toma de imágenes estereoscópicas por el sensor ASTER (fuente: Tetsushi Tachikawa et al, presentación)

Las imágenes fueron tomadas entre los años 2000 y 2010, distribuyéndose libremente en el 2011 para la versión 2. La validación realizada durante el proceso de desarrollo obtuvo unos errores en planta entre  $-0,57$  y  $+0,22$  segundos de arco en la dirección este – oeste y  $-0,54$  a  $+0,03$  segundos de arco en la dirección norte – sur, en 24 celdas seleccionadas mediante comparación con un DEM de tamaño de celda de 10 metros realizado por el Geographical Survey Institute (GSI) de Japón. El error medio es de  $0,11$  segundos de arco hacia el oeste y  $0,20$  segundos de arco hacia el sur, la desviación estándar alcanza  $0,22$  segundos de arco en la dirección este – oeste y  $0,14$  segundos de arco en la dirección norte – sur.

El error en las elevaciones de las 24 zonas de validación varía entre  $+3,34$  y  $+15,02$  metros con una media de  $+8,3$  metros y una desviación estándar de  $12,6$  m. Este error se explica porque ASTER está mostrando la parte superior de los árboles y el DEM de comparación muestra el suelo.

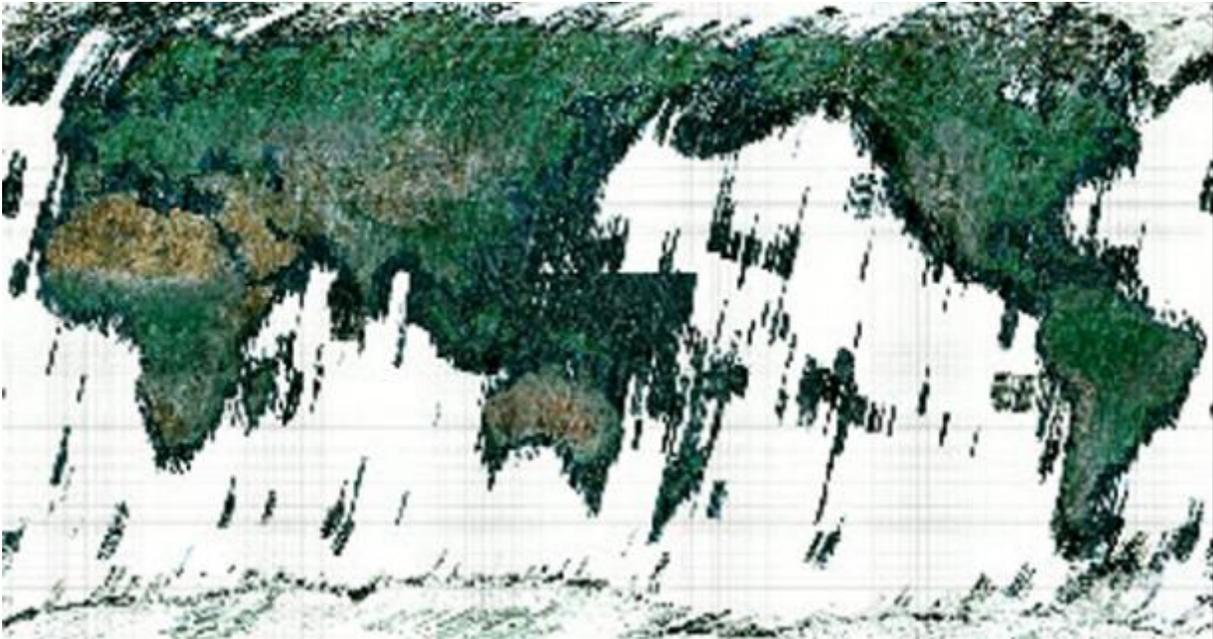


Figura 5 | Cobertura ASTER (fuente: Tetsushi Tachikawa et al, presentación)

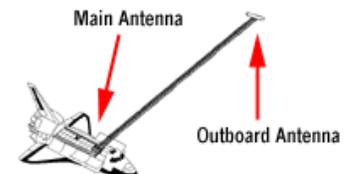
## DLR SRTM X-SAR

El MDE de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) proviene de la información recopilada durante 11 días en febrero del año 2000 mediante dos radares de apertura sintética (SAR en su acrónimo en inglés) montados sobre el transbordador espacial Endeavour. La misión STRM fue desarrollada por el Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (Centro Aeroespacial Alemán, DLR), la Agenzia Spaziale Italiana (ASI) y la NASA. Los radares trabajaban en la banda C, el procedente de la NASA, y en la banda X, proporcionado por el consorcio internacional, de mayor precisión que el anterior.

El SRTM DEM fue generado usando la técnica de Interferometría radar, conocida como InSAR, para ello era necesario tomar información desde dos puntos, por lo que se situó un radar dentro de la bodega del trasbordador y el otro se montó sobre un mástil de 60 metros. La comparación de las dos medidas fue usada para generar los valores de elevación.

Los ficheros DEM, accesibles de forma gratuita, tienen un tamaño de 15'x15' geolocalizados mediante su latitud y longitud, y referenciados al elipsoide WGS84.

Cada celda del modelo tiene un tamaño de 1"x1", en longitud y latitud, y contiene el valor de su elevación con resolución de 1 metro. La precisión horizontal tiene un valor de  $\pm 20$  m (abs.) /  $\pm 15$  m (rel.), para un nivel de confianza del 90% de error circular, mientras que la precisión vertical alcanza  $\pm 16$  m (abs.) /  $\pm 6$  m (rel.), al 90% de probabilidad.



Reflected radar signals collected at two antennas, providing two sets of radar signals separated by a distance.

Figura 6 | Posición antenas radar (fuente: NASA web <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>)

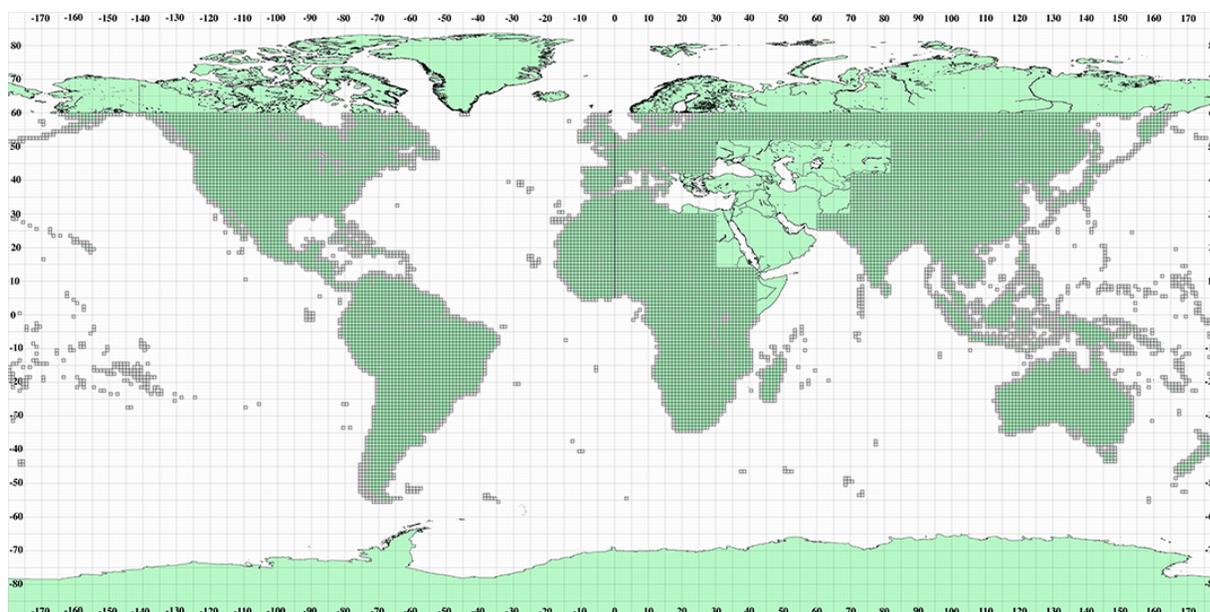


Figura 7 | Cobertura STRM (fuente: NASA web <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>)

El DEM generado no es completo y cubre una superficie inferior al ASTER; por ello, la NASA está desarrollando una versión actualizada del modelo SRTM rellenando los vacíos mediante la información ASTER. (Rodríguez et al., 2005)

La evolución de este proyecto es la misión formada por los satélites de observación con radar TanDEM-X (Terra-SAR-X add-on for Digital Elevation Measurement) y el casi idéntico TerraSAR-X, que formarán un sistema radar interferométrico de alta precisión.

Con esta formación en tándem TerraSAR-X/TanDEM-X que genera imágenes similares a fotos estereoscópicas, se está midiendo toda la superficie de tierra firme de la Tierra a lo largo de un periodo inferior a tres años. Para una rejilla de 12 m, se puede determinar la información de la altura con una precisión inferior a dos metros. Uno de los objetivos de la misión será la producción de un Modelo de Elevación Digital global con una precisión sin precedentes. Las misiones TerraSAR-X y TanDEM-X se han desarrollado mediante una asociación entre Airbus Defence and Space GmbH y la Agencia Espacial Alemana DLR. Hata ahora, el MDE obtenido solo tiene versión comercial. (Zink et al., 2015)

## MDT05

El MDT05 es un modelo digital del terreno realizado por el Instituto Geográfico Nacional de España que se puede descargar desde el CNIG (<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/>). Este MDT tiene un paso de malla de 5 m, con la misma distribución de hojas que el Mapa Topográfico Nacional 1:50.000 (MTN50), está referido al sistema geodésico de referencia ETRS89 y proyección UTM en el huso correspondiente a cada hoja, y altitud respecto al nivel medio del mar en Alicante (nmma). Se facilitan también MDT con pasos de malla de 25 y 200 metros.

Según la hoja de que se trate, el MDT05 se ha obtenido de una de las dos siguientes formas: por estereocorrelación automática de vuelos fotogramétricos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) con resolución de 25 o 50 cm/píxel, revisada e interpolada con líneas de rotura donde fuera viable, o bien por interpolación a partir la clase terreno de vuelos LiDAR (Light Detection And Ranging) del PNOA.

Cuando el origen del MDE es la correlación, la precisión altimétrica esperada es de 1-2 m (RMS) y 2-4 m, al 90%, en función del tamaño pixel usado, respectivamente. Se indica expresamente que en zonas de sombra o con pendientes extremas o caóticas, en las que la correlación no ofrezca resultados óptimos, las precisiones nominales pueden verse empeoradas, y se debe tener presente que los entornos de las márgenes típicamente están cubiertos por vegetación media y alta de ribera. Respecto a la precisión nominal en el caso del empleo de datos LiDAR, se indica que se ha formado a partir del filtrado a clase terreno (código

2, estándar ASPRS) e interpolación de tipo convolución cúbica, y que la precisión esperada es de 0.5-1 m, según la complejidad del terreno. Nuevamente destacar la dificultad que suponen los entornos de los cauces, en los que la vegetación que habitualmente existe dificulta la penetración del LiDAR al terreno, obteniéndose en consecuencia una interpolación de peor calidad, superándose las precisiones nominales.

## PNOA LiDAR

El PNOA LiDAR tiene como objetivo cubrir todo el territorio de España mediante nubes de puntos con coordenadas X,Y,Z obtenidas mediante sensores LiDAR aerotransportados, con una densidad de 0,5 puntos/m<sup>2</sup>. La precisión altimétrica obtenida es mejor de 20 cm RMSE Z. Estas coberturas se han realizado mediante colaboración y cofinanciación entre el Ministerio de Fomento (por medio del IGN y el CNIG), el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (por medio de la Dirección General del Agua, las Confederaciones Hidrográficas y el FEAGA) y el Ministerio de hacienda y Administraciones Públicas (por medio de la Dirección General del Catastro), además de las Comunidades Autónomas. (<http://pnoa.ign.es/>)

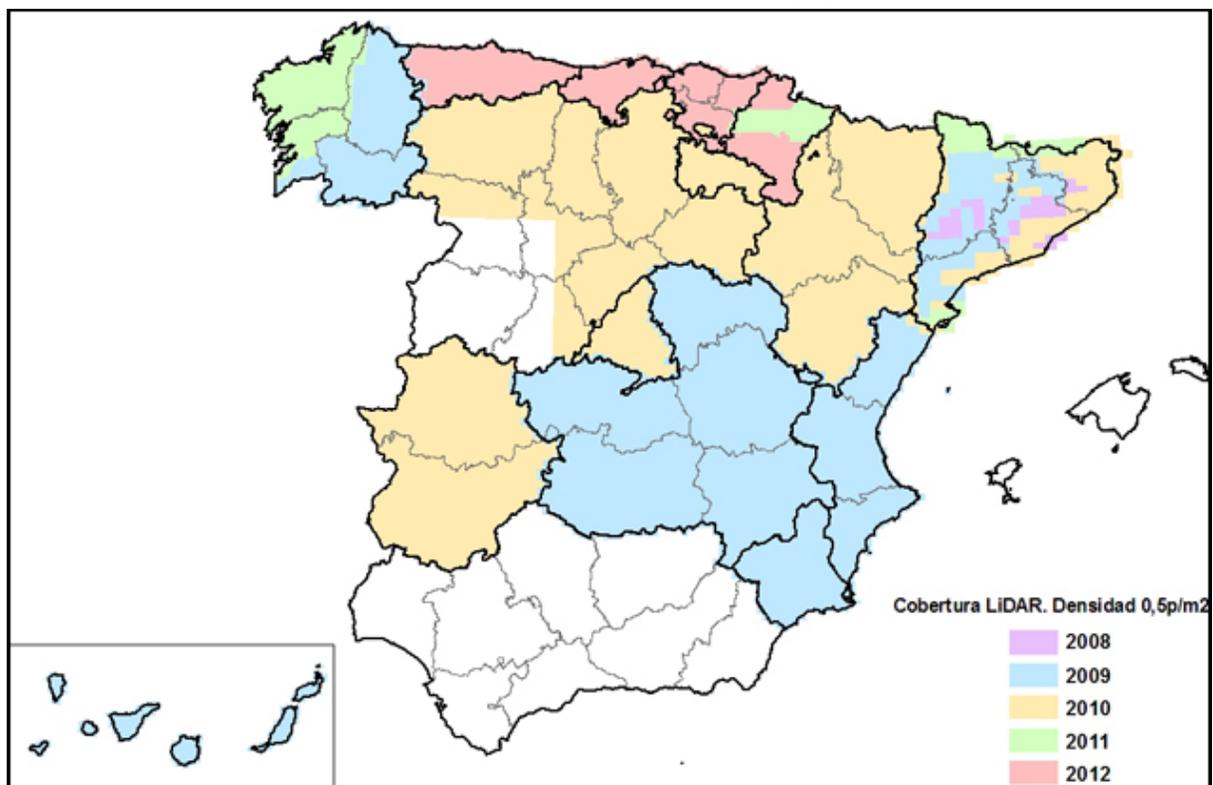


Figura 8 | Cobertura PNOA LiDAR (fuente: web PNOA)

Los datos se distribuyen a través del Centro de Descargas del CNIG en ficheros digitales de 2x2 km de extensión. El formato de descarga es LAZ (formato de compresión de ficheros LAS). Las nubes de puntos han sido capturadas mediante sensores LiDAR y posteriormente clasificadas de forma automática y coloreadas en RGB a partir de las ortofotos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) con tamaño de pixel de 25 o 50cm. El sistema geodésico de referencia es ETRS89 en la Península, Islas Baleares, Ceuta y Melilla, y REGCAN95 en las Islas Canarias y proyección UTM en el huso correspondiente a cada fichero. Las coordenadas Z son altitudes ortométricas.

## LiDAR 01

En mayo de 2007, para el Estudio de zonas inundables y delimitación del Dominio Público Hidráulico del río Jalón aguas abajo de la confluencia del Piedra y del Jiloca aguas abajo de la confluencia del Pancrudo, se realizó por parte de la empresa V Jornadas de Ingeniería del Agua. 24-26 de Octubre. A Coruña

INCLAM un modelo digital de elevación a partir de dos vuelos LiDAR. El DEM tiene un paso de malla de 1 metro y una precisión de 0,25 m en planta y 0,20 m en altura. Está realizado sobre el sistema geodésico de referencia ED50, proyección UTM huso 30 en planimetría y altitudes referidas al nmma. (INCLAM, 2007)

En las zonas donde este modelo coincide con alguno de los anteriores se considera que este es el más cercano a la realidad y sirve como punto de comparación para el resto.

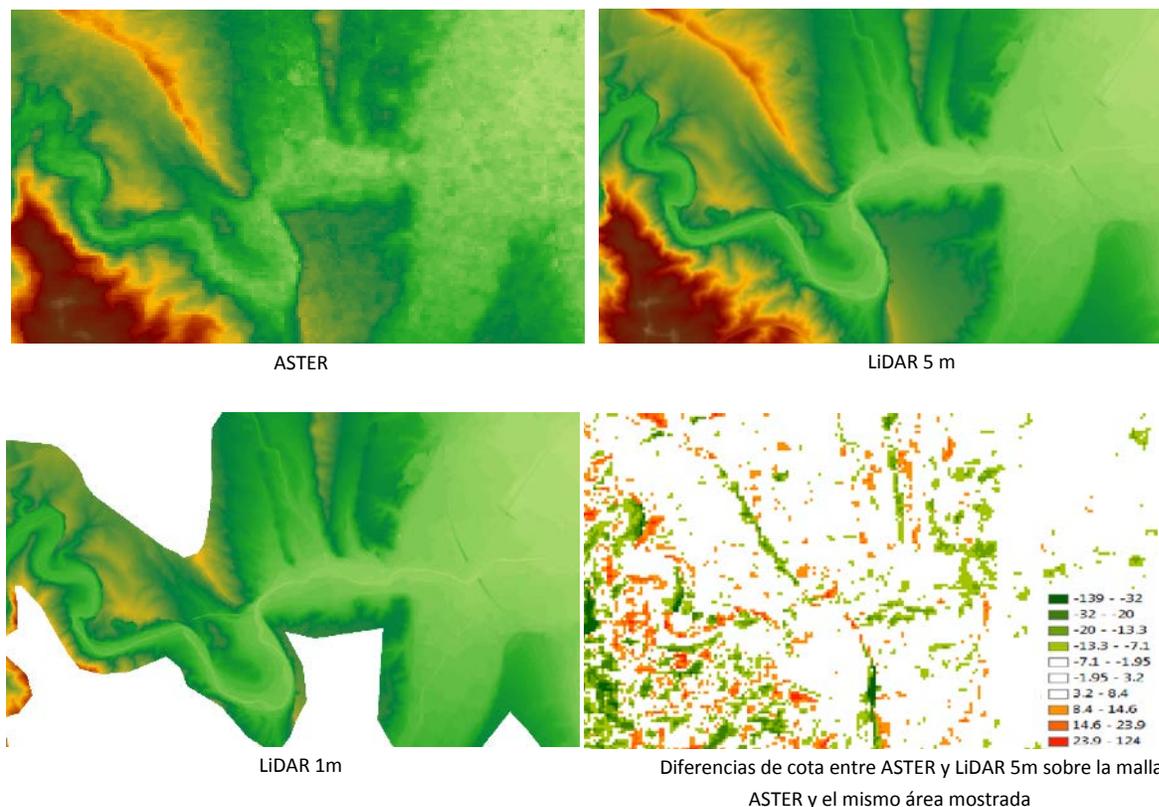


Figura 9 | Comparación entre distintas cartografías (fuente: elaboración propia)

## ANÁLISIS MEDIANTE MODELIZACIÓN HIDRÁULICA

Para comparar los resultados obtenidos con estas cartografías se va utilizar como “banco de pruebas” el software Iber, modelo matemático bidimensional para la simulación de flujos en ríos y estuarios promovido por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y desarrollado en colaboración con el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (de la Universidad de A Coruña), el Grupo Flumen (de la Universitat Politècnica de Catalunya UPC y de la Universitat de Barcelona UB) y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE (vinculado a la Universidad Politècnica de Catalunya UPC), en el marco de un Convenio de Colaboración suscrito entre el CEDEX y la Dirección General del Agua. (<http://www.iberaula.es/>)

Iber es un modelo numérico desarrollado directamente desde la administración pública española, de uso libre, fácilmente adaptable a las necesidades específicas de cada momento, diseñado para ser especialmente útil a las necesidades técnicas de las Confederaciones Hidrográficas y las Administraciones Autonómicas con competencia en materia de agua, en la aplicación de la legislación sectorial vigente en materia de aguas.

Las capacidades y características más destacadas del modelo Iber en su versión actual son las siguientes, seleccionando sólo las más significativas para el artículo:

- Resolución integrada de las ecuaciones de Saint Venant 2D
- Esquemas explícitos en volúmenes finitos con mallas no estructuradas

- Capacidad de resolver flujo subcrítico y supercrítico, incluyendo resaltos hidráulicos móviles
- Mojado y secado del dominio con la conservación exacta del volumen de agua
- Modelización de la turbulencia mediante modelos de diferente complejidad
- ....
- Interfaz amigable de pre y post-proceso
- Integración en GIS
- Verificado y contrastado con soluciones analíticas, con otros modelos, con ensayos de laboratorio y con medidas de campo

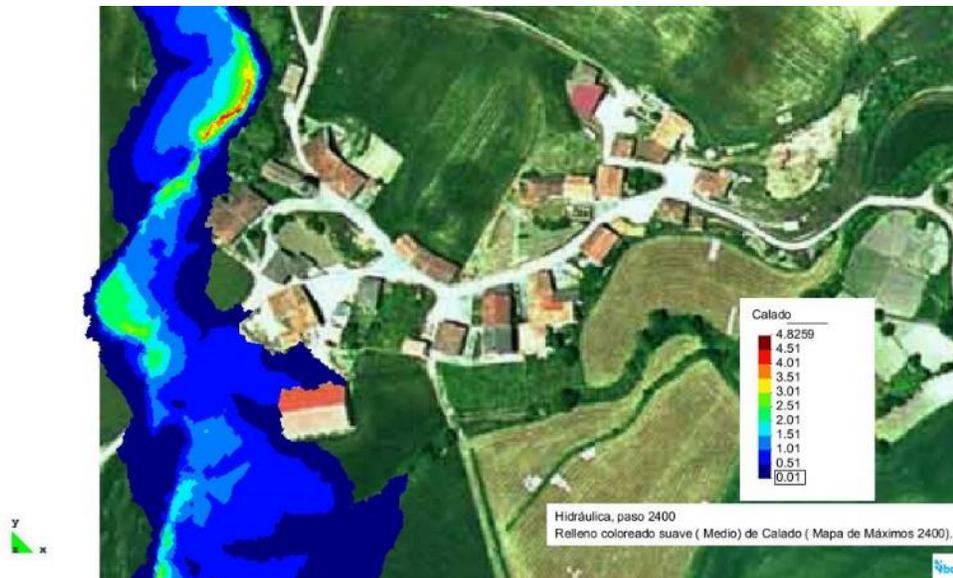
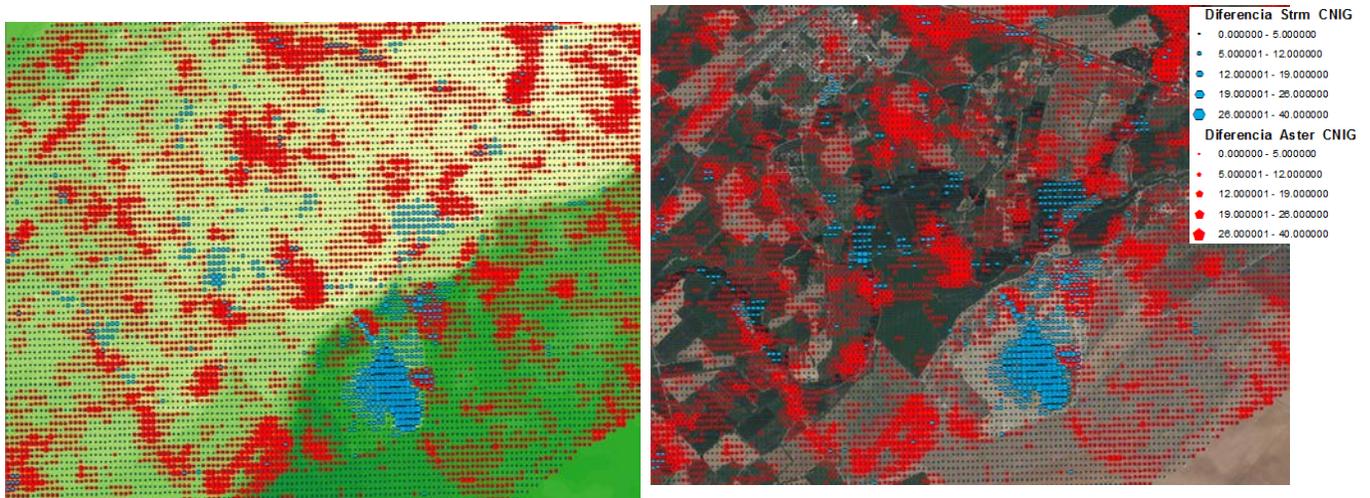


Figura 10 | Mapa de valores máximos de calados (fuente: elaboración propia)

## CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS

El objetivo de la modelización se centra en contrastar el efecto de la precisión de las distintas cartografías disponibles sobre los resultados hidráulicos, para ello se han construido los modelos de forma que se intenta eliminar todas las variables externas que vayan a interferir en el resultado. En esta línea, la configuración del modelo respecto a parámetros de tiempo, generales o resultados se han duplicado para todos los casos, y se han descartado los efectos de la turbulencia, viento, transporte de sedimentos, calidad de aguas o hidrología.

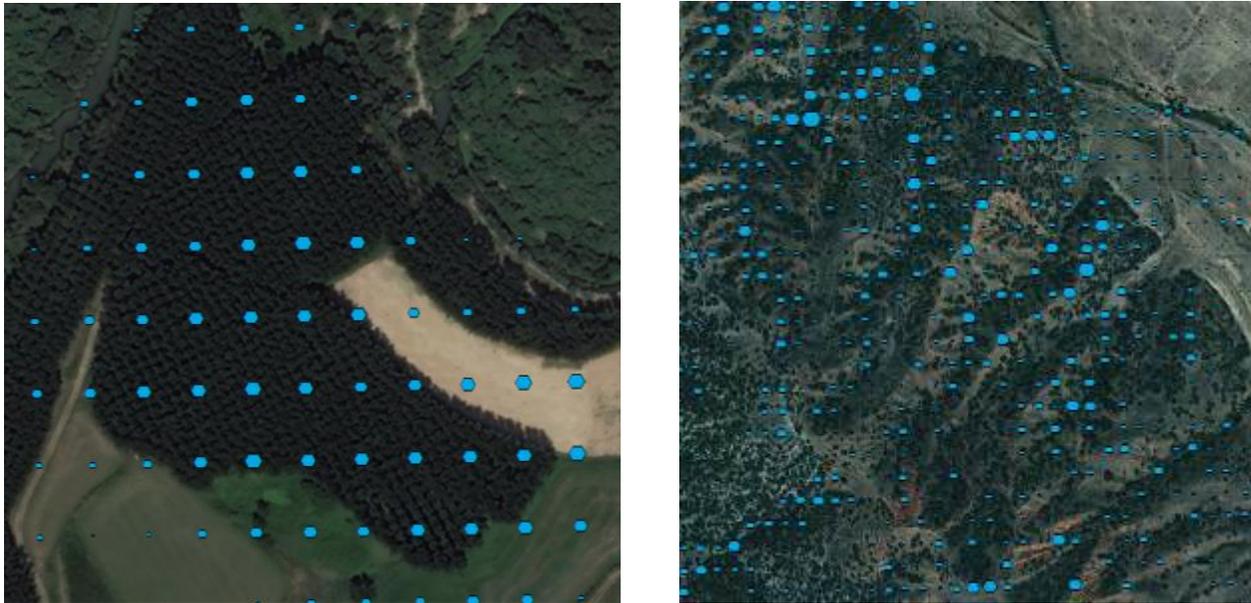
La primera fase de la construcción de los modelos consiste en situar la información cartográfica en el mismo sistema de referencia. La información proveniente de las misiones ASTER y STRM vienen referidos al elipsoide WGS84 y en coordenadas geográficas, mientras que el MDT05, utilizado en esta primera fase de comprobación, en cambio, está referido al sistema geodésico de referencia ETRS89 y proyección UTM. Surge así una dificultad camuflada en el proceso de gestión de la información raster. El raster es una cuadrícula o matriz que contiene información en cada una de sus celdas, en este caso la altura sobre el elipsoide de referencia, con una única coordenada XY para ubicar el archivo y el tamaño de la celda para su representación. La información contenida en la celda puede hacer referencia al centro de la misma o a cualquiera de sus vértices, los procesos de transformación e importación, pueden hacer asunciones al respecto no correctas, introduciendo un error del tamaño de la celda al posicionar el valor en el espacio. La referencia que toman los programas para la gestión del valor del raster no suelen estar bien documentados. Para solventar este problema, se ha reducido los raster de partida a sus puntos significativos, transformado las celdas en un único punto, aquel al que le corresponde la información contenida en la celda. Son estos ficheros de puntos los que se han comparado. La altitud en cada celda también se ha transformado para ser coherente con la altura ortométrica de REDNAP (Red Española de Nivelación de Alta Precisión), referida al geoido EGM08-RNAP, desde el EGM08 inicial.



**Figura 11** | Diferencias de altura entre STRM(azul) y ASTER(rojo) respecto al MDT05, representado sobre el raster MDT05 y ortofoto. El tamaño es proporcional a la diferencia.

Los valores de alturas obtenidos de la información satelital se han comparado con los valores del MDT05, pero mientras que las coordenadas XY de ASTER y STRM coinciden entre ellas, no ocurre lo mismo con la referencia por lo que la comparación ha requerido una transformación intermedia. Dada la no coincidencia espacial de los puntos a comparar, se han considerado los puntos más cercanos, para ello, se ha programado un algoritmo en Python que recibe como parámetros los ficheros de puntos, la distancia máxima a considerar y el método para promediar el valor de los puntos dentro de esta distancia. Estos dos últimos parámetros, que marcan el resultado final, se han establecido a 4 metros y valor medio, es decir, la altura de comparación entre un punto de ASTER o STRM y el MDT05 se ha calculado como la media de la altura de los puntos que se encuentren situados dentro de un recuadro de 4 metros de lado. El resultado de la comparación se ha representado en GIS sobre la ortofoto de la cuenca para un primer análisis visual del resultado.

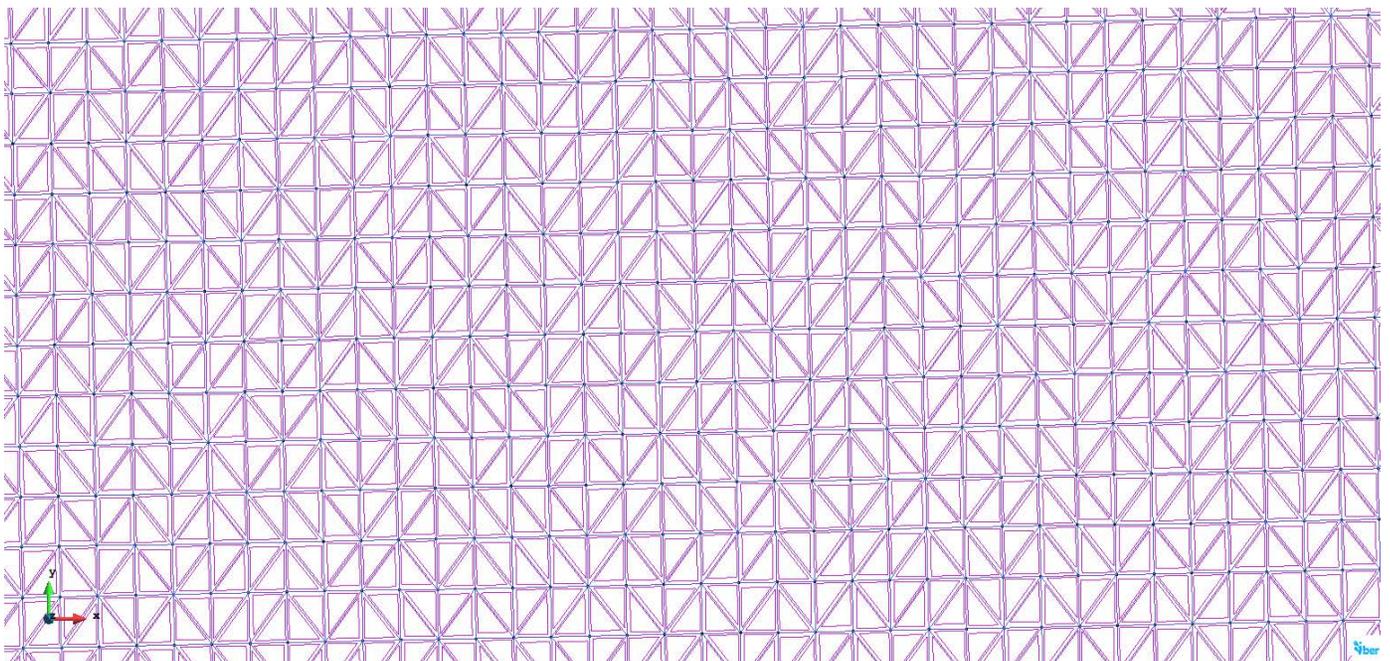
La figura 11 muestra una zona como ejemplo del resultado obtenido, se ha comprobado que las conclusiones que se pueden obtener observando esa zona se pueden generalizar para el resto de la cuenca. La primero que se puede observar es la generalizada diferencia entre los valores de la misión ASTER con la referencia, diferencias elevadas, agrupadas y sin una causa clara. Los puntos fácilmente observables en la figura representan valores superiores a los 30 metros (positivos o negativos). Por el contrario, los valores que muestran el STRM son muy inferiores y, en la mayoría de los casos, fácilmente identificable su causa. En general, las diferencias significativas coinciden con masas boscosas o fuertes cambios de pendiente, como se puede observar en las figuras siguientes.



**Figura 12** | Diferencias de altura sobre el geoide de STRM en zonas significativas.

En la actualidad se está analizando la existencia de patrones sistemáticos que puedan identificar las causas de la variación de las alturas contenidas en el raster procedente de la misión ASTER y compensarlas, procediéndose a descartar pasar el ASTER a la siguiente fase de modelización, debido a las discrepancias detectadas. Por el contrario, la información procedente de STRM se considera adecuado para la fase de modelización con Iber.

El modelo Iber se ha construido a partir de los puntos obtenidos del raster para el análisis de comparativo, triangulándolo directamente durante la importación los puntos como fichero de Puntos XYZ, obteniéndose una geometría formada por triángulos que unen directamente sin remuestreo o interpolación alguna los puntos contenidos en el fichero.

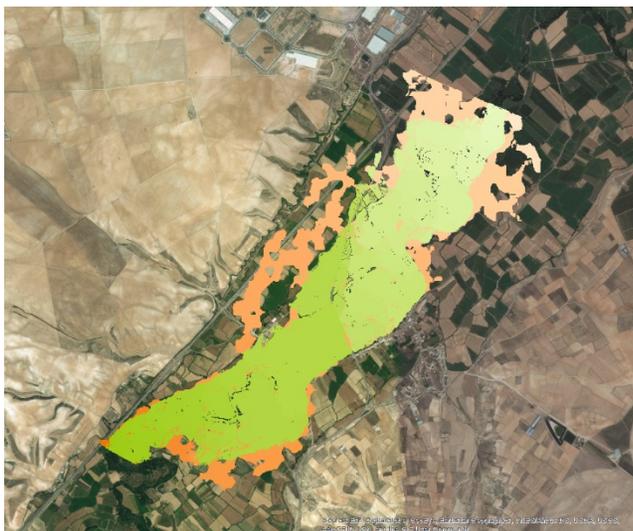


**Figura 13** | Geometría Iber para el modelo STRM.

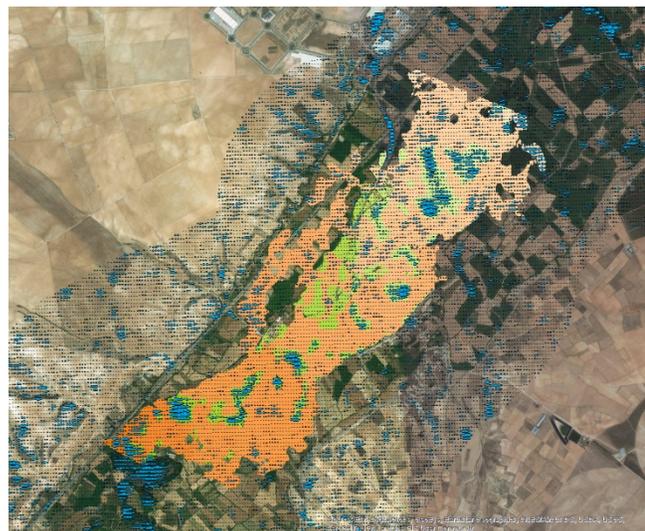
Una vez constituida la geometría, se ha intentado aislar la influencia de los parámetros en el resultado final, con el objetivo de que sean fácilmente comparables las simulaciones sobre geometrías distintas. Las simulaciones se realizan a caudal constante, sin tener en cuenta las variaciones de la onda de avenida que complicarían la obtención de resultados; por ello, se ha establecido como condición inicial el cauce seco en toda la zona a estudiar dando tiempo suficiente para la estabilización del flujo durante el análisis. De igual forma, se han eliminado las posibles afecciones causadas por la asignación del número de Manning a la superficie, fijando inicialmente un valor medio para toda el área, 0.025, valor que el propio Iber asocia a río. Los caudales simulados han sido los correspondientes a 100 años de periodo de retorno, obtenidos del estudio de Inclam para la zona modelizada. No se han simulado caudales de mayor frecuencia debido a que nos estamos centrando en su uso como análisis de los efectos frente a las inundaciones, y siendo conscientes de que cuanto más pequeño sea el periodo de retorno mayor efecto tendrá la bondad de la cartografía sobre la veracidad del resultado final. La línea donde se introduce el caudal es la misma para todos los casos, así como las condiciones de contorno aguas abajo del modelo, donde se ha fijado el calado dejando una distancia significativa hasta la zona de análisis para que no afecte a los resultados de la simulación.

Las estructuras presentes en el río y que afectan al flujo, principalmente puentes, no se han simulado. Se considera que estos son elementos que se deben caracterizar siempre de forma precisa e independiente a la captura de cualquiera de las cartografías propuestas, por lo que no influyen en la investigación que se está realizando. Otra práctica habitual es introducir la información del cauce principal, en la zona que queda bajo el agua y que queda fuera del alcance de los sensores, aunque en este caso esta información no se va a introducir dado que alterarían los resultados del conjunto, a pesar que la introducción de este canal reduciría la diferencia entre los resultados de las simulaciones. (Casas et al, 2005)

El punto de partida es un error en la estimación de las llanuras de inundación del 80%, obtenido por Yan, 2015, sin embargo, en su análisis utiliza una información de radar con celdas de 80 metros, casi tres veces mayores de las que estamos utilizando. A pesar de ello, para determinados análisis, un valor del 80% podría considerarse admisible. Horritt (Horritt, 2006) obtiene un valor más preciso, del orden del 70%, pero utiliza una metodología distinta. Su análisis usando un modelo 1D-2D compara los resultados con varios tamaños de celda desde 10 a 1000 metros, obteniendo valores similares de precisión entre 10 y 100 metros, baja a 60% con 250 metros de tamaño de celda y disminuye en gran medida con tamaños mayores. La horquilla de tamaño de celda con resultados similares de determinación de la zona de inundación es muy amplia, destacar que no obtiene un valor mejor con celdas de 10 metros que con 100, y con unos requisitos computacionales mucho menores en este último caso.

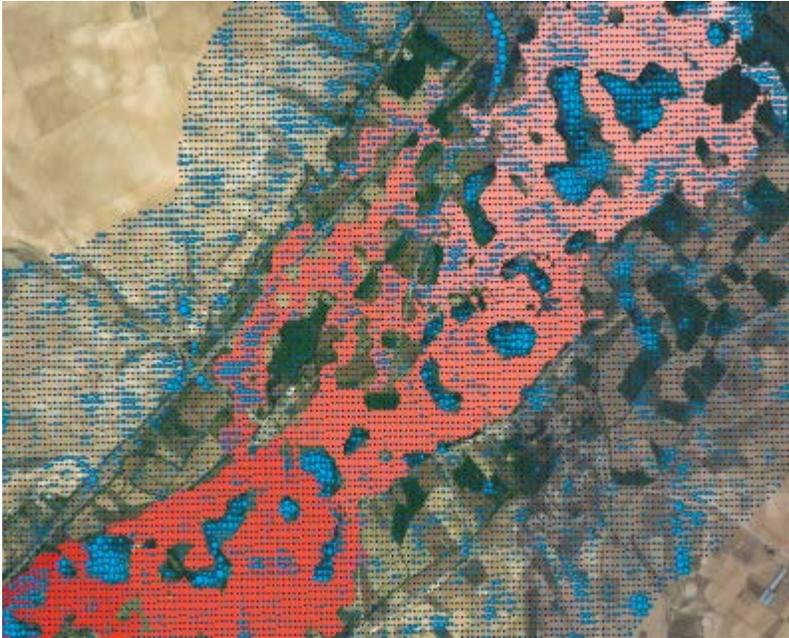


Simulación MDT05 sobre STRM



Simulación STRM sobre MDT05 incluyendo los puntos de diferencia

**Figura 14** | Comparación de simulaciones sobre la misma área



**Figura 15** | Modelización STRM junto a los puntos que indican las diferencias de alturas

Como se observa en la figura anterior, las diferencias en la determinación de las alturas marcan claramente las diferencias en el modelo hidráulico, las positivas (STRM más alto que MDT05) creando islas y las negativas abriendo nuevos caminos al flujo. Estas islas están formadas claramente por formaciones arbóreas y podrían ser eliminadas tras un análisis, que será uno de los futuros objetivos de la investigación, automatizar la detección de estos elementos que influyen en la modelización.

---

## DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Las simulaciones realizadas, como la que se muestra en la figura 15, muestran grandes similitudes entre el modelo STRM con 30 metros y el de 5 metros de tamaño de celda. Los resultados obtenidos muestran una más que razonable determinación de la llanura de inundación y unas indicaciones claras hacia dónde dirigir las mejoras del análisis.

Las transformaciones realizadas, con la modificación del sistema de coordenadas y la referencia altimétrica son necesarias para que las simulaciones sobre la información satelital se aproximen a los resultados obtenidos con cartografías de mayor precisión.

Los resultados obtenidos en esta fase permiten que un técnico con experiencia suficiente en hidráulica fluvial pueda asumir una simulación con garantías suficientes basándose en el MDT procedente del STRM cuando no dispongan de una cartografía de mayor precisión. El orden de magnitud del error en la determinación de la zona inundable es similar a las referencias bibliográficas pero con posibilidades claras para reducir este error.

---

## CONCLUSIONES

Una simulación realizada “a ciegas”, importando directamente la información desde su origen ASTER o STRM, obtiene unos resultados que se pueden considerar malos: celdas inundadas claramente situadas fuera de la zona del cauce, desplazamientos significativos del curso principal, etc. Sin embargo, el análisis cartográfico de la adquisición de la información, entendiendo y aprovechando las características propias de la forma de representar las celdas de cada uno de los sistemas de captura produce mejoras significativas, que se potencian si actuamos sobre los propios datos de partida transformándolos para que respondan mejor a las necesidades de la simulación.

Las simulaciones realizadas muestran que la utilización de la información satelital, y en particular el resultado de la misión STRM, es factible para la determinación de las zonas inundables en países o regiones donde no se pueda conseguir cartografía de mayor precisión.

---

## AGRADECIMIENTOS

Los datos de la Cuenca del Jalón utilizados como banco de pruebas para la simulación han sido proporcionados amablemente por la Confederación Hidrográfica del Ebro.

---

## REFERENCIAS

- Casas Planes, A.; Benito, G.; Thorndycraft, V. R.; Rico, M., 2005. Efectos de las fuentes cartográficas en los resultados de la modelación hidráulica de crecidas. *Ingeniería del Agua* 12(4), 309-320
- Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), 2013. *Plan Hidrológico del Ebro 2010 – 2015*. CHE
- INCLAM, 2007. *Estudio de zonas inundables y delimitación del Dominio Público Hidráulico del río Jalón aguas abajo de la confluencia del Piedra y del Jiloca aguas abajo de la confluencia del Pancrudo*
- Vicente González, José Luis; “Estudio de la red viaria romana de Hispania mediante tecnologías SIG: Las planimetrías de la 1ª edición del MTN 1/50.000 de España, una capa de información imprescindible para el investigador”, *V encuentro de Ibercarto*, Santander 4-5 Octubre 2012, 1-26
- Tetsushi Tachikawa, Masami Hato, Manabu Kaku, Akira Iwasaki, *CHARACTERISTICS OF ASTER GDEM VERSION 2*
- Yan, Kun; Neal, Jeffrey C; Solomontine, Dimitri P, 2015. Global and Low-Cost Topographic Data to Support Flood Studies, *Hydro-Meteorological Hazards, Risks, and Disasters*, Elsevier, 105-123
- Zink, Manfred & Moreira, Alberto, 2015. *TanDEM-X: A Challenging Radar Mission for Generating a New Earth's Topography*, Geomorphometry.org/2015
- Horritt, M.S., Bates, P.D. & Mattinson, M.J. 2006, Effects of mesh resolution and topographic representation in 2D finite volume models of shallow water fluvial flow. *Journal of Hydrology*, 329(1-2), 306-314.
- Rodriguez, E., C.S. Morris, J.E. Belz, E.C. Chapin, J.M. Martin, W. Daffer, S. Hensley, 2005, *An assessment of the SRTM topographic products*, Technical Report JPL D-31639, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California.