

MÁSTER EN  
TECNOLOGÍAS  
AVANZADAS PARA EL  
DESARROLLO  
AGROFORESTAL

# TRABAJO FIN DE MÁSTER

Empleo de datos LIDAR y GPS para la elaboración de  
cartografía en estudios de inundabilidad en cauces de pequeño  
caudal



---

**Universidad de Valladolid**

Laurentino Cejudo Lara



## EMPLEO DE DATOS LIDAR Y GPS PARA LA ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA EN ESTUDIOS DE INUNDABILIDAD EN CAUCES DE PEQUEÑO CAUDAL.

### RESUMEN

Las nuevas tecnologías en teledetección, han posibilitado un avance en la obtención de los Modelos Digitales del Terreno empleados en la elaboración de cartografía de estudios de inundabilidad. Es el caso de los sensores laser aerotransportados conocido con el nombre de LIDAR (*Light Detection and Ranging*). Este trabajo realiza un estudio de inundabilidad de un tramo de cuenca de pequeño caudal en el municipio de Madrigal del Monte (Burgos), utilizando un MDT obtenido de los datos LIDAR del Centro Nacional de Información Geográfica y su comparación con el realizado utilizando un MDT obtenido por levantamiento topográfico mediante GPS. Se encontraron dificultades en la toma de datos GPS debido a la mala cobertura y los fallos del equipo por lo que el número de datos GPS resultó escaso, pero se ha podido constatar la necesidad de una adecuada familiarización de los procedimientos y algoritmos de cálculo del software empleado y se apuntan las ventajas e inconvenientes del uso de uno u otro modelo. Del estudio hidráulico realizado con HEC-RAS, las mayores diferencias las encontramos en el cauce principal, donde la vegetación es muy abundante. Es necesario completar el trabajo ampliando la zona de estudio con la nueva toma de datos GPS que permita comprobar ambos modelos y discernir un método rápido que simplifique de manera coherente el proceso.

**Palabras clave:** Teledetección, LIDAR, Modelo Digital del Terreno, estudios inundabilidad.

### 1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La Directiva Europea 2007/60/CE sobre evaluación y gestión de riesgos de inundación [1] plantea la necesidad de detectar las zonas especialmente expuestas a riesgo de inundación sobre las que realizar estudios de peligrosidad y riesgo. Por tal motivo, el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente dispone del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI) al cual se puede acceder mediante el visor cartográfico de zonas inundables [2], enmarcado en el Real Decreto 903/2010 de evaluación y gestión de los riesgos de inundación [3] y en el Real Decreto 849/1986 por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico [4].

Actualmente El Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, está desarrollando numerosos estudios de delimitación del dominio público hidráulico y zonas inundables en los cauces de gran caudal en todas las Demarcaciones Hidrográficas de España, aunque como puede verse en el visor [2], existen gran cantidad de cauces pendientes de estudio, principalmente de pequeño caudal.

Para desarrollar los trabajos de generación de cartografía de Dominio Público Hidráulico y de zonas inundables se han publicado diferentes guías metodológicas que definen los requisitos



y procedimientos más adecuados para abarcar los diferentes aspectos de los trabajos a realizar [5], documentos de análisis de la información disponible de carácter general para la evaluación preliminar de riesgo de inundación como el de la Confederación Hidrográfica del Duero [6], así como memorias para la obtención de mapas de peligrosidad y riesgo de inundación en distintas demarcaciones hidrográficas [7].

La información de partida para los estudios del SNCZI necesita disponer de cartografía lo más actualizada posible y de calidad suficiente para que los resultados del estudio sean lo más realistas. A la hora de realizar el estudio hidrológico de la cuenca para calcular el área vertiente y otros parámetros hidrológicos, suele ser necesario disponer de un modelo digital del terreno (MDT) de la zona con una precisión suficiente para dichos cálculos, pero para la realización de estudios hidráulicos es necesario disponer de una cartografía de mayor precisión, por lo que una mala elección de la cartografía puede suponer errores en la modelización hidráulica. La guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables [5], recomienda utilizar un MDT generado mediante tecnología LIDAR (*Light Detection and Ranging*). Los productos finales derivados del LIDAR, son el Modelo Digital del Terreno (MDT), el Modelo Digital de Superficie (MDS) y el Modelo Digital de Elevaciones (MDE), esta distinción entre términos se encuentra bastante extendida en los usuarios de datos LIDAR, y responde a las diferentes altimetrías que representan uno y otro [8].

Dada la alta resolución de los datos LIDAR, estos se han utilizado en trabajos que los comparan con modelos digitales del terreno obtenidos a partir de otras fuentes y su idoneidad en la aplicación para en estudios de inundabilidad, así por ejemplo García, E. et al [9] consideran la cartografía LIDAR una solución válida e imprescindible, al ofrecer resultados más precisos que los obtenidos de las representaciones cartográficas tradicionales, Espejo, F. [10] en su trabajo fin de máster, estudia las diferentes cartografías obtenidas de vuelos LIDAR y de vuelos fotogramétricos y con diferentes resoluciones, para el análisis hidráulico en la rotura de balsas, donde justifica la adopción de cartografías base LIDAR de alta resolución para la implementación de los modelos de simulación hidráulica, Odón, O. [11] compara modelos digitales del terreno a partir de cartografías obtenidas del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) y datos LIDAR para estudios hidrológicos, concluye que la utilización de los datos MDT del PNOA es perfectamente válida y no se justifica la ejecución de un LIDAR, puesto que el MDT LIDAR no aporta ninguna mejora sustancial, salvo que fuera de una precisión de 5 cm., Ferrer-Julilà, M. et al. [12] realiza cartografía morfológica de zonas inundables a partir del análisis de datos LIDAR y la comparan con los datos obtenidos a partir de fotografías aéreas y ortofotomapas, donde los MDT a partir de datos LIDAR resultan ser idóneos, aunque considera que es necesario investigar y mejorar los algoritmos de filtrado de los datos LIDAR, dado que presentan problemas en las llanuras de inundación debido al ruido de la vegetación.

Diversos estudios avalan el empleo de datos LIDAR tanto en España como en otros países, Magdaleno, F. et al. [13] Aplicaciones de la teledetección láser en la caracterización y gestión del medio fluvial, concluye con las ventajas del empleo de la tecnología LIDAR como la alta precisión y densidad de los datos y su toma en áreas inaccesibles, aunque también



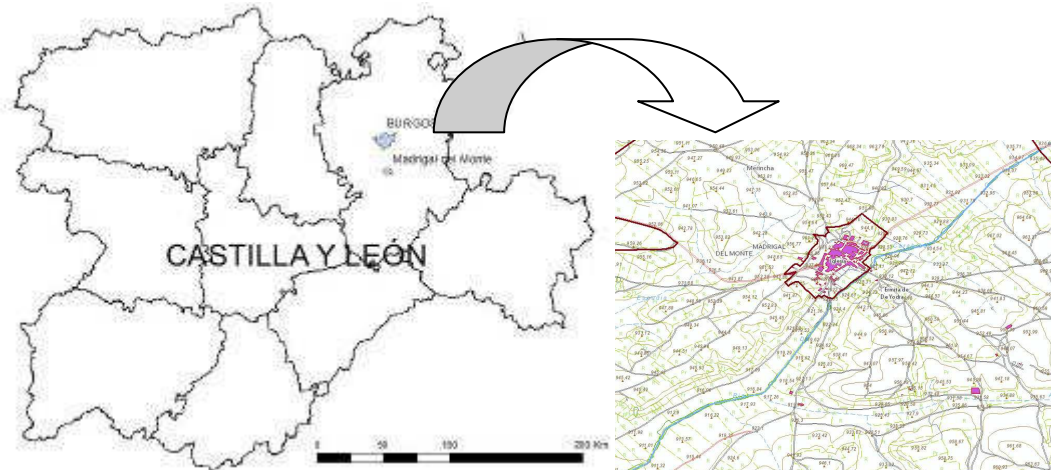
encuentra alguna desventaja como el no poder delinear con precisión los límites de los cursos de agua o la dificultad para cartografiar superficies cubiertas por vegetación muy densa, Gómez, A. [14] Sistema LIDAR para la confección de DTMs en reemplazo de fotogrametría convencional, donde se realiza una breve descripción del sistema LIDAR como herramienta para obtener un Modelo Digital del Terreno, y presenta el sistema como una opción precisa, rápida y económica en el sector de la topografía/cartografía, Aaron Cook et al. [15] *Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping*, donde se demuestra que las áreas de inundación de los cauces estudiados presentan resultados más preciso al emplear mapas de mayor resolución obtenidos con LIDAR, G.R. Aggett et al. [16] *Creating and coupling a high-resolution DTM with a 1-D hydraulic model in a GIS for scenario-based assessment of avulsion hazard in a gravel-bed river*, donde utilizan datos LIDAR como principal fuente de información cartográfica que en su validación ofreció un error medio cuadrático notablemente bajo, o Christopher C. et al. [17] *Use of terrestrial laser scanning data to drive decimetric resolution urban inundation models*, sugiere que el uso de los datos de escaneo láser terrestre en lugar de, o en combinación con datos LIDAR aerotransportado influyen significativamente en el estudio de inundaciones.

Pero todos ellos están encaminados al empleo de los datos en grandes extensiones, y no son comparados con cartografía más precisa, obtenida con métodos topográficos GPS (Global Positioning System) de precisión centimétrica.

El objetivo de este Trabajo Fin de Máster pretende mostrar las diferencias que existen en los resultados, cuando se utilizan diferentes Modelos Digitales del Terreno obtenidos de datos procedentes de sensores LIDAR y técnicas GPS para el estudio de inundabilidad de una cuenca inferior a 50 Km<sup>2</sup>. En concreto de la cuenca del río Cubillo a su paso por el término Municipal de Madrigal del Monte, provincia de Burgos.

## 2.- ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio del presente trabajo es la cuenca del río Cubillo, Carabidas o de las Canteras a su paso por el Municipio de Madrigal del Monte en un tramo de unos 6 Km. y una superficie de cuenca de 46 km<sup>2</sup>, localizada en la zona Nordeste de la cuenca del río Duero, provincia de Burgos, (Figura 1). Dada la dificultad encontrada a la hora de la toma de datos GPS, al producirse una avería en el receptor, por otra parte la desazón que produjo la imposibilidad de obtener posicionamiento preciso por falta de cobertura de telefonía móvil con otro receptor, y dada la cercanía en las fechas de presentación del trabajo, se centró el estudio en los 1500 metros anteriores al núcleo urbano de Madrigal del Monte de los cuales se pudo obtener datos.



**Figura 1 Localización del municipio de Madrigal del Monte (Burgos) y zona de estudio.**

Fuente: Elaboración propia a partir de información de la Infraestructura de Datos Espaciales de Castilla y León (IDECYL)

### 3.- MATERIAL Y MÉTODOS

#### 3.1.- Datos LIDAR del Instituto Geográfico Nacional

Los datos LIDAR utilizados se obtuvieron del centro de descargas de CNIG (<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do#selectedSerie>), la zona de estudio queda incluida dentro de los siguientes archivos de datos:

PNOA\_2010\_Lote5\_CYL-RIO\_442-4666\_ORT-CLA-COL.LAZ

PNOA\_2010\_Lote5\_CYL-RIO\_444-4666\_ORT-CLA-COL.LAZ

PNOA\_2010\_Lote5\_CYL-RIO\_444-4668\_ORT-CLA-COL.LAZ

PNOA\_2010\_Lote5\_CYL-RIO\_446-4668\_ORT-CLA-COL.LAZ

PNOA\_2010\_Lote5\_CYL-RIO\_446-4670\_ORT-CLA-COL.LAZ

PNOA\_2010\_Lote5\_CYL-RIO\_448-4670\_ORT-CLA-COL.LAZ

Se trata de ficheros digitales con información altimétrica de la nube de puntos LIDAR, distribuidos en ficheros de 2x2 km de extensión. El formato de descarga es un archivo LAZ (formato de compresión de ficheros LAS, mediante la herramienta de descompresión LASTask Tools Visualizador [18] podemos visualizar de ficheros LAZ y LAS). Las nubes de puntos han sido capturadas mediante vuelos con sensor LIDAR con una densidad de 0,5 puntos/m<sup>2</sup>, y posteriormente clasificadas de manera automática y coloreadas mediante RGB obtenido a partir de ortofotos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) con tamaño de pixel de 25 o 50cm. El sistema geodésico de referencia utilizado es el ETRS89 y proyección UTM en el huso correspondiente a cada fichero. Las alturas de cada punto son ortométricas.



El formato de archivo LAS es un formato de archivo público para el intercambio de datos procedentes de nubes de puntos tridimensionales entre los usuarios de datos. Aunque fue desarrollado principalmente para el intercambio de datos de nubes de puntos LIDAR, permite el intercambio de cualquier conjunto de elementos con coordenadas en 3 dimensiones x, y, z. Este formato de archivo binario es una alternativa a los sistemas de propiedad o a los sistemas de intercambio de archivos ASCII genéricos utilizados por muchas empresas. El formato LAS mantiene la información específica a la naturaleza de los datos LIDAR sin ser demasiado complejo.

Fue creado por la ASPRS (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, Sociedad Estadounidense de Fotogrametría y Teledetección). Es un estándar de facto y como tal el software comercial dedicado a manejo de datos LIDAR puede leer dicho formato.

Existe software gratuito que lee LAS, como por ejemplo Fugroviewer (<http://www.fugroviewer.com/>), así como algunos SIG gratuitos (gvSIG y QGIS, entre otros) pero con la ayuda de un software complementario.

La especificación usada en los archivos LAS del IGN/CNIG es la 1.3. (<http://www.asprs.org/Committee-General/LASer-LAS-File-Format-Exchange-Activities.html>)

El formato LAZ es un tipo de archivo binario obtenido de la compresión de los ficheros LAS mediante una librería de compresión desarrollada por Martin Isenburg para su herramienta LASzip. El uso del formato y de la herramienta LASTask Tools Visualizador, que pone a disposición de los usuarios el IGN y el CNIG, es libre, sin embargo la utilización de LASzip está sometida a ciertas restricciones.

Otro software gratuito es FugroViewer, se puede descargar desde el enlace <http://www.fugroviewer.com/request/default.asp> y permite abrir y observar directamente los datos LIDAR desde el formato \*.laz.

### 3.2.- Datos topográficos tomados con GPS.

El levantamiento topográfico se realizó mediante el sistema GPS utilizando el método cinemático en tiempo real RTK (*Real Time Kinematic*). Para este levantamiento se utilizaron 2 receptores con equipo de radio-modem, un trípode rígido, un bastón y un flexómetro.

Al producirse la avería de la unidad de control, se intentó con un solo receptor y correcciones en tiempo real obtenidas de la Red GNSS de Castilla y León que proporciona correcciones de código y fase para los sistemas de navegación GPS y GLONASS en tiempo real RTK a través de un caster NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*). Es un servidor de Internet que, por una parte, gestiona los flujos de datos provenientes de las estaciones de referencia, y por la otra chequea los mensajes recibidos por los clientes NTRIP, controlando si los usuarios están autorizados, en cuyo caso, transfieren los flujos de datos



RTCM. Pero dada la falta de cobertura telefónica se tuvo que abandonar también este sistema, obteniendo finalmente un total de unos 250 puntos que permitieron modelizar 1500 metros del cauce.

### 3.3.- Otras fuentes de datos.

- Modelo digital del terreno con paso de malla de 5 m.

Para la delimitación de cuenca de estudio se utilizó el modelo digital del terreno MDT05, obtenido del CNIG compuesto por los siguientes ficheros:

MDT05-0238-H30-LIDAR.asc

MDT05-0276-H30-LIDAR.asc

Se trata de un modelo digital del terreno con una matriz regular de cotas con puntos cada 5 metros, representado en ETRS89 y proyección cartográfica UTM en el huso correspondiente. El origen del MDT05 es una interpolación (convolución cúbica) a partir de la clase terreno de la nube de puntos LIDAR (densidad 0.5 puntos/m<sup>2</sup>) del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea.

- Ortofotos PNOA máxima actualidad.

Las ortofotos más recientes disponibles del PNOA, con sistema geodésico de referencia ETRS89 y proyección UTM en su huso correspondiente.

- Ortofotos Históricas del PNOA.

Mosaicos de ortofotos del PNOA, desde el año 2004, con sistema geodésico de referencia ETRS89 y proyección UTM en su huso correspondiente.

- Ortofotos del vuelo americano de 1956.

Servicio WMS correspondiente a la Ortofotografía a partir de Vuelo Fotogramétrico nacional BN a escala 1:33.000 de 1956-57, realizado mediante colaboración del Ejército del Aire de España y la Fuerza Aérea de EEUU, conocido coloquialmente como vuelo americano del 56.

- Cartografía topográfica de Castilla y León a escala 1/5000.

## Cartografía topográfica básica del territorio de Castilla y León a escala 1:5.000. Infraestructura de Datos Espaciales de Castilla y León (IDECYL)

Asimismo, se ha realizado un exhausto trabajo de campo en el que se han contrastado los resultados obtenidos mediante el resto de fuentes de datos y se ha recopilado una base de datos sobre infraestructuras transversales y longitudinales en el propio cauce, como son los puentes (Figura 2 y Figura 3).



Figura 2. Foto del puente existente (aguas abajo)

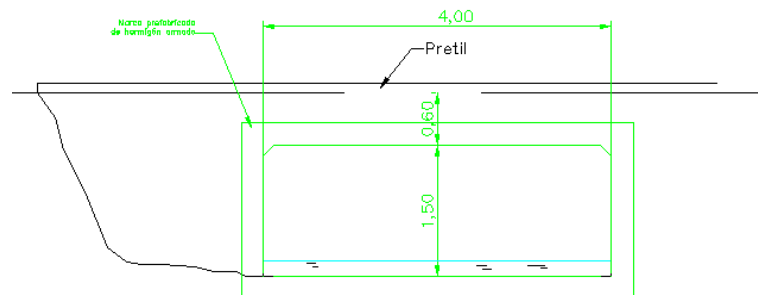


Figura 3. Croquis acotado de la sección del puente

### 3.4.- Métodos

El estudio se realizó en las siguientes etapas:

- A) Obtención de dos Modelos Digitales del Terreno (MDT).
- B) Delimitación de la cuenca receptora con la ayuda de herramientas GIS [19].





- C) Estudio hidrológico de la cuenca y determinación de los caudales para distintos periodos de retorno.
  
- D) Estudio hidráulico con modelo unidimensional en régimen permanente, mediante HEC-RAS (USACE) [20] así como de la herramienta de pre-proceso y post-proceso HEC-GeoRAS (USACE) [21] para ArcGIS (ESRI) [19].

#### 3.4.1.- Obtención de dos Modelos Digitales del Terreno (MDT).

- MDT a partir de datos LIDAR:

En primer lugar se procedió a la localización y descarga de los archivos correspondientes de la zona de estudio en la página web del Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG): <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/inicio.do>

Los archivos descargados en formato LAZ se descomprimieron mediante el programa LASTask Tools facilitado por IGN.

Inicialmente se realizó un filtrado mediante la aplicación groundfilter.exe de FUSION [22], que aplica el filtro de Kraus and Pfeifer con tamaño de celda 2.

Posteriormente se generó el MDT con la aplicación GridSurfaceCreate.exe de FUSION y se comprobó los resultados obtenidos cargando el MDT creado con la opción BareEarth de FUSION y visualizándolo en 3D añadiendo la superficie creada con la opción Botón derecho Surfaces.

Se pudo apreciar la gran pérdida de puntos LIDAR, lo que generó una gran indefinición del lecho del cauce, produciéndose numerosos cortes en el camino del agua (Figura 4).

Por dicho motivo se abandonó este procedimiento ante la necesidad de introducir líneas de rotura y una depuración más precisa de los puntos, optándose por utilizar el programa TerraScan (Terrasolid) [23] aplicación MDL de Microstation [24].



Figura 4. MDT generado con FUSION

Mediante TerraScan se realizó un correcto filtrado de los datos para eliminar los puntos correspondientes a elementos distintos al terreno como vegetación, puentes, etc. y posteriormente obtener el MDT con el programa TerraModeler (Terrasolid) [25].

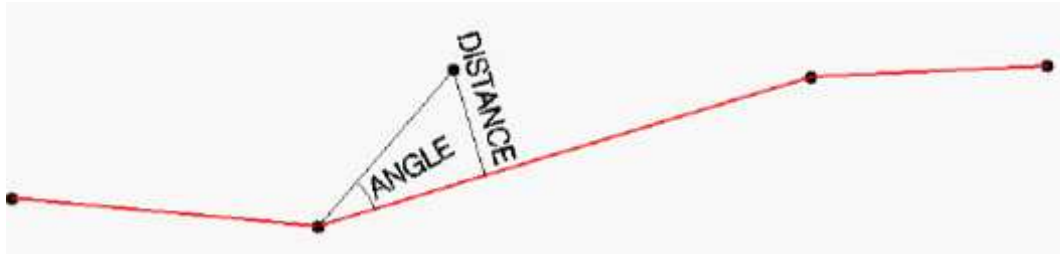


Figura 5. Umbrales de clasificación de suelo mediante la rutina Ground en TerraScan.

Mediante la rutina Ground se clasifican los puntos de tierra por medio de la construcción iterativa de un modelo de superficie triangulada.

La rutina construye un modelo inicial con los puntos bajos seleccionados. Los triángulos de este modelo inicial estarán en su mayoría por debajo de la tierra con sólo los vértices en el suelo. La rutina comienza entonces moldear el modelo hacia arriba agregando iterativamente nuevos puntos láser a ella. Cada punto añadido hace que el modelo se sitúe más cerca del suelo.

El ángulo de iteración es el ángulo máximo entre un punto, su proyección en el plano del triángulo y el vértice del triángulo más cercano. Con el parámetro de distancia se asegura de que la iteración no hace grandes saltos hacia arriba cuando los triángulos son grandes.

Cuanto menor sea el ángulo de iteración, menos se producen los cambios en la nube de puntos (pequeñas ondulaciones en el terreno o señales en vegetación baja). Se usa un pequeño ángulo (cerca de 4,0) en terreno plano y un ángulo más grande (cerca de 10,0) en terreno montañoso. (Figura 5). No obstante, una vez aplicado el filtro, se procedió a la supervisión manual de los puntos con la ayuda de la herramienta “*Draw Vertical Section*”, y realizando numerosos perfiles transversales al terreno, se fueron clasificando manualmente los puntos mal clasificados (Figura 6).

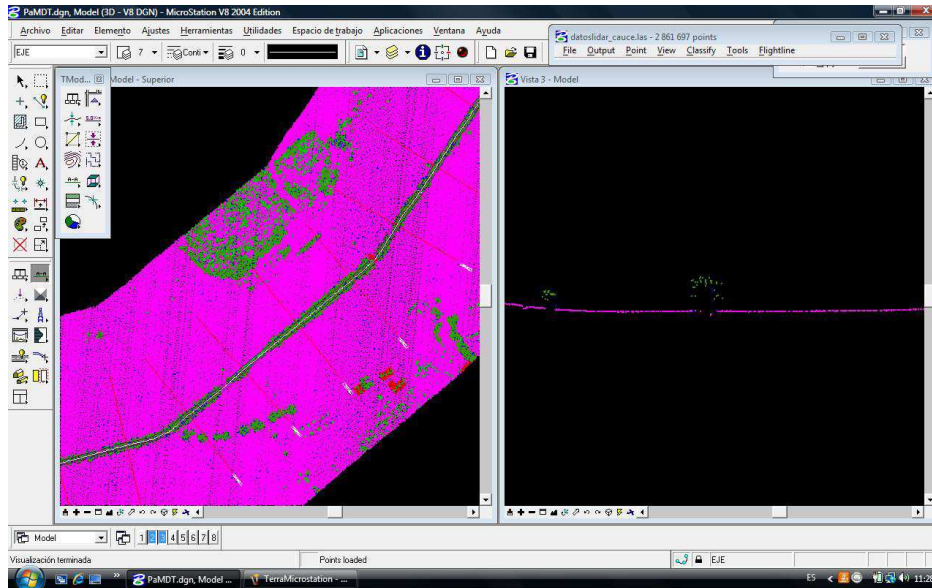
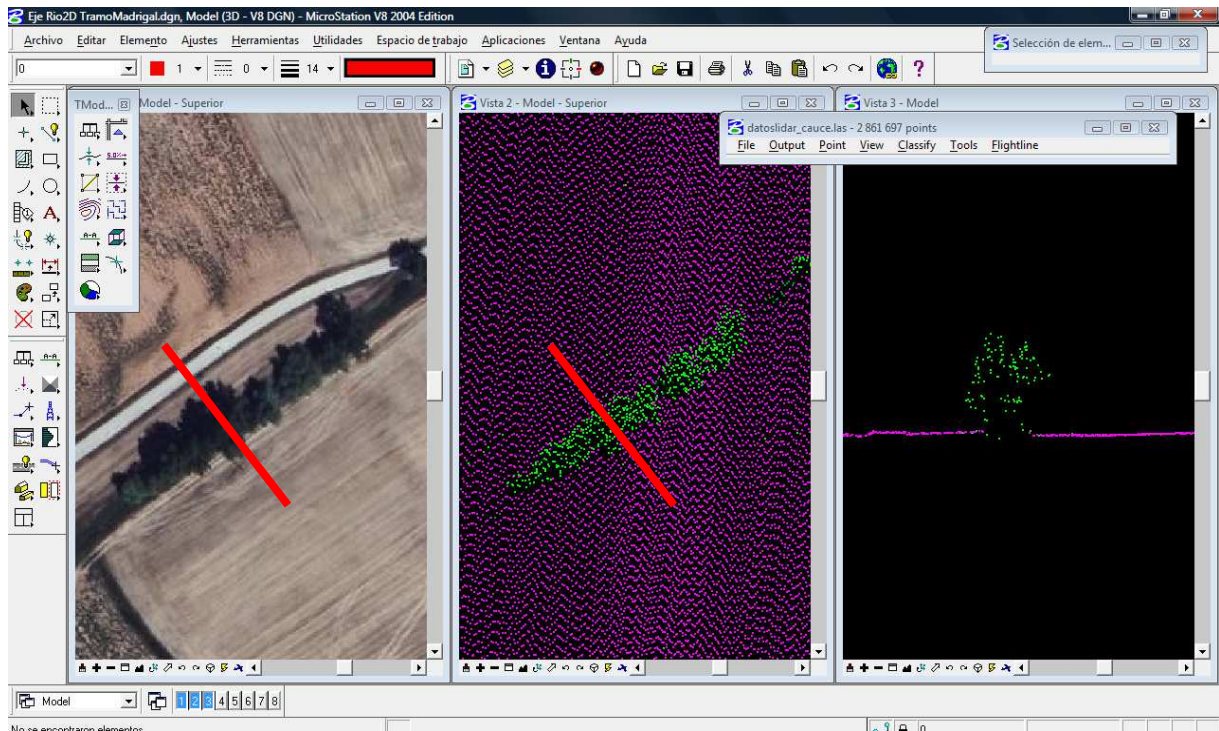


Figura 6. Clasificación manual de puntos en TerraScan.

En ocasiones, debido a la presencia de vegetación muy densa en el cauce del río y dado que el sistema LIDAR no la puede atravesar (ver Figura 7 y Figura 8), el modelo digital del terreno generado con tecnología LIDAR presenta algunos errores que cortan el camino del agua y dan problemas a la hora de realizar un estudio hidráulico.



Figura 7. Foto de vegetación en cauce.



**Figura 8. Situación de un perfil del cauce sobre ortofoto, sobre nube de puntos LIDAR y perfil seleccionado.**

Esto es un inconveniente generalizado, independientemente del software de procesado que se utilice, se solucionó, ayudado de las ortofotos disponibles, las correspondientes líneas de rotura que delimitan los taludes del cauce del río, interpolando las zonas indefinidas y realizando una triangulación adecuada (Ver Figura 10). Se procedió al dibujo manual de las líneas que aparentemente definen los taludes del cauce en 2D y posteriormente se situaron sobre el terreno mediante la herramienta de Terramodel "Drop Element On Surface", además a las líneas inferiores del talud que conforma el cauce se les aplicó la herramienta *Force Downstream Flow*, que fuerza a la línea a llevar siempre una pendiente descendente, de esta forma se consiguió que las líneas de rotura se situaran siempre en las parte inferior del cauce y no sobre las zonas superiores creadas por los errores de corte del camino del agua.

Para la realización de la modelización hidráulica correspondiente a la situación actual de la llanura de inundación, es decir, con una geometría del terreno alterada por las posibles modificaciones antrópicas existentes, se utilizará el MDTreal que consistirá en el modelo digital de superficies en el que se habrán eliminado los elementos correspondientes a la vegetación, se han corregido las profundidades de cauce, se han eliminado los puentes y se han incluido (y revisado) aquellos elementos antrópicos de larga duración, tales como edificios, motas, terraplenes, etc. lo cual se realizó manualmente con el programa TerraModeler.

El pulso del LIDAR, al rebotar sobre el tablero de los puentes, da como resultado que la cota del MDS en el punto sea la cota superior del tablero del puente, no la del cauce, por lo que será necesario restituir las cotas del cauce para que las modelizaciones posteriores sean correctas. El proceso necesario para la eliminación de los puentes es el siguiente:

1. Identificación de las zonas que son candidatas a ser clasificados como puentes o pasos elevados.
2. Comprobación de si realmente se trata de un puente paso elevado o, de lo contrario, se trata de un falso positivo.
3. En el caso de tratarse de un puente, retoque manual de la parte del mismo que se quiere eliminar.
4. Eliminación de las alturas de los puntos del MDS correspondientes a la zona que se haya seleccionado como puente. Si se interpolan directamente los puntos que se han borrado, habrá problemas con la calidad del MDT obtenido porque también se expandirán las alturas de la parte alta del puente hacia la zona eliminada. Para evitar este problema, será necesario definir líneas de rotura por medio de puntos que representen geoméricamente la estructura. Estos puntos se seleccionan de forma visual, con la seguridad de que pertenecen al punto más bajo del puente. Posteriormente, sobre el MDS al que se le han eliminado los puntos del puente, se dibujaron las líneas de rotura.

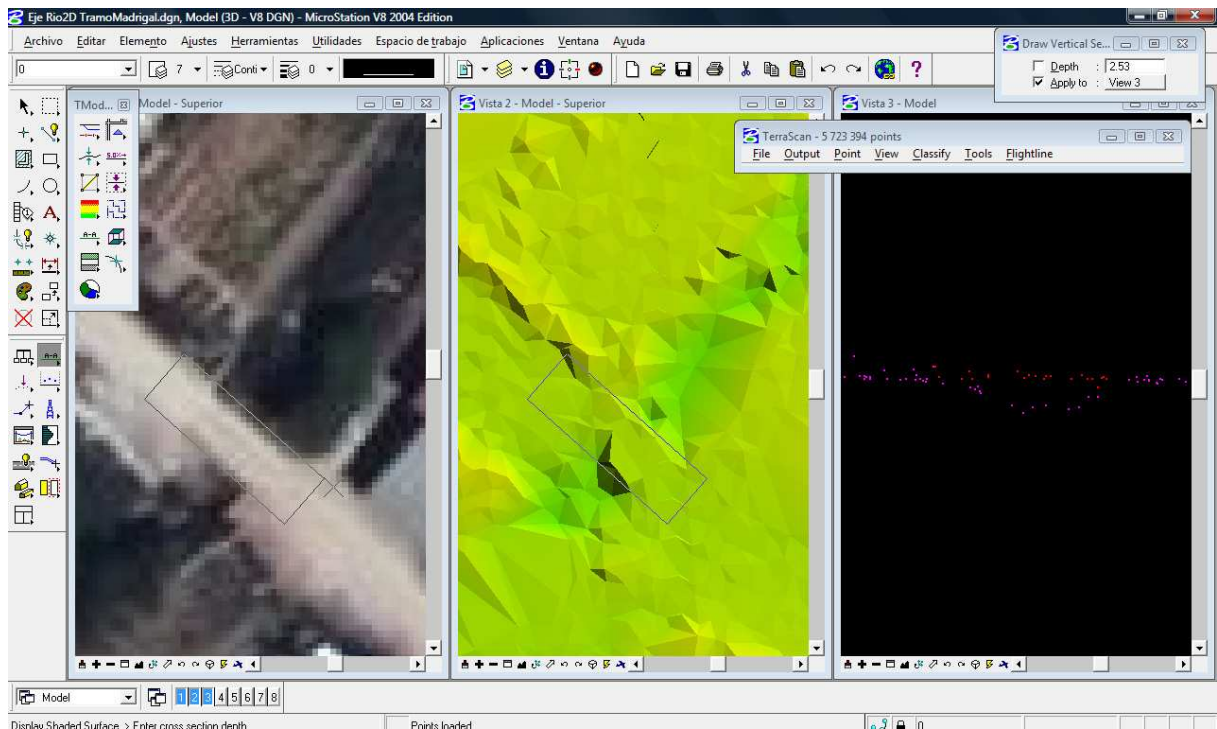


Figura 9. Localización de puente sobre ortofoto, modelo digital del terreno con puente y sección.

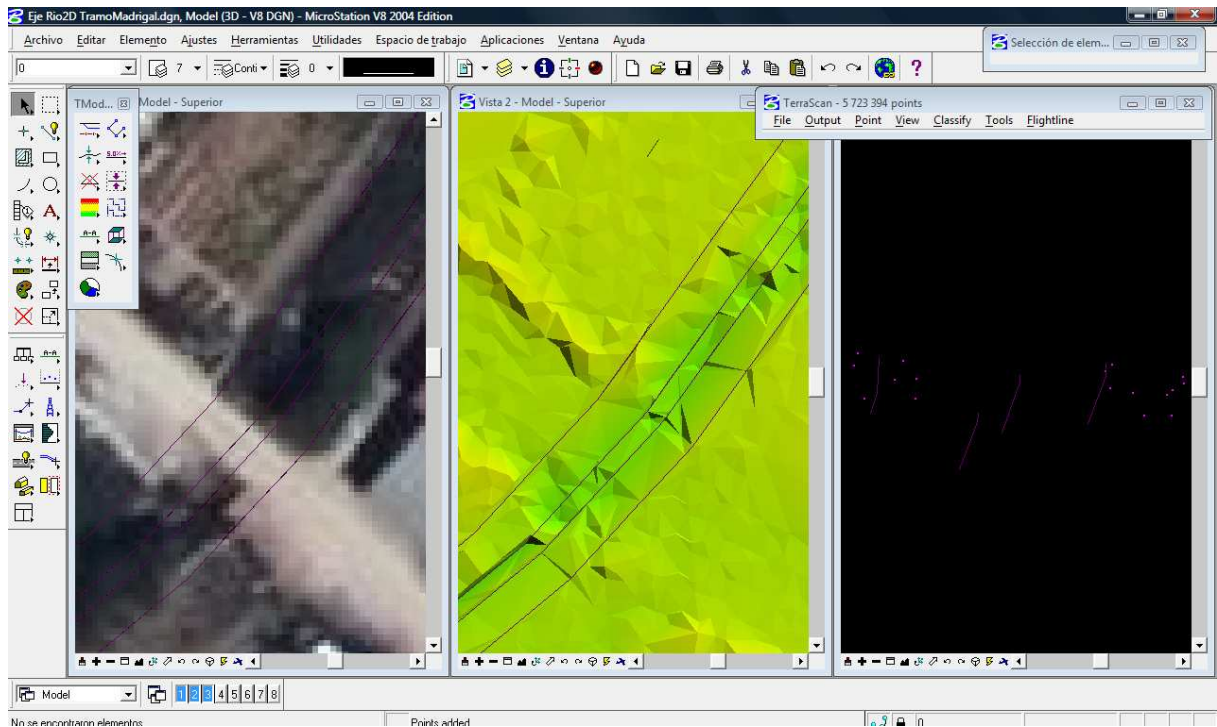


Figura 10. Ortofoto, modelo digital del terreno sin puente y con líneas de rotura, vista 3D de la sección.

A partir del MDT obtenido y de las ortofotografías, se dibuja el eje del cauce y con la herramienta *Draw Alignment Sections* de Terrasolid se obtuvieron perfiles transversales cada 100 metros y de 50 metros de ancho a cada lado del cauce, se comprobó visualmente que no existían errores y se exportaron para su incorporación a la medelización con HEC-RAS.

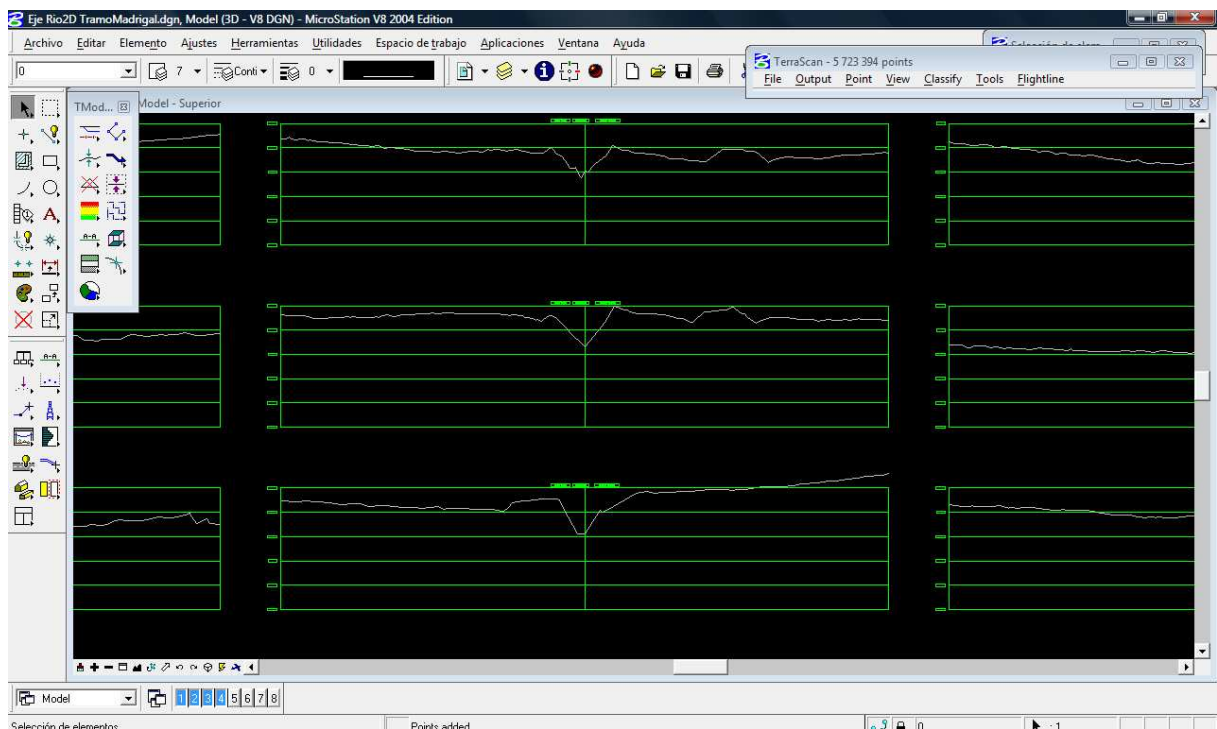


Figura 11. Ejemplo de perfiles transversales LIDAR.

Por otra parte, se generó cartografía con las curvas de nivel del modelo del terreno para su incorporación en ArcGis y Hec-GeoRAS (Figura 12).



**Figura 12. Curvas de nivel del MDT obtenido a partir de los datos LIDAR del cauce.**

- MDT a partir de datos GPS:

Para la obtención del levantamiento de detalle, la metodología de observación con GPS en tiempo real, es un método rápido, cómodo y capaz de dar la precisión requerida para el trabajo. El método de trabajo con GPS en tiempo real se compone de un GPS fijo de referencia y un GPS en movimiento. El receptor fijo lo situamos sobre un punto de la red básica, de coordenadas conocidas en el sistema de referencia local. Este vértice se denomina como vértice de referencia.

La metodología en tiempo real se basa en el cálculo de ambigüedades en el mismo instante de la toma de datos. Tras poner en funcionamiento el receptor de referencia se ha de esperar a que éste resuelva las ambigüedades antes de proceder a la obtención de datos de los puntos del levantamiento. Si el número de satélites sobre el horizonte y su geometría es válido, el receptor de referencia fija ambigüedades en pocos minutos. Una vez realizada esta operación el cálculo de coordenadas de los demás puntos será instantáneo. La comunicación entre el receptor de referencia y los receptores móviles, es posible gracias al sistema de telecomunicaciones utilizado para la transmisión, con un alcance de 5 Km entre ambos receptores. Para evitar problemas de comunicación entre receptores puede elevarse la antena del receptor de referencia lo máximo posible.

Se estacionó el equipo de referencia (fijo), el receptor envía las correcciones (RTCM-RTIME-RTCA) al equipo móvil a través de un sistema de telecomunicación operativo entre ambos receptores. Las coordenadas de los puntos, se obtienen en el sistema de referencia ETRS89 [26]. La metodología RTK permite asociar una proyección y un sistema de referencia distinto, podemos obtener las coordenadas de los puntos directamente en la proyección UTM. También podrían obtenerse en cualquier otro sistema de referencia local con respecto al cual se haya realizado la georreferenciación. Las precisiones obtenidas en las coordenadas del levantamiento dependerán de varios factores (precisión de las coordenadas de la red, precisión de los equipos utilizados, errores accidentales cometidos, etc.). De esta forma, la precisión de los puntos del levantamiento puede llegar a ser del orden de 1-2 cm. El levantamiento se lleva a cabo por dos receptores, uno de referencia y otro móvil. Se realiza la toma de puntos con el receptor móvil, mientras que se va realizando los croquis de la zona, así como anotando el número de punto y su correspondiente descripción, quedando así definido cualquier tipo de elemento a representar.

En los croquis se definen los accidentes del terreno como por ejemplo los taludes, para obtener un buen resultado en la realización MDT en gabinete. El levantamiento del cauce se efectuó mediante perfiles transversales donde la vegetación permitía la toma de datos GPS.

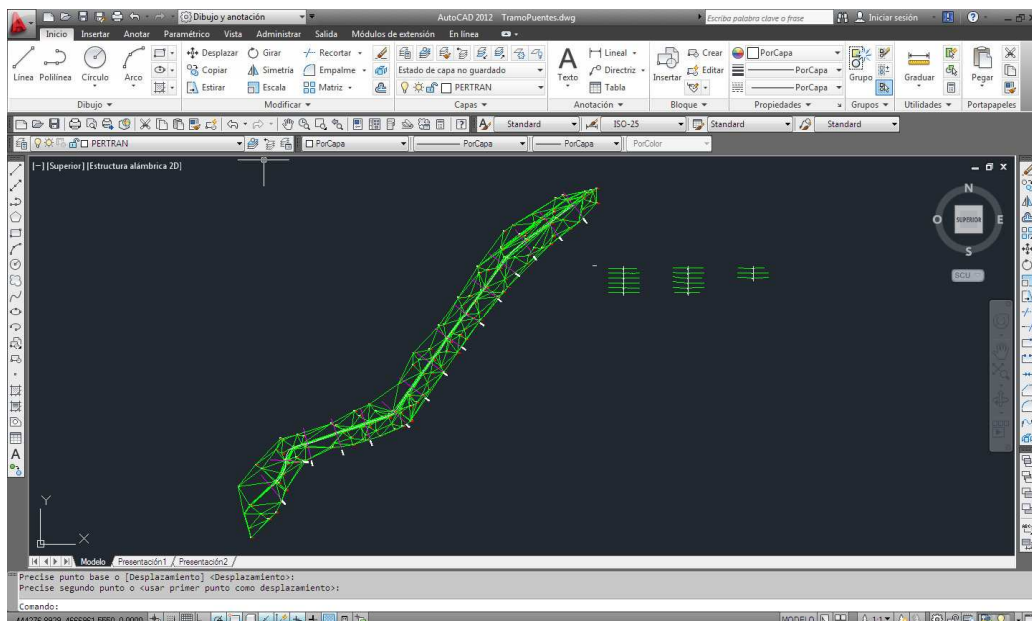


Figura 13. Nube de puntos del cauce obtenidos con GPS, triangulación y perfiles transversales.

Para obtener las cotas del terreno necesarias para realizar posteriormente el MDT de la zona, se toman una serie de puntos de relleno, dando una mayor densidad de puntos en las zonas donde la topografía del terreno es más variable. Al final de cada día los puntos observados en campo se importan al ordenador (Figura 13), observando la nube de puntos para asegurar el haber cubierto toda la zona a levantar y evitando que queden zonas sin el número de puntos adecuado para una buena edición posterior.



La captura de datos es el primer paso en el proceso de producción del MDT. Una vez listados todos los puntos tomados en campo, se exportan a formato ASCII, desde el programa de cálculo GPS. Con el fichero ASCII, se importan los datos al programa de cálculo topográfico, y desde él a formato DXF, para comenzar a trabajar desde el programa Microstation, en formato DGN, o DWG en AutoCAD [27]. De esta manera se obtiene la nube de puntos en un fichero de diseño 3D, con el cual poder realizar las operaciones necesarias para la obtención del MDT (Figura 14) y obtener los perfiles transversales cada 100 metros coincidiendo en posición con los obtenidos en el modelo LIDAR.



Figura 14. Curvas de nivel obtenidas de datos GPS.

#### 3.4.2.- Delimitación de la cuenca receptora con la ayuda de herramientas GIS

Para delimitar una cuenca hidrográfica se procederá a determinar el punto de desagüe de la cuenca e ir dibujando el perímetro de acuerdo a la línea divisoria de aguas (previamente cargado un MDT), para ello emplearemos el programa ArcGIS [19].

En este proceso se empleó el Modelo digital del terreno con paso de malla de 5 m, con la misma distribución de hojas que el MTN50. Formato de archivo ASCII matriz ESRI (asc). Sistema geodésico de referencia ETRS89 y proyección UTM en el huso correspondiente a cada hoja, obtenido del centro de descargas del IGN.

Una vez que se ha cargado el MDT, desde al ArcToolbox se utilizarán las siguientes herramientas siguiendo la siguiente secuencia:

Eliminar imperfecciones (huecos y sumideros) del ráster con la herramienta Fill.

*ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Fill*



Establecer la dirección del flujo hidrológico de la pendiente con la herramienta Flow Direction.

*ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Direction*

Determinar la acumulación del flujo de las celdas que fluyen hacia cada celda descendiendo sobre la pendiente por medio de la herramienta Flow Accumulation.

*ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Accumulation*

Construir automáticamente la red hídrica por medio de un condicional (esto depende del tamaño del ráster) en "Expression" usaremos la expresión  $\text{value} > 400$ , este valor depende del tamaño del pixel y del ráster, mientras más grande sea la microcuenca se debe usar un valor mayor, otra opción es usar Raster Calculator con la herramienta "Con", es decir el condicional permite clasificar las celdas con acumulación de flujo superior a un umbral especificado por el usuario, por ejemplo al ingresar un valor bajo como resultado mostrará afluentes pequeños de la red de drenaje, pero mientras más alto sea el valor se obtendrá la red de drenaje de mayor tamaño.

*ArcToolbox > Spatial Analyst > Conditional > Con*

Como siguiente paso generar un vector entre el resultado de los rásters de la acumulación de flujo y el condicional con, con ayuda de la herramienta Stream to Feature.

*ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Stream to Feature*

El siguiente paso determinaremos el punto de desagüe de la microcuenca, esto se puede hacer creando un shapefile tipo punto, luego interpolarlo con un modelo de elevación digital (TIN o DEM) para obtener sus coordenadas en tres dimensiones.

*ArcToolbox > 3D Analyst Tools > Functional Surface > Interpolate Shape*

Para culminar con la herramienta Watershed usando el ráster creado con Flow Direction y el punto de desagüe.

*ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Watershed*

Finalmente para obtener el polígono de la microcuenca convertimos el ráster a shapefile tipo polígono (Figura 15).

*ArcToolbox > Conversion Tools > From Raster > Raster to Polygon*

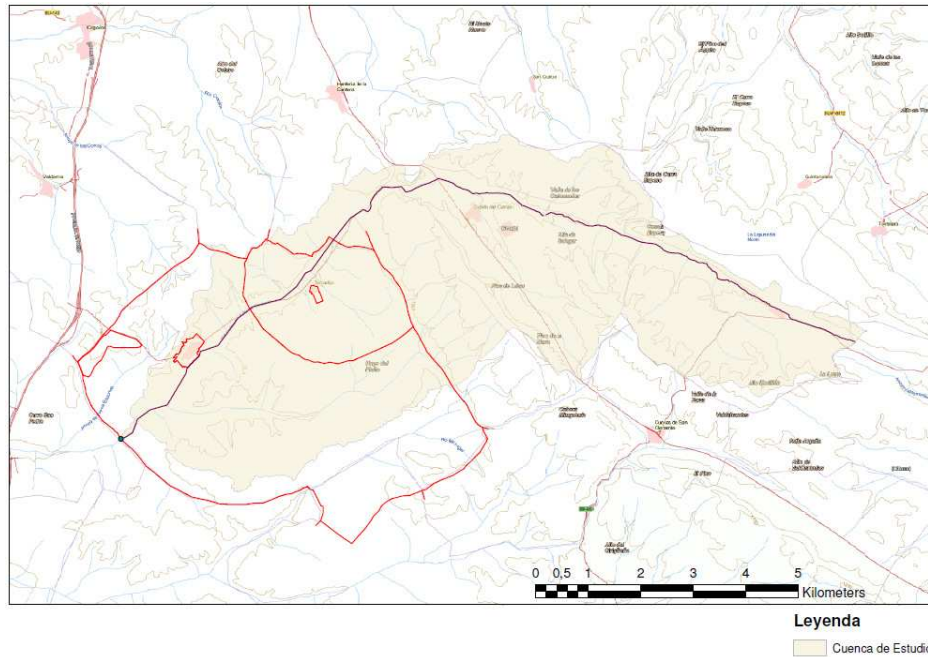


Figura 15. Cuenca receptora del cauce

### 3.4.3.- Estudio hidrológico de la cuenca y determinación de los caudales para distintos periodos de retorno.

La determinación de los caudales de cálculo a emplear se realizó según las recomendaciones de la guía Metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables [5], para determinar los caudales de cálculo se utilizó el mapa de caudales máximos (CDEX, 2009) [28] desarrollado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) para la Dirección General del Agua (DGA) del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM), que dispone de la aplicación CAUMAX en la que es posible consultar los caudales máximos instantáneos en régimen natural asociados a distintos periodos de retorno para los cauces con una cuenca superior a 50 km<sup>2</sup> y calcular estos caudales mediante el método racional [29] modificado para cauces con cuencas inferiores a 50 km<sup>2</sup>, donde el caudal viene dado por la expresión:

$$Q = \frac{CxIx A}{3,6} K \quad (1)$$

Siendo:

Q: Caudal de máxima avenida, en m<sup>3</sup>/s.

I (mm/h): Intensidad de la lluvia máxima, expresada en mm/h, en un tiempo de duración igual al de concentración de la cuenca.



A (km<sup>2</sup>): Superficie de la cuenca en km<sup>2</sup>.

C: Coeficiente de escorrentía superficial de la cuenca, correspondiente a la precipitación Ic.

K: Coeficiente de uniformidad, dado por la expresión:

$$K = 1 + \frac{T_c^{1,25}}{T_c^{1,25} + 14} \quad (2)$$

donde T<sub>c</sub>, es el tiempo de concentración de la cuenca que se obtiene mediante:

$$T_c = 0,3 \times (L/J^{1/4})^{0,76} \quad (3)$$

donde:

L = Longitud en km

J = Pendiente (m/m)

El coeficiente de escorrentía define la proporción de la componente superficial de la precipitación. Depende en consecuencia, de la capacidad de infiltración del suelo, de la cubierta vegetal del mismo y de la pendiente de la cuenca. La expresión para su cálculo es:

$$C = \frac{[(Pd^* / Po) - 1] * [(Pd^* / Po) + 23]}{[(Pd^* / Po) + 11]^2} \quad (4)$$

donde:

Pd = precipitación diaria correspondiente al periodo de retorno considerado en mm

Pd\* = precipitación diaria modificada correspondiente al periodo de retorno considerado en mm, corregida con el coeficiente KA (para tener en cuenta la no simultaneidad de las lluvias máximas de un mismo período de retorno en toda la superficie) en función del tamaño de la cuenca:



$$K_A = 1 - \frac{\text{Log}A}{15} \quad (5)$$

$K_A = 1$  Para  $A < 1$ , con A, superficie de la cuenca en  $\text{km}^2$

$P_o$  = umbral de escorrentía a partir del cual se inicia la misma en mm

C = coeficiente de escorrentía

La estimación de  $P_o$  se realiza en función de los valores de la Tabla 2.1 que aparece en la Instrucción 5.2-IC [30]. Por lo tanto es necesario conocer para cada cuenca:

- grupo de suelo
- usos de tierra
- características hidrológicas
- pendiente

$P_o$ , es un número entero adimensional que varía entre 0 y 100, por lo que es indistinto utilizar uno u otro de estos dos conceptos, se realizará en función del umbral de escorrentía  $P_o$  al resultar éste más intuitivo que el número de curva. Los valores del umbral de escorrentía se recogen en la Tabla 1 de la Instrucción 5.2-IC que se adjunta a continuación.



**Tabla 1. Estimación inicial del umbral de escorrentía Po (mm)**

Tabla. Estimación inicial del umbral de escorrentía Po (mm)						
USO DE LA TIERRA	PENDIENTE (%)	CARACTERISTICAS HIDROLOGICAS	GRUPO DE SUELO			
			A	B	C	D
Barbecho	>3	R	15	8	6	4
		N	17	11	8	6
	<3	R/N	20	14	11	8
Cultivos en hilera	>3	R	23	13	8	6
		N	25	16	11	8
	<3	R/N	28	19	14	11
Cereales de invierno	>3	R	29	17	10	8
		N	32	19	12	10
	<3	R/N	34	21	14	12
Rotación de cultivos pobres	>3	R	26	15	9	6
		N	28	17	11	8
	<3	R/N	30	19	13	8
Rotación de cultivos densos	>3	R	37	20	12	9
		N	42	23	14	11
	<3	R/N	47	25	16	13
Praderas	>3	Pobre	24	14	8	6
		Media	53	23	14	9
		Buena	*	33	18	13
		Muy buena	*	41	22	15
	<3	Pobre	58	25	12	7
		Media	*	35	17	10
		Buena	*	*	22	14
		Muy buena	*	*	25	16
Plantaciones regulares aprovechamiento forestal	>3	Pobre	62	26	15	10
		Media	*	34	19	14
		Buena	*	42	22	15
	<3	Pobre	*	34	19	14
		Media	*	42	22	15
		Buena	*	50	25	16
Masas forestales (bosques, monte bajo, etc.)		Muy clara	40	17	8	5
		Clara	60	24	14	10
		Media	*	34	22	16
		Espesa	*	47	31	23
		Muy espesa	*	65	43	33

1. N: DENOTA CULTIVO SEGÚN LAS CURVAS DE NIVEL.  
R: DENOTA CULTIVO SEGÚN LA LÍNEA DE MÁXIMA PENDIENTE.  
2. \*: DENOTA QUE ESA PARTE DE CUENCA DEBE CONSIDERARSE INEXISTENTE A EFECTOS DE CÁLCULO DE CAUDALES DE AVENIDA.  
3. LAS ZONAS ABALANCADAS SE INCLUIRÁN ENTRE LAS DE PENDIENTE MENOR DEL 3%.

TIPO DE TERRENO	PENDIENTE (%)	UMBRAL DE ESCORRENTÍA (mm)
Rocas permeables	>3	3
	<3	5
Rocas impermeables	>3	2
	<3	4
Firmes granulares sin pavimento		2
Adoquinados		1,5
Pavimentos bituminosos o de homigón		1

Deben considerarse además, las condiciones de humedad previas del suelo esperables en la cuenca en la época del año en que habitualmente se presenta la crecida. Para ello, se modificará el umbral de escorrentía con el coeficiente corrector que resulte de la aplicación de la figura 2.5 de la Instrucción 5.2.IC (Figura 16), si bien, afectada de un coeficiente reductor de 0,75 (dado que se consideran los valores de la figura 2.5 sobrevalorados).



Figura 16. Figura 2.5 de la Instrucción de Carreteras 5.2 IC.



En cuanto a la intensidad media de precipitación se empleará la expresión:

$$I_t = I_d * \left( \frac{I_1}{I_d} \right)^{\frac{28^{0,1} - t_c^{0,1}}{28^{0,1} - 1}} \quad (6)$$

Siendo:

$I_t$ : Intensidad de lluvia media en el intervalo de duración  $t$  (igual al  $t_c$ ) para un período de retorno dado, en mm

$I_d$ : Intensidad de la lluvia diaria para el mismo período de retorno

$t_c$ : Tiempo de concentración (duración del aguacero)

$I_1/I_d$  Relación entre la intensidad de lluvia horaria y diaria (según Figura 17 de la Instrucción 5.2-IC), independiente del período de retorno.

$I_d^*$  Precipitación máxima diaria modificada retorno (en mm), para el mismo período de retorno. Se obtiene como  $P_d^*/24$ .



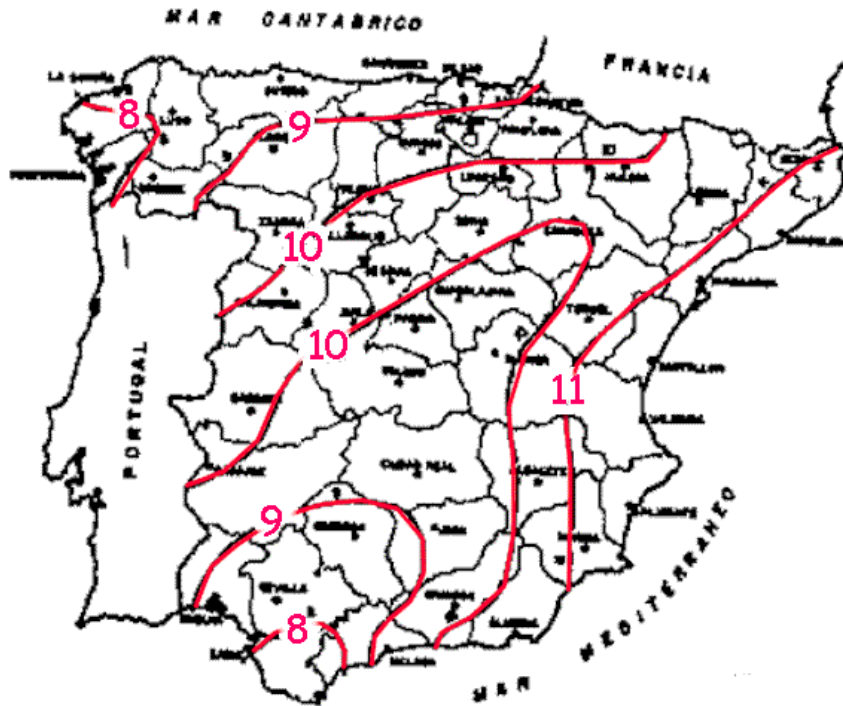


Figura 17. Mapa de Isolíneas I1/Id de la 5.2 IC.

De acuerdo con la metodología propuesta, y con los datos obtenidos de la aplicación CAUMAX para el lugar de estudio, se obtuvieron los caudales de la cuenca para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 100 y 500 años (Tabla 2 y Tabla 3).

Tabla 2. Caudales de cálculo para el punto más alejado de la cuenca de estudio y distintos periodos de retorno.

PUNTO DE DESAGÜE						
X_UTM:	443694					
Y_UTM:	4665187					
Área (Km2):	46					
Distancia al Punto más alejado (m):	19414					
Cota del punto más alejado (msnm):	1082					
Cota del punto de cálculo (msnm):	914					
<b>Periodo de retorno (años):</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>25</b>	<b>100</b>	<b>500</b>
Tiempo de concentración (h):	7,05	7,05	7,05	7,05	7,05	7,05
Precipitación (mm):	34,33	44,33	50,65	60,33	74,65	94,65
Factor corrector del área:	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
Precipitación corregida (mm):	30,52	39,42	45,04	53,64	66,38	84,16
Factor de torrencialidad (I1/Id):	10	10	10	10	10	10
Intensidad (I) (mm/h):	3,62	4,68	5,35	6,37	7,88	9,99
P0 (mm):	26,59	26,59	26,59	26,59	26,59	26,59
Coefficiente corrector del P0:	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Corrección P0 en funcion del periodo de retorno:	1	1	1	1,15	1,44	1,82
P0 corregido (mm):	18,61	18,61	18,61	21,4	26,8	33,88
Coefficiente de escorrentía:	0,1	0,16	0,2	0,21	0,21	0,21
Coefficiente de uniformidad (K):	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45
<b>CAUDAL (m3/S)</b>	<b>7</b>	<b>14</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>39</b>



**Tabla 3. Caudales de cálculo para el punto de entrada del tramo de estudio y distintos periodos de retorno.**

PUNTO DE ENTADA							
X_UTM:	447023						
Y_UTM:	4668332						
Área (Km2):	26,25						
Distancia al Punto más alejado (m):	13707						
Cota del punto más alejado (msnm):	1082						
Cota del punto de cálculo (msnm):	957						
Periodo de retorno (años):	2	5	10	25	100	500	
Tiempo de concentración (h):	5,36	5,36	5,36	5,36	5,36	5,36	
Precipitación (mm):	34,6	44,33	51,19	60,6	75,19	95,19	
Factor corrector del área:	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	
Precipitación corregida (mm):	31,33	40,38	46,35	54,87	68,08	86,18	
Factor de torrencialidad (I1/Id):	10	10	10	10	10	10	
Intensidad (I) (mm/h):	4,5	5,8	6,66	7,89	9,78	12,39	
P0 (mm):	27,84	27,84	27,84	27,84	27,84	27,84	
Coefficiente corrector del P0:	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	
Corrección P0 en funcion del periodo de retorno:	1	1	1	1,15	1,44	1,82	
P0 corregido (mm):	19,49	19,49	19,49	22,41	28,06	35,47	
Coefficiente de escorrentía:	0,09	0,16	0,2	0,2	0,2	0,2	
Coefficiente de uniformidad (K):	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	
CAUDAL (m3/s)	4	9	13	16	20	25	

### 3.4.4.-Estudio hidráulico con modelo unidimensional en régimen permanente.

Para el estudio hidráulico se ha empleado el modelo unidimensional, que se basa en el cálculo de la cota del nivel del agua en las secciones de cálculo, resolviendo las ecuaciones de Saint-Venant en una sola dimensión. Los modelos de una dimensión han sido ampliamente estudiados, pueden consultarse [31, 32] entre muchos otros trabajos. Las secciones de cálculo se colocan perpendiculares al flujo, y se supone que la lámina de agua está a la misma cota a lo largo de toda la sección.

Se emplea un modelo de régimen permanente, dado que las características geomorfológicas e hidrológicas lo permiten, además se simplifica el proceso de cálculo.

Para realizar la modelización se empleó el modelo HEC-RAS (USACE), por ser uno de los modelos más utilizados y de libre distribución, así como la herramienta de preproceso y post proceso HEC-GeoRas (USACE) para ArcGIS.

La metodología del proceso es:

1. Un “preproceso” (trabajo previo con ArcView y HEC\_GeoRAS), para generar un archivo de importación para HEC-RAS y que contiene información geométrica de las secciones transversales o su introducción manual.

La geometría del cauce se obtiene de los dos distintos modelos digitales del terreno, incorporando los datos del eje del cauce georreferenciados, así como las secciones transversales cada 100, posteriormente se interpolan secciones cada 25 metros (Figura 18).

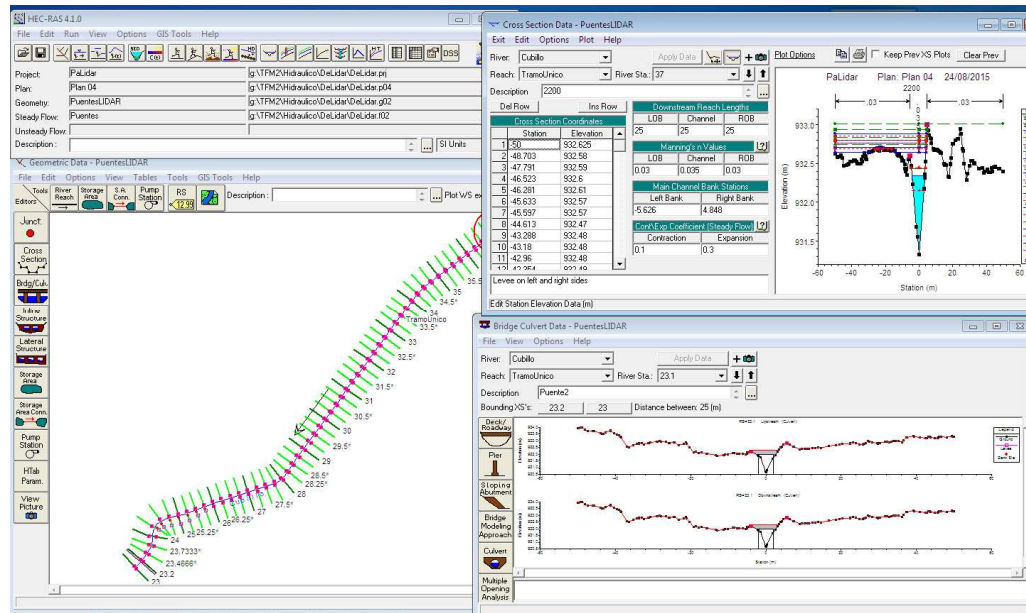


Figura 18. Modelizado con HEC-RAS

La cartografía a utilizar procede del MDT obtenido a partir de observaciones LIDAR y de los datos GPS, en formato vectorial TIN (Trianguled Irregular Network) (Figura 19).

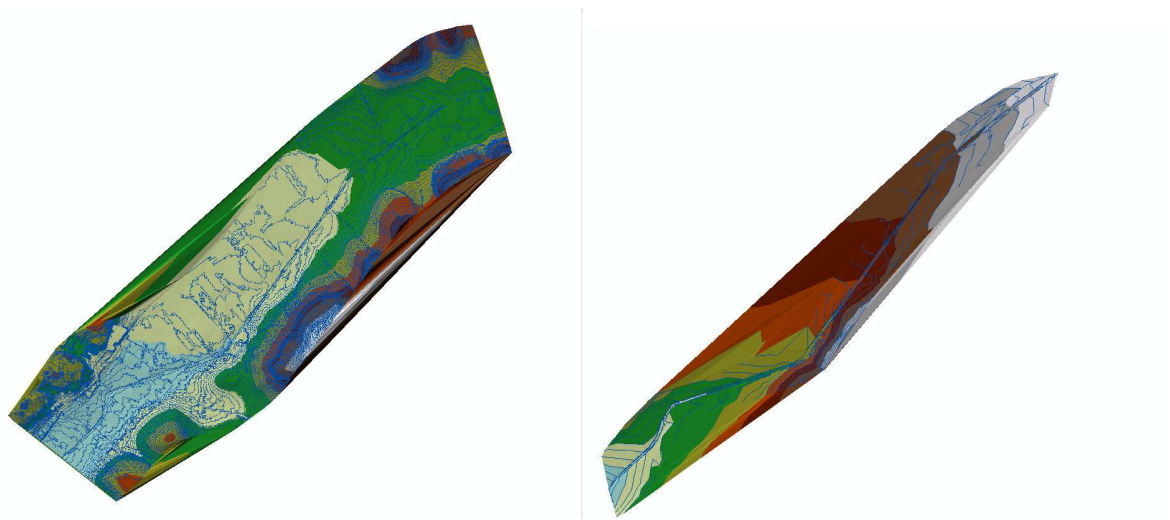


Figura 19. Representación de los TIN obtenidos. Izda. datos LIDAR, Dcha. Datos GPS.

2. La modelización del flujo con HEC\_RAS que a su vez genera un archivo de exportación para ArcView.

Introducir las secciones (Figura 20) con puentes y/o culverts (Geometric Data – Brdg/Culv). Definir áreas inefectivas (Flow Areas), estructuras en línea (Inline Structure) o laterales (Lateral Structure) y obstrucciones al flujo (Obstructed Areas). Introducir los datos hidráulicos con la herramienta Edit/Steady Flow Data. Definir las condiciones de contorno (Reach Boundary Conditions).

Definir los caudales de cada perfil así como los valores del coeficiente de Manning obtenidos de la tabla 3-1 el manual de HEC-RAS [20], dadas las características del cauce se optó por asignar un coeficiente de Manning de 0.035 para el cauce principal y de 0.03 para el resto. Crear un plan y ejecutar una simulación con la herramienta Run/Steady Flow Analysis.

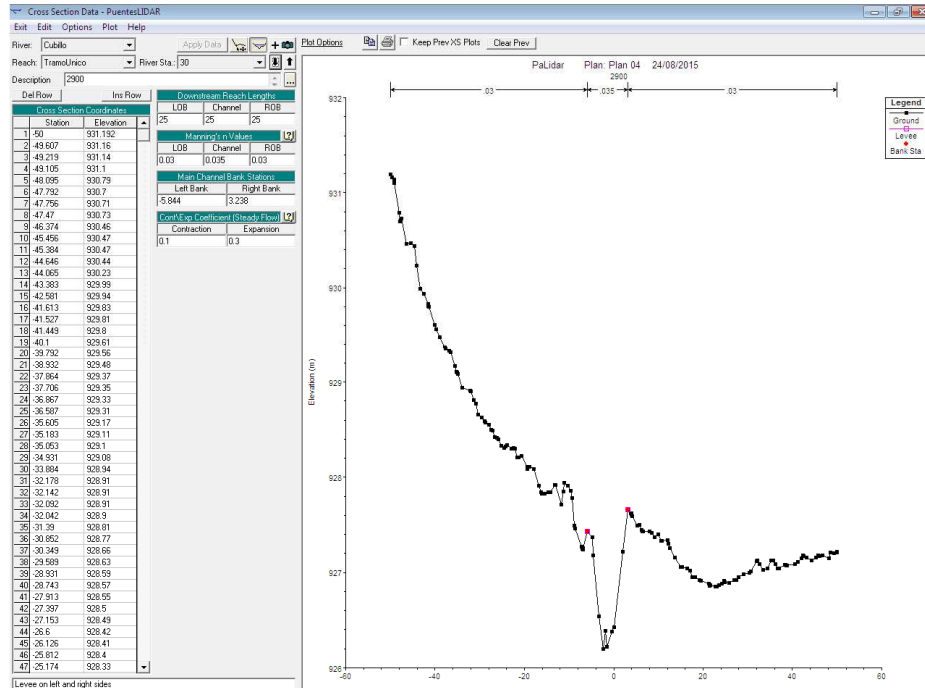


Figura 20. Introducción de datos de las secciones en HEC-RAS

Finalmente se comprobaron los resultados visualizando las secciones transversales, los perfiles de las láminas de agua, gráficos de varios parámetros, curvas de caudal-calado de cada perfil etc. (Figura 21).

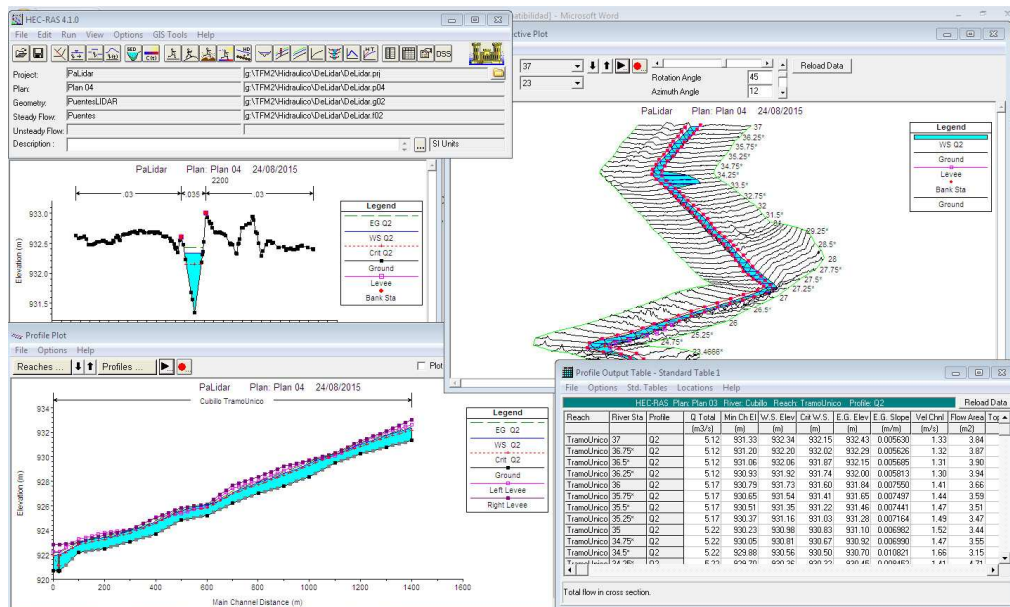


Figura 21. Resultados de la modelización en HEC-RAS.

3. Un “postproceso” mediante HEC-GeoRAS, que genera los resultados finales: superficies de inundación para cada periodo de retorno, grids de profundidad... (Figura 22).

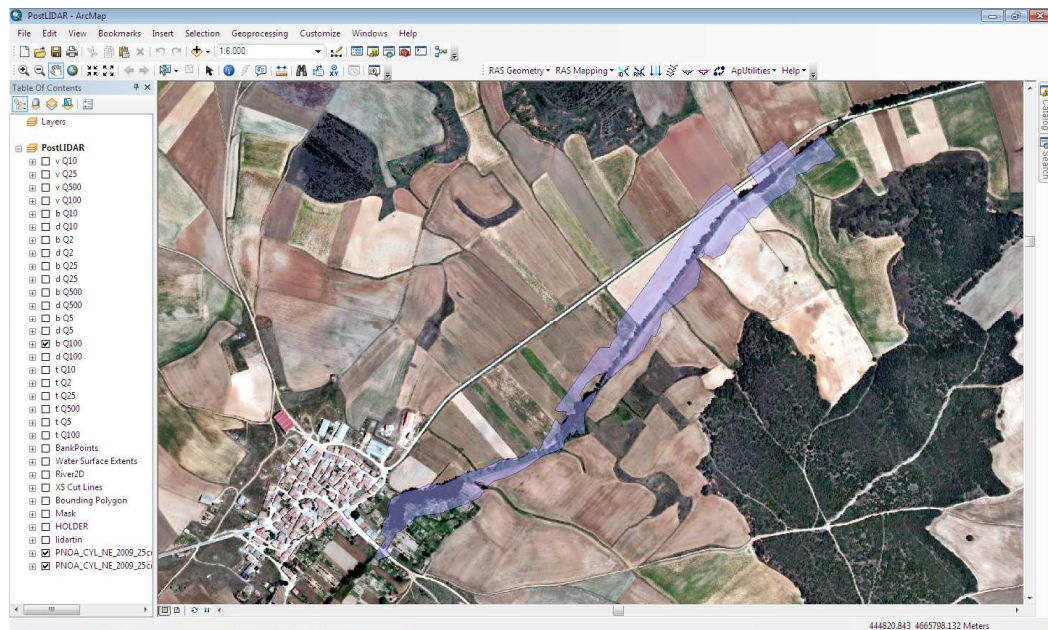


Figura 22. Ejemplo de postproceso con lámina de inundación generado con HEC-GeoRAS sobre ortofoto.

#### 4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan los resultados obtenidos teniendo en cuenta que debido a los problemas ya comentados, a la hora de tomar datos GPS en campo, no se ha podido modelizar todo el tramo del río a su paso por el municipio, por lo que el estudio se realizó en 1500 metros, por otra parte y debido a ese mismo problema y dado que no se dispone de tiempo para la nueva toma de datos, no se cubre la totalidad del ancho necesario para que las láminas de agua no superen el ancho del modelizado en alguno de los periodos de retorno considerados.

Con las diferentes simulaciones realizadas se han podido extraer diferentes resultados:

- Láminas de inundación para distintos periodos de retorno.
- Anchos de lámina de agua en cada perfil.
- Mapas de calados.
- Mapas de velocidades

##### 4.1.- Láminas de inundación.

Mediante el postproceso con HEC-GeoRAS se obtuvieron los diferentes polígonos de la lámina de inundación, se presentan para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 100 y 500 años, cuyas áreas se indican en la Tabla 1. Se adjuntan los mapas generados con ArcGis en el Anexo.

**Tabla 4. Comparativa entre superficies de láminas de inundación entre ambos modelos.**

<b>SUPERFICIE TOTAL DE LA LÁMINA DE AGUA (m<sup>2</sup>)</b>				
<b>Periodo de Retorno (años)</b>	<b>MDT-LIDAR</b>	<b>MDT-GPS</b>	<b>Diferencia</b>	<b>Porcentaje</b>
2	16066.00	10001.00	6065.00	37.75
5	43678.00	23241.00	20437.00	46.79
10	61442.43	58249.91	3192.52	5.20
25	68805.91	75165.55	-6359.64	-9.24
100	83069.65	77910.67	5158.98	6.21
500	86677.64	86752.22	-74.58	-0.09

Los resultados muestran diferencias importantes en periodos de retorno pequeños, debido a que en el modelo obtenido por GPS el caudal circula por el cauce principal, mientras que en modelo LIDAR se producen desbordamientos, seguramente debido a que los datos LIDAR no permiten definirle con exactitud, dada la gran cantidad de vegetación existente. Para periodos altos las diferencias disminuyen notablemente, aunque este hecho también puede deberse a la falta de datos del terreno de las llanuras de inundación.

Por otra parte, al estudiar geoméricamente las diferentes superficies podemos ver el porcentaje de coincidencia en el espacio indicado en la Tabla 5.

**Tabla 5. Superficies coincidentes (m<sup>2</sup>) de las láminas de inundación.**

<b>Periodo de Retorno (años)</b>	<b>Superficie común</b>	<b>Porcentaje común</b>
2	8851.00	55.09
5	19852.00	45.45
10	45930.70	74.75
25	58716.32	78.12
100	67922.46	81.77
500	77434.88	89.26

Al obtener los polígonos de intersección entre las distintas láminas de inundación (ver Figura 23 y Figura 24), se puede apreciar que en periodos de retorno pequeños los datos LIDAR no producen resultados correctos al producirse desbordamientos del cauce principal, a medida que los desbordamientos del cauce se producen también en el modelo GPS, las coincidencias son mayores, lo que viene confirmando que el modelo LIDAR no se ajusta con caudales pequeños que deben circular confinados en el cauce principal, se explica por la mala definición de este debido a la alta densidad de vegetación en el cauce, mientras que en las llanuras de inundación se obtienen un mayor número de puntos pertenecientes al terreno donde se consigue un MDT más definido.

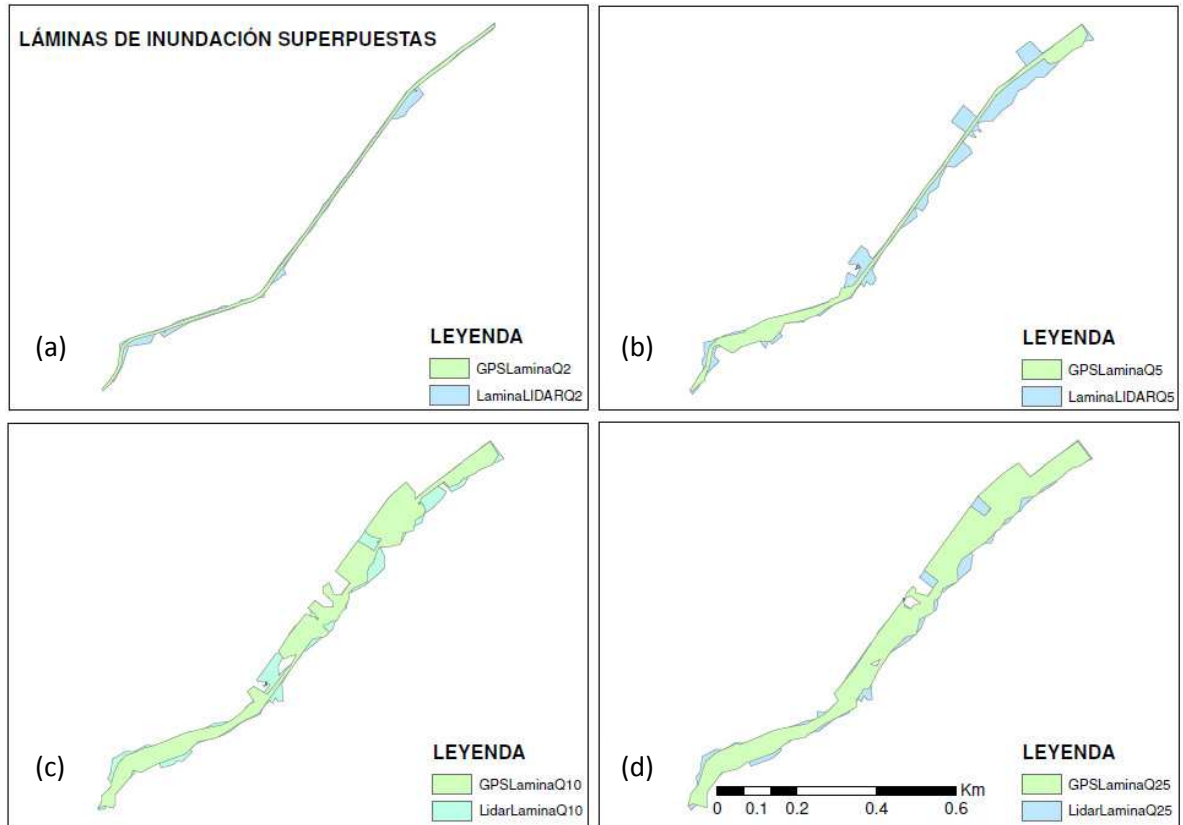


Figura 23. Comparación entre láminas de inundación, (a) periodo de retorno de 2 años, (b) periodo de retorno de 5 años, (c) periodo de retorno de 10 años, (d) periodo de retorno de 25 años.

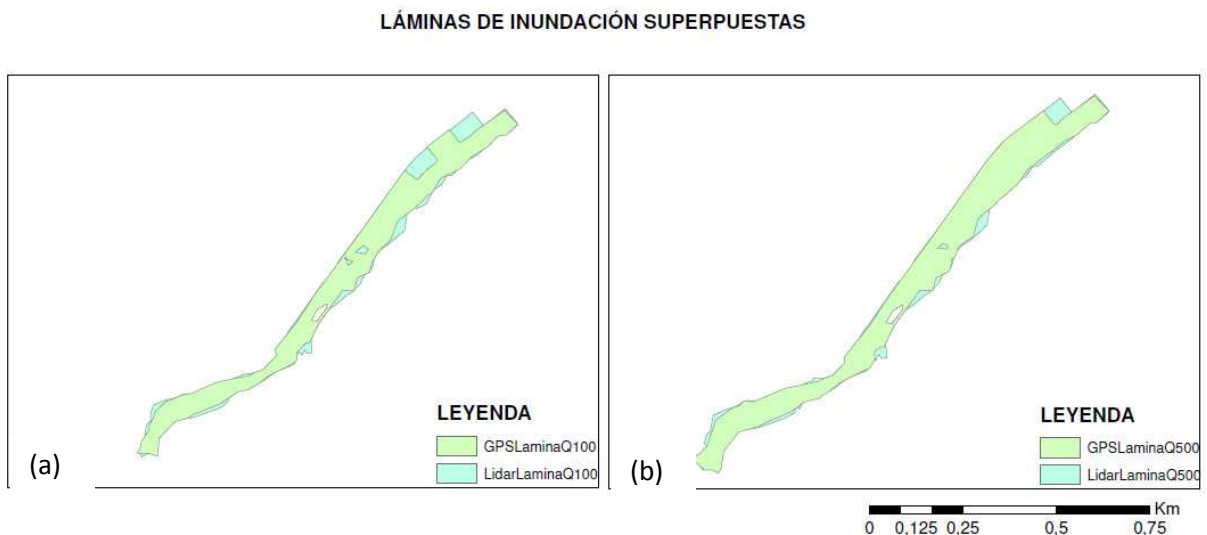


Figura 24. Comparación entre láminas de inundación, (a) periodo de retorno de 100 años, (b) periodo de retorno de 500 años



#### 4.2.- Anchos de lámina de agua en cada perfil.

Se tomaron un total de 15 perfiles del terreno para la simulación con HEC-RAS, de los cuales se pueden obtener las anchuras de la lámina de inundación, en la Tabla 6 se indican las diferencias de anchos de cada perfil encontradas entre los dos modelos considerados y para los distintos periodos de retorno estudiados.

Tabla 6. Diferencias en los anchos de las secciones HEC-RAS.

SECCIÓN	DIFERENCIAS MODELO GPS - MODELO LIDAR					
	Q2	Q5	Q10	Q25	Q100	Q500
37	-0.79	-3.87	-10.51	-10.51	-0.01	-3.91
36	0.31	3.88	-28.88	8.93	-36.24	-36.22
35	2.82	-27.06	-27.7	-33.03	48.94	-42.63
34	-27.23	-38.42	4.98	-45.18	-47.91	1.32
33	-0.04	-0.05	-46.27	4.95	12.08	16.84
32	-1.45	-4.43	3.17	-50.48	1.27	1.31
31	-1.97	-24.11	45.17	36.85	33.91	-10.64
30	0.51	0.06	41.97	-4.9	-5.49	-5.49
29	-6.25	-49.05	-48.51	-1.24	-2.6	-2.97
28	-0.37	22.8	9.15	15.19	14.99	10.6
27	-1.57	12.48	-12.47	14.95	-0.96	-7.15
26	-3.68	5.63	-5.4	-6	-4.48	-4.74
25	-15	-20.53	11.52	10.97	19.22	-9.89
24	-2.63	-10.07	2.29	-14.16	-12.42	-8.09
23	0.62	-17.08	-17.37	-17.29	-17.13	24.61
<b>PROMEDIO</b>	<b>-3.78</b>	<b>-9.99</b>	<b>-5.26</b>	<b>-6.06</b>	<b>0.21</b>	<b>-5.14</b>
<b>DESV. ESTÁNDAR</b>	<b>7.70</b>	<b>19.40</b>	<b>27.17</b>	<b>23.66</b>	<b>24.50</b>	<b>17.20</b>

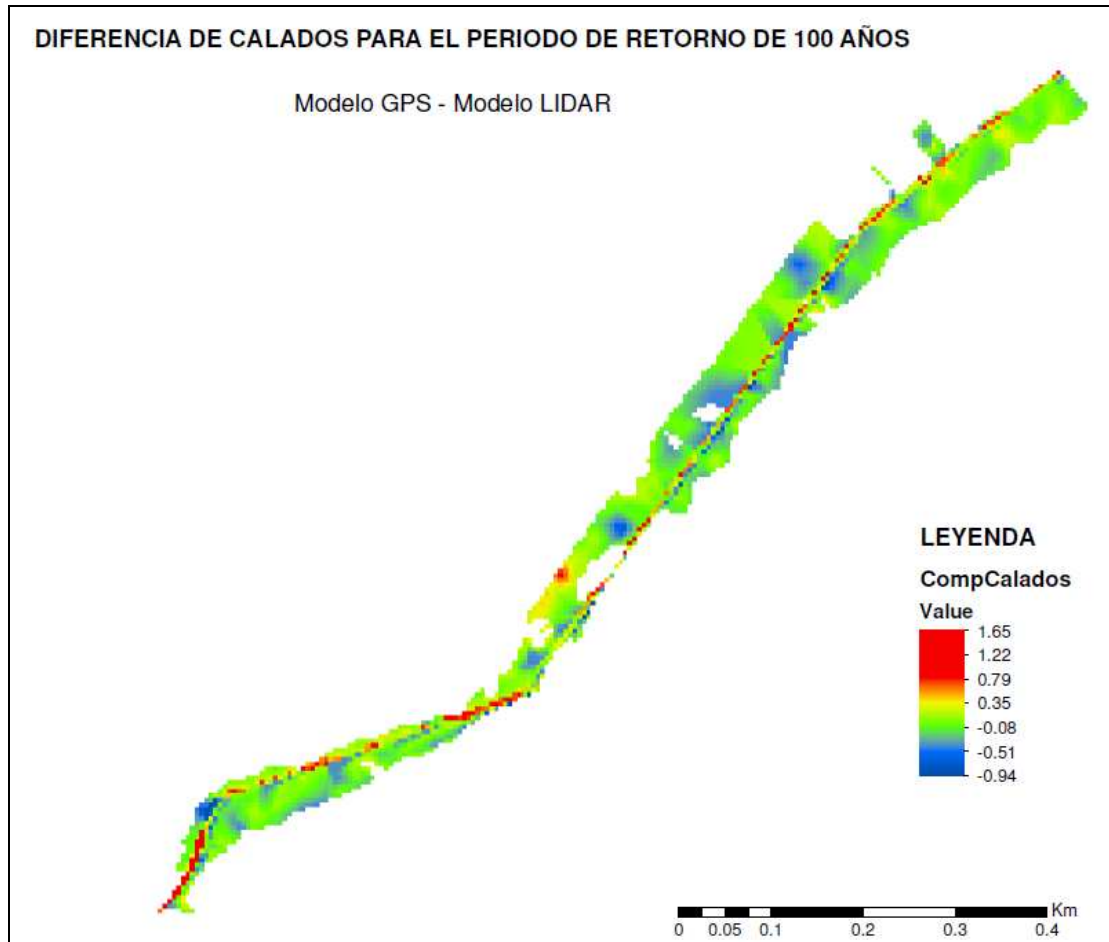
Si observamos las diferencias atendiendo a un mismo periodo de retorno vemos valores grandes en alguna de las secciones, esto se debe a que en dichas secciones la vegetación es más densa, y como consecuencia la definición del terreno por los datos LIDAR es insuficiente. No obstante los promedios no son excesivamente altos, para todos los periodos de retorno las anchuras del modelo LIDAR son en general mayores, y donde menor desviación encontramos es para el periodo de retorno de dos años, dado que se producen menos desbordamientos.

#### 4.3.- Mapas de calados.

Un dato importante a la hora de evaluar riesgos de inundación y la zona de flujo preferente (ZFP) es el calado junto con las velocidades máximas. Se define la ZFP en el artículo 9.2 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico [4], y se considera que se pueden producir graves daños sobre las personas y los bienes si se verifica que el calado es superior a 1 metro, la velocidad mayor de 1 m/s o el producto de ambas variables mayor a 0,5 m<sup>2</sup>/s para la avenida de 100 años de periodo de retorno, por lo que se compara el calado de los



modelos únicamente para este periodo de retorno y teniendo en cuenta que las superficies no son iguales. El resto de mapas de calados pueden verse en el Anexo I.



**Figura 25. Ráster diferencia de calados entre modelo GPS y modelo LIDAR para el periodo de retorno de 100 años.**

Como puede verse en la Figura 25, se obtienen unas diferencias muy elevadas en las zonas cercanas al cauce principal (color rojo), donde el calado del modelo GPS es mucho mayor, claramente se explica por los mismos motivos que en los apartados anteriores, la masa arbórea del cauce no permite realizar una buena definición del terreno con datos LIDAR, dejando secciones más estrechas que las obtenidas por GPS, el modelo LIDAR genera taludes más inclinados del cauce, por lo que las diferencias de calado son en realidad por las propias diferencias del terreno modelizado.

En cambio, en las zonas exteriores al cauce principal, la diferencia de calados es pequeña (color verde) y mayores valores de calado para el modelo LIDAR (color azul), donde la definición de este modelo es mucho mejor.

#### 4.4.- Mapas de velocidades.

Al igual que en el apartado anterior, se comparan los mapas de velocidades para el periodo de retorno de 100 años, por ser este el considerado para la determinación de las zonas de flujo preferente.

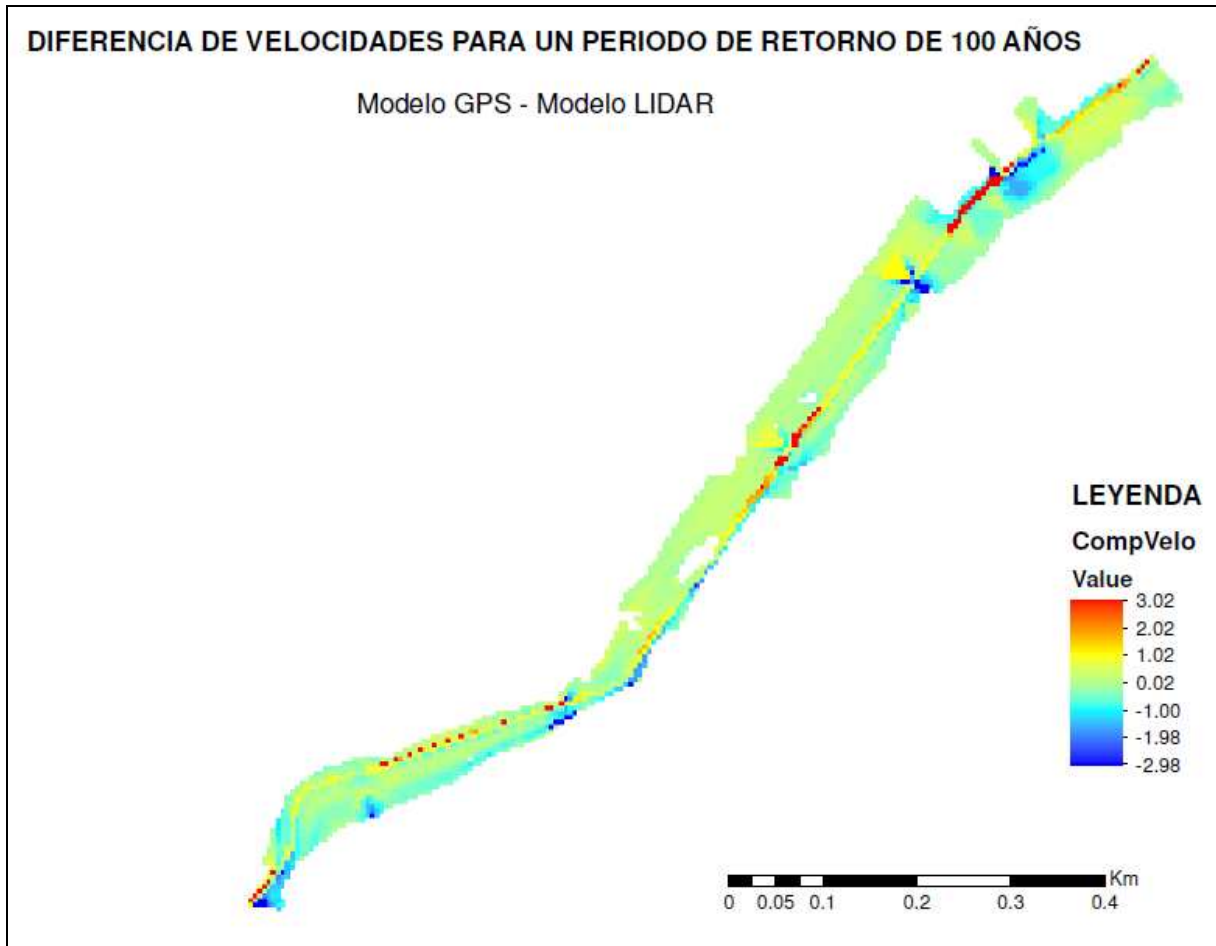


Figura 26. Ráster diferencia de velocidades entre modelo GPS y modelo LIDAR para el periodo de retorno de 100 años.

En la Figura 26 podemos apreciar que encontramos grandes diferencias de velocidad en zonas puntuales del cauce principal donde en el modelo GPS son mayores (color rojo), siendo muy parecidas en el resto de la llanura de inundación, encontramos mayores velocidades del modelo LIDAR (color azul) en los extremos de la lámina, aunque también existen dos zonas junto al cauce principal. En cualquier caso la mayor parte de la lámina presenta poca diferencia y siempre a favor del modelo GPS en el cauce principal, lo cual se corresponde con las comparaciones realizadas en los anteriores apartados.



## 5.- CONCLUSIONES

EL trabajo queda inconcluso, no por la longitud pequeña del cauce, sino por la necesaria familiarización tanto en procedimientos como en algoritmos de cálculo del número elevado de Software necesario y por fallos de los equipos utilizados, lo que hizo necesaria una dedicación de tiempo excesiva para los plazos fijados.

El uso de datos LIDAR presenta ventajas respecto al empleo de datos GPS, permite acceder a mayor área de estudio así como un mayor volumen de datos, además de una disminución importante de salidas al campo. Si bien presenta dificultades a la hora de obtener puntos en zonas de vegetación fundamentalmente en el cauce principal, mejorable si el momento de toma de datos LIDAR coincidiese con el de menor densidad de hojas, por lo que se precisa de un mayor ensayo en los métodos de filtrado de puntos.

Los datos GPS son de mayor precisión, pero presenta dificultades, requiere tomar datos del área de estudio suficientemente ancha de las llanuras de inundación, y existen numerosas zonas de escasa cobertura por vegetación.

En la modelización realizada, para periodos de retorno pequeños encontremos desbordamientos del cauce principal injustificados, tal como se puede apreciar con el modelo obtenido por GPS más exacto.

Por otra parte, para los periodos de retorno altos (25 o más años) los modelos parecen comportarse de igual forma, dando llanuras de inundación parecidas, aunque esto deberá ser comprobado cuando se disponga de suficiente extensión de datos GPS.

Se ha podido comprobar que el calado y la velocidad para un periodo de retorno de 100 años, el modelo con cartografía LIDAR presenta grandes diferencias respecto a la cartografía GPS, fundamentalmente en las zonas del cauce principal.

Es necesario continuar el trabajo de investigación, ampliando la zona de estudio con la nueva toma de datos GPS que permita comprobar ambos modelos y discernir un método rápido que simplifique de manera coherente el proceso.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Unión Europea. Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación. «DOUE» núm. 288, de 6 de noviembre de 2007, páginas 27 a 34.
- [2] Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente. *Visor de las Zonas de Dominio Público Hidráulico (DPH) y Zonas Inundables (ZI)*.  
<<http://sig.magrama.es/snczi/visor.html?herramienta=DPHZI>> [consulta: 15 de julio de 2015]
- [3] España. Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación. «BOE» núm. 171, de 15 de julio de 2010, páginas 61954 a 61967.
- [4] España. Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas.
- [5] Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (2011) Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables.  
[http://www.magrama.gob.es/es/agua/publicaciones/guia\\_metodologica\\_ZI.aspx](http://www.magrama.gob.es/es/agua/publicaciones/guia_metodologica_ZI.aspx)
- [6] Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (2010). Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables en la Demarcación Hidrográfica del Duero. Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI).
- [7] Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente (2014). Mapas de Peligrosidad y Riesgo de Inundación de la Demarcación Hidrográfica del Segura.
- [8] Felicísimo Pérez, A.M. (2015). El Modelo Digital del Terreno.  
<<http://www6.uniovi.es/~feli/CursoMDT/>> [consulta: 15 de julio de 2015]
- [9] García Botella, E. et al. (2014). “Reflexiones sobre la idoneidad de la cartografía LIDAR en Estudios de Inundabilidad”. XVI Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica 25, 26 y 27 de Junio de 2014. Alicante.
- [10] Espejo Almodovar, F. (2011). *Cartografía de zonas inundables. Análisis de sensibilidad de distintas fuentes cartográficas en el resultado de simulaciones hidráulicas. Aplicación al estudio de rotura de balsas*. Trabajo Fin de Máster. Ávila: Universidad de Salamanca.
- [11] Odón Rodríguez Rico, O. (2009). *LIDAR vs. fotogrametría en la obtención de modelos digitales de elevaciones para estudios hidrológicos*. Trabajo Fin de Máster. Ávila: Universidad de Salamanca.



- [12] Ferrer-Juliá, M. et al. (2004). “Generación de Cartografía Geomorfológica con datos LIDAR para los Estudios de Inundabilidad”. *Ingeniería del Agua*.  
<http://www.ingenieriadelagua.com/2004/JIA/Jia2009/fs/AO11rev.pdf> [consulta: 15 de junio de 2015]
- [13] Magdaleno Mas, F., 2006. “Aplicaciones de la teledetección láser (LIDAR) en la caracterización y gestión del medio fluvial”. *Ingeniería Civil* 142/2006
- [14] Gómez, A; et al. (2005). Sistema LIDAR para la confección de DTMs en reemplazo de fotogrametría convencional obtención de DTM y DSM mediante tecnología LIDAR. Aplicación al río Ebro. Universidad Politécnica de Madrid. Dpto. de Ingeniería Cartográfica – Geodesia – Fotogrametría – Expresión Gráfica
- [15] Aaron Cook et al. (2009). Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*. Volume 377, Issues 1-2. Pages 131-142.
- [16] Aggett, G.R. (2009). Creating and coupling a high-resolution DTM with a 1-D hydraulic model in a GIS for scenario-based assessment of avulsion hazard in a gravel-bed river. *Geomorphology*. Volume 113, Issues 1-2. Pages 21-34.
- [17] Sampson, C et al. (2012). Use of terrestrial laser scanning data to drive decimetric resolution urban inundation models. *Advances in Water Resources*. Volume 41. Pages 1-17.
- [18] Instituto Geográfico Nacional. LASTask Tools Visualizador.  
<<http://centrodedescargas.cnig.es>>.
- [19] ESRI, 2011. ArcGIS 10 Desktop Help. ArcGIS Resource Center,  
<<http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html>>.
- [20] USACE, 2008. HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Hydrologic Engineering Center, USA Army Corps of Engineers USACE: <<http://www.hec.usace.army.mil>>
- [21] USACE, 2005. HEC-GeoRAS Gis tools for support of HEC-RAS Using ArcGIS User’s Manual. Hydrologic Engineering Center, USA Army Corps of Engineers USACE: <<http://www.hec.usace.army.mil>>
- [22] Robert J. (2014) FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization. Pacific Northwest Resarc Station. Forest Service. USDA.
- [23] Arttu Soininen (2000-2014). TerraScan User’s Guide. Terrasolid.
- [24] Bentley Systems (2015). Microstation SE V8.
- [25] Arttu Soininen (1995-2013). TerraModeler User’s Guide. Terrasolid.



**[26]** ESPAÑA. 2007. Real Decreto 1071/2007, de 27 de julio, por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en de España. Boletín Oficial del Estado núm. 207, de 29 de agosto de 2007, pp 35986-35989.

**[27]** Autodesk (2012). Autocad 2012.< <http://www.autodesk.es/>>.

**[28]** CEDEX 2011. Mapa de caudales máximos de avenida para la red fluvial de la España peninsular.

**[29]** Temez, J.R., 1987. Cálculo hidrometereológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Dirección General de Carreteras. MOPU.

**[30]** MOPU 1990 Instrucción 5.2-IC. Drenaje Superficial. Dirección General de Carreteras. MOPU.

**[31]** Cuervo, A.E. (2012) Comparación de los modelos hidráulicos unidimensional (HEC-RAS) y bidimensional (IBER) en el análisis del rompimiento de presas de materiales sueltos. Tesis Máster oficial en Recursos Hídricos. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña.

**[32]** Toro, E.F. (2001), Shock-capturing methods for free-surface shallow flows, John Wiley & Sons, Chichester.

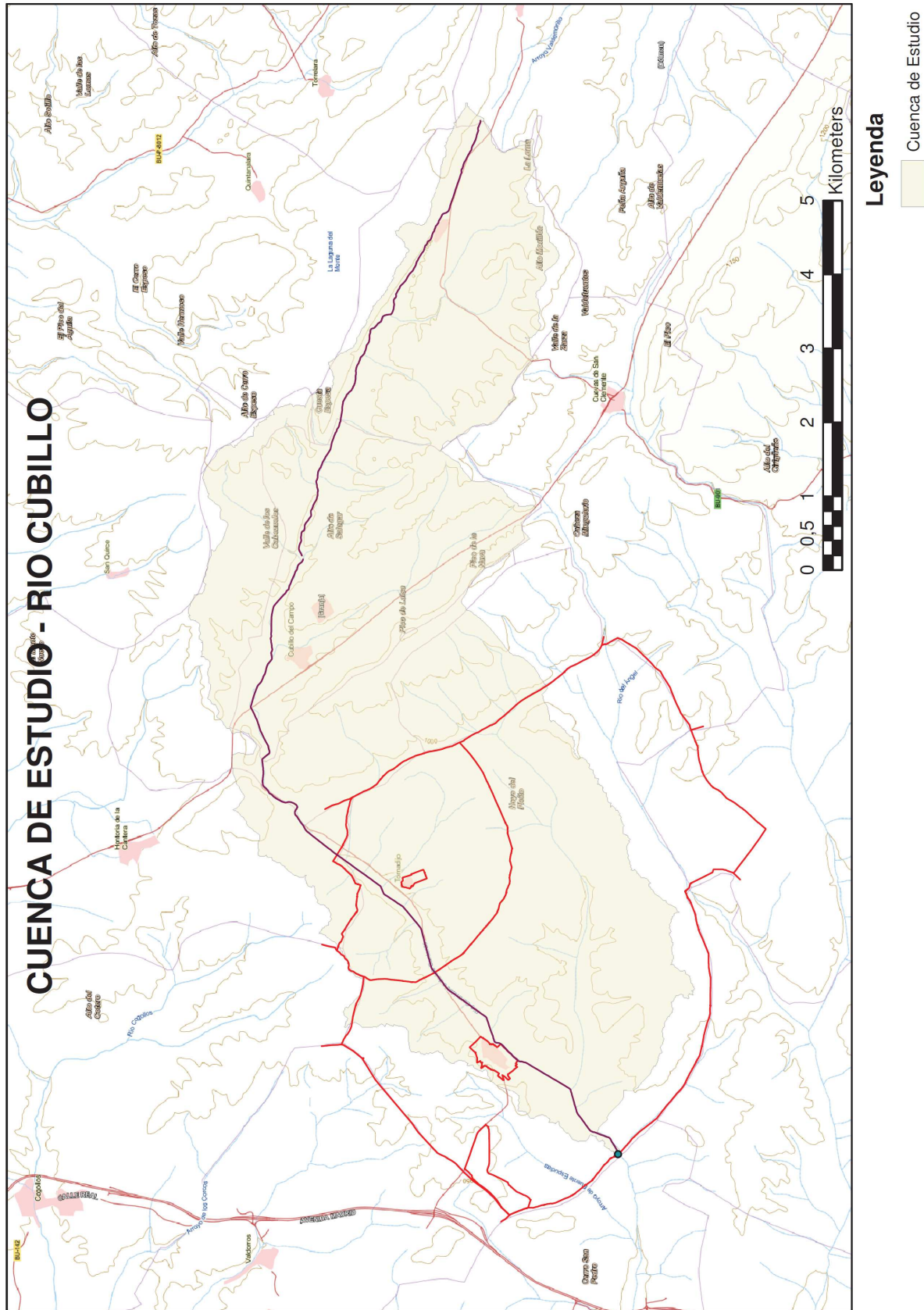


## INDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</b> .....	<b>1</b>
<b>2.- ÁREA DE ESTUDIO</b> .....	<b>3</b>
<b>3.- MATERIAL Y MÉTODOS</b> .....	<b>4</b>
3.1.- Datos LIDAR del Instituto Geográfico Nacional .....	4
3.2.- Datos topográficos tomados con GPS. ....	5
3.3.- Otras fuentes de datos. ....	6
3.4.- Métodos.....	7
<u>3.4.1.- Obtención de dos Modelos Digitales del Terreno (MDT)</u> .....	<u>8</u>
<u>3.4.2.- Delimitación de la cuenca receptora con la ayuda de herramientas GIS</u> .....	<u>16</u>
<u>3.4.3.- Estudio hidrológico de la cuenca y determinación de los caudales para distintos periodos de retorno.</u> ....	<u>18</u>
<u>3.4.4.-Estudio hidráulico con modelo unidimensional en régimen permanente</u> .....	<u>25</u>
<b>4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>28</b>
4.1.- Láminas de inundación. ....	28
4.2.- Anchos de lámina de agua en cada perfil.....	31
4.3.- Mapas de calados. ....	31
4.4.- Mapas de velocidades. ....	33
<b>5.- CONCLUSIONES</b> .....	<b>34</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>35</b>
<b>ANEXO: MAPAS DE RESULTADOS</b>	

## **ANEXO : MAPAS DE RESULTADOS**







# LÁMINA DE INUNDACIÓN Q2

MODELO DATOS GPS





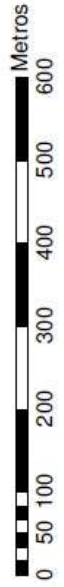
# LÁMINA DE INUNDACIÓN Q5

MODELO DATOS GPS





**LÁMINA DE INUNDACIÓN Q10**  
MODELO DATOS GPS





**LÁMINA DE INUNDACIÓN Q25**  
MODELO DATOS GPS





**LÁMINA DE INUNDACIÓN Q100**  
MODELO DATOS GPS



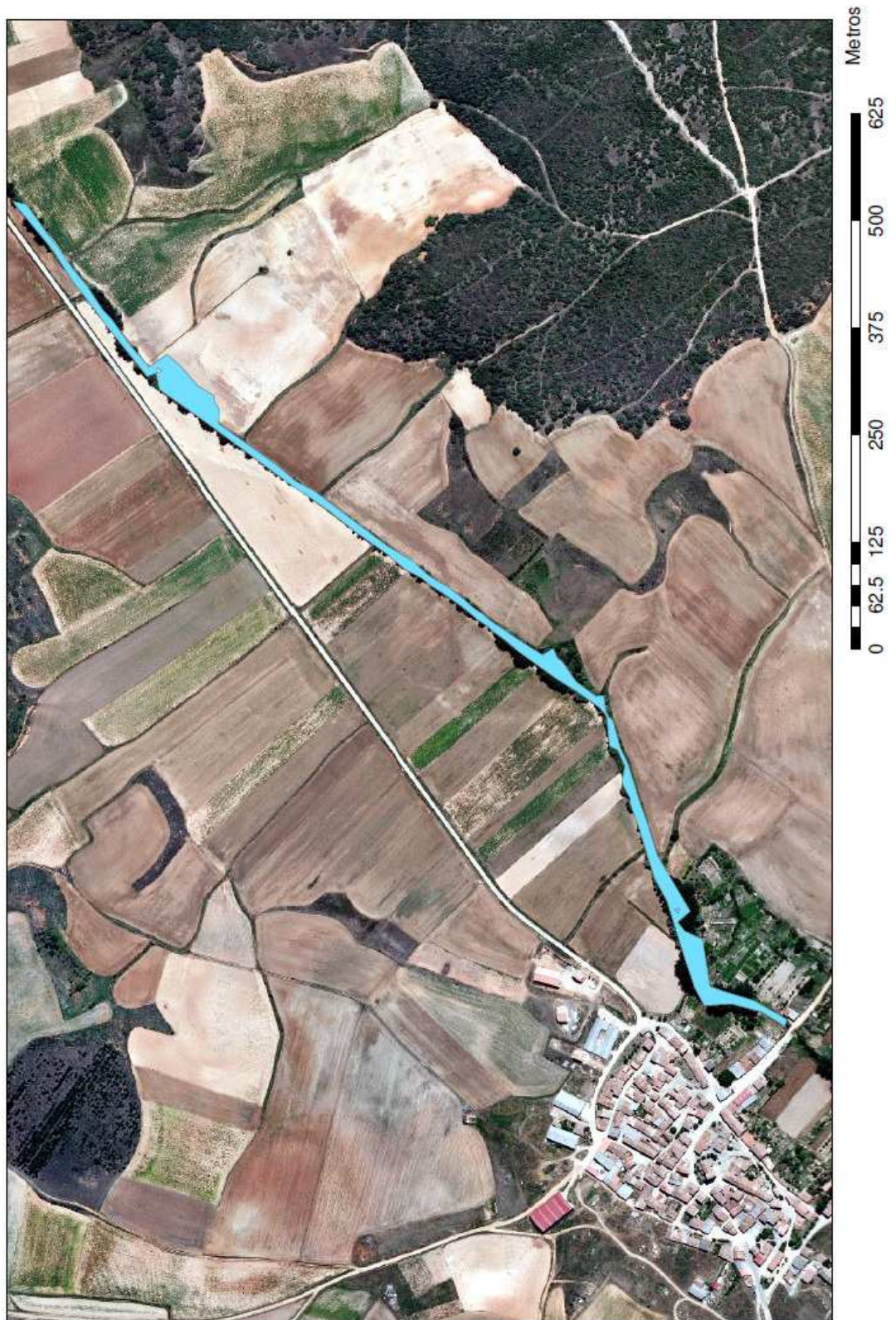


# LÁMINA DE INUNDACIÓN Q500

MODELO DATOS GPS



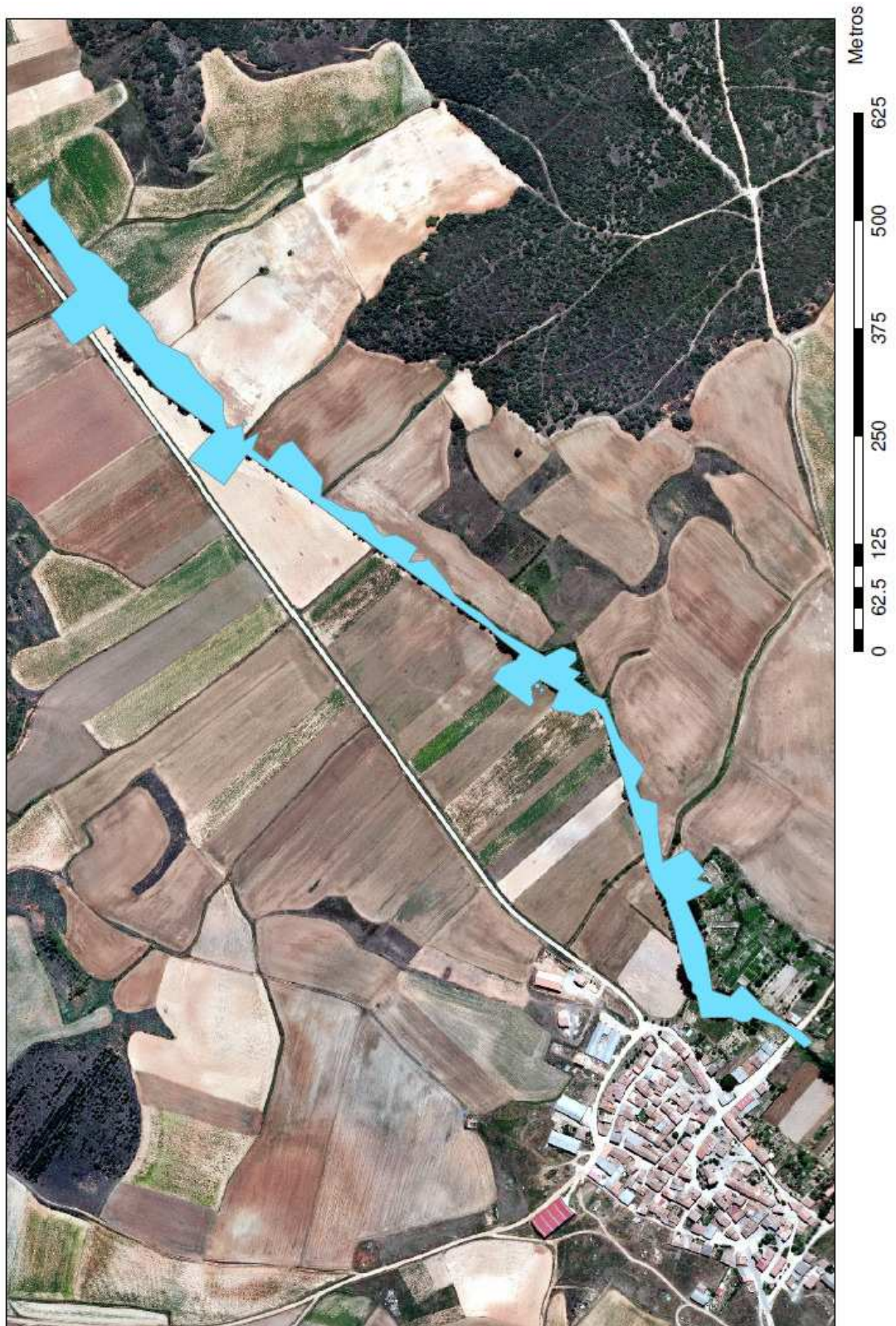
**LÁMINA DE INUNDACIÓN Q2  
MODELO DATOS LIDAR**



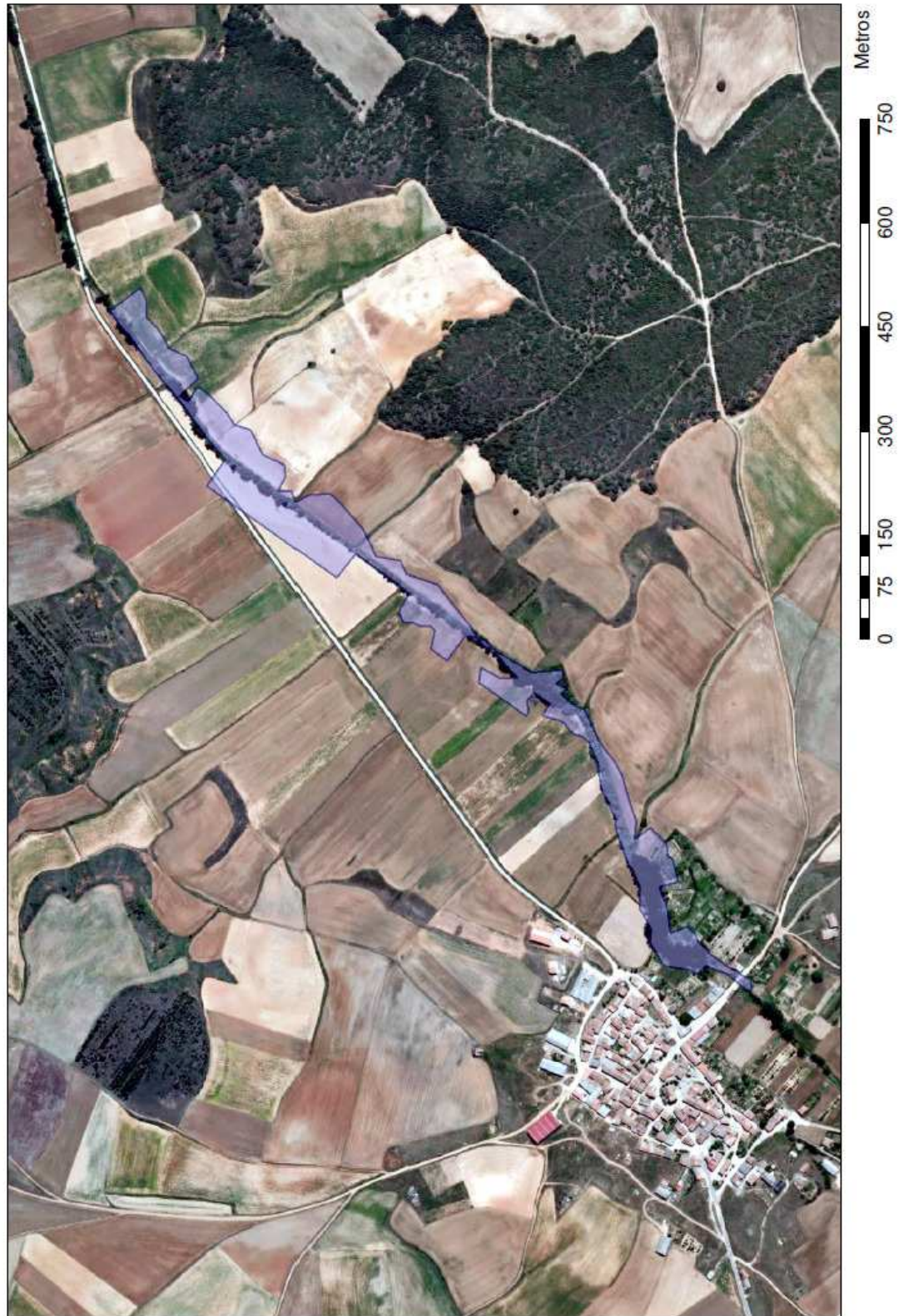




**LÁMINA DE INUNDACIÓN Q5  
MODELO DATOS LIDAR**



**LÁMINA DE INUNDACIÓN Q10  
MODELO DATOS LIDAR**





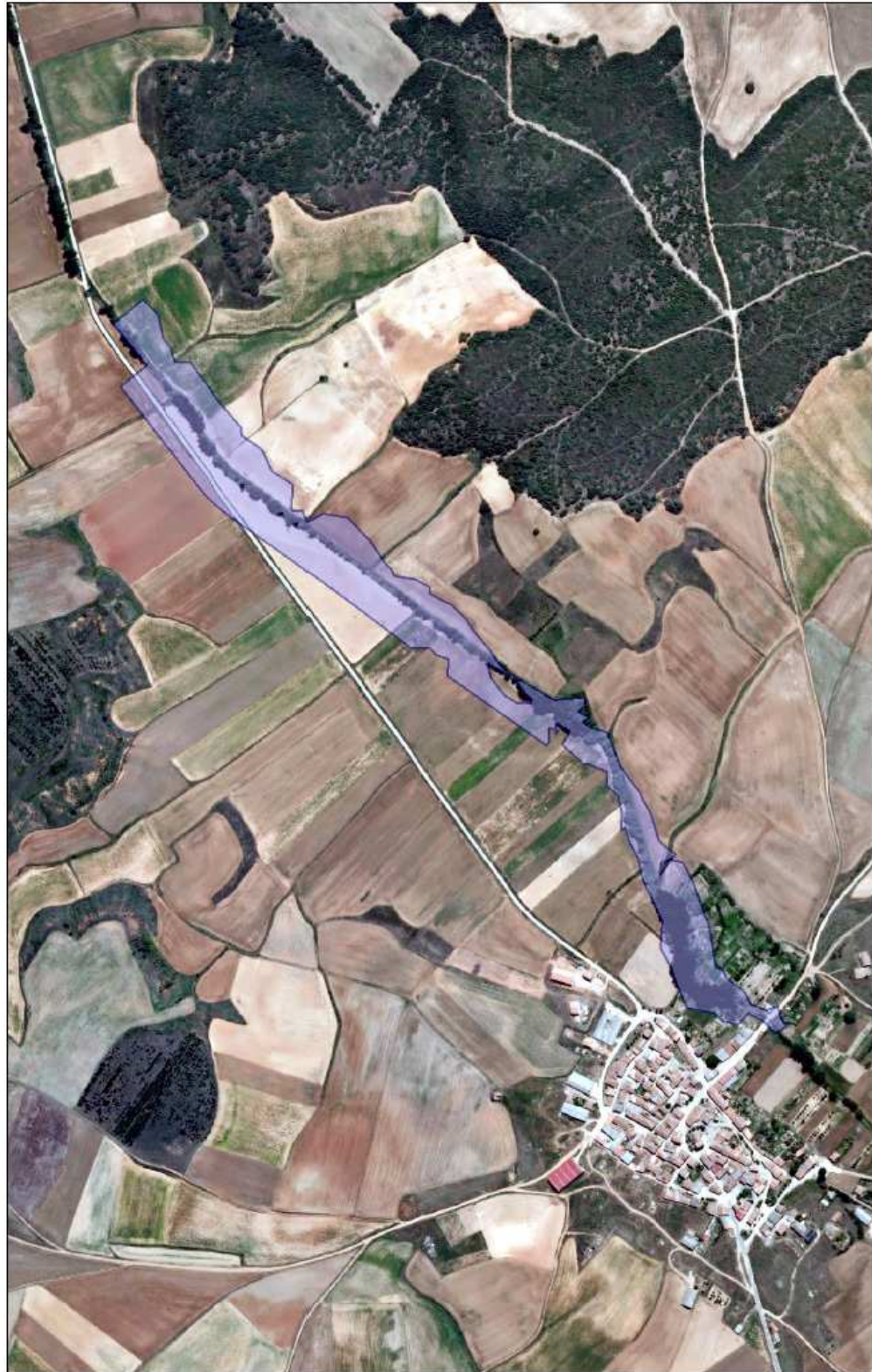
**LÁMINA DE INUNDACIÓN Q25  
MODELO DATOS LIDAR**



**LÁMINA DE INUNDACIÓN Q100  
MODELO DATOS LIDAR**



**LÁMINA DE INUNDACIÓN Q500  
MODELO DATOS LIDAR**



0 75 150 300 450 600 750  
Metros



# MAPA DE CALADOS Q2

MODELO DATOS GPS





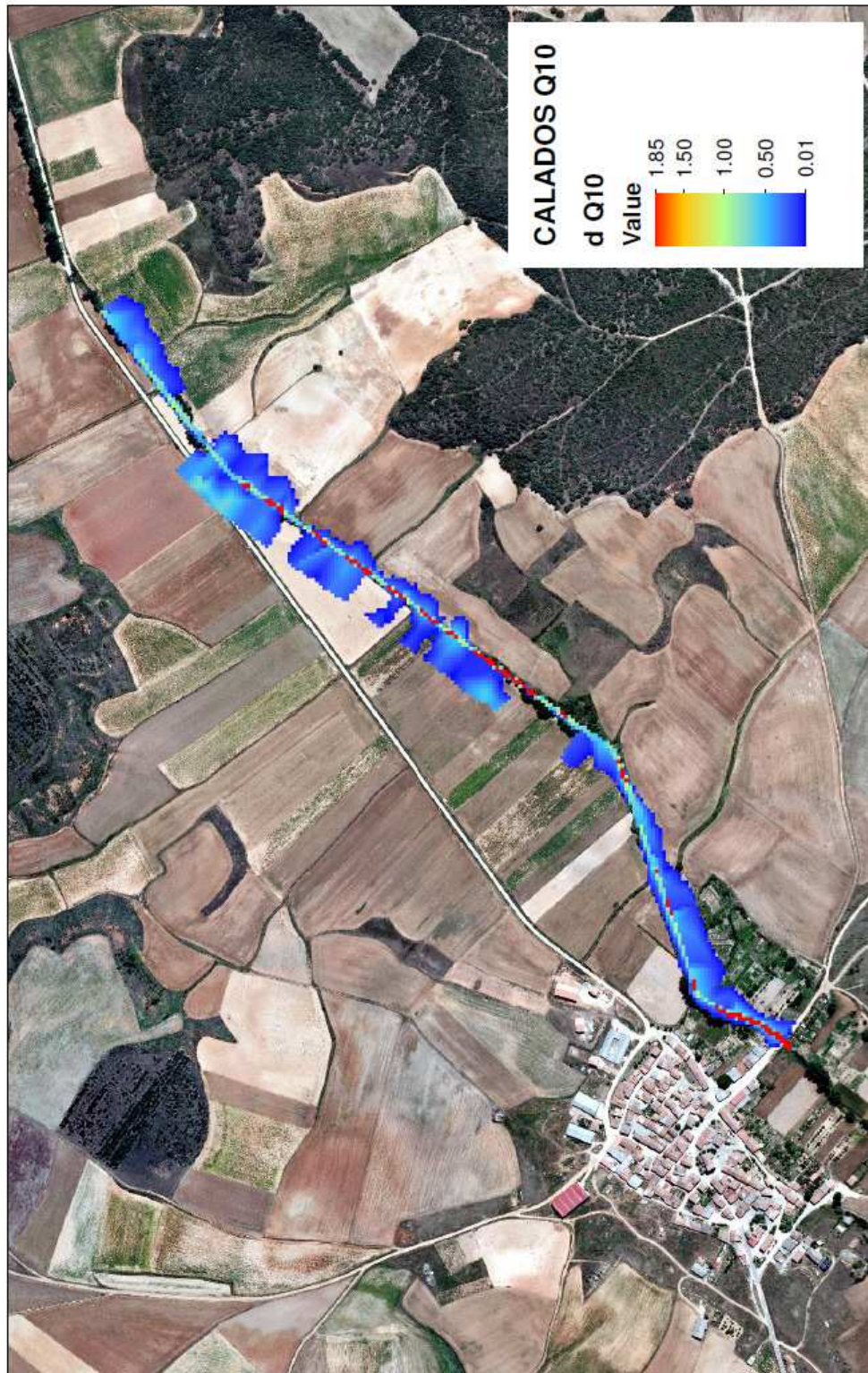
# MAPA DE CALADOS Q5

MODELO DATOS GPS





**LÁMINA DE INUNDACIÓN Q10**  
MODELO DATOS GPS







# MAPA DE CALADOS Q25

MODELO DATOS GPS





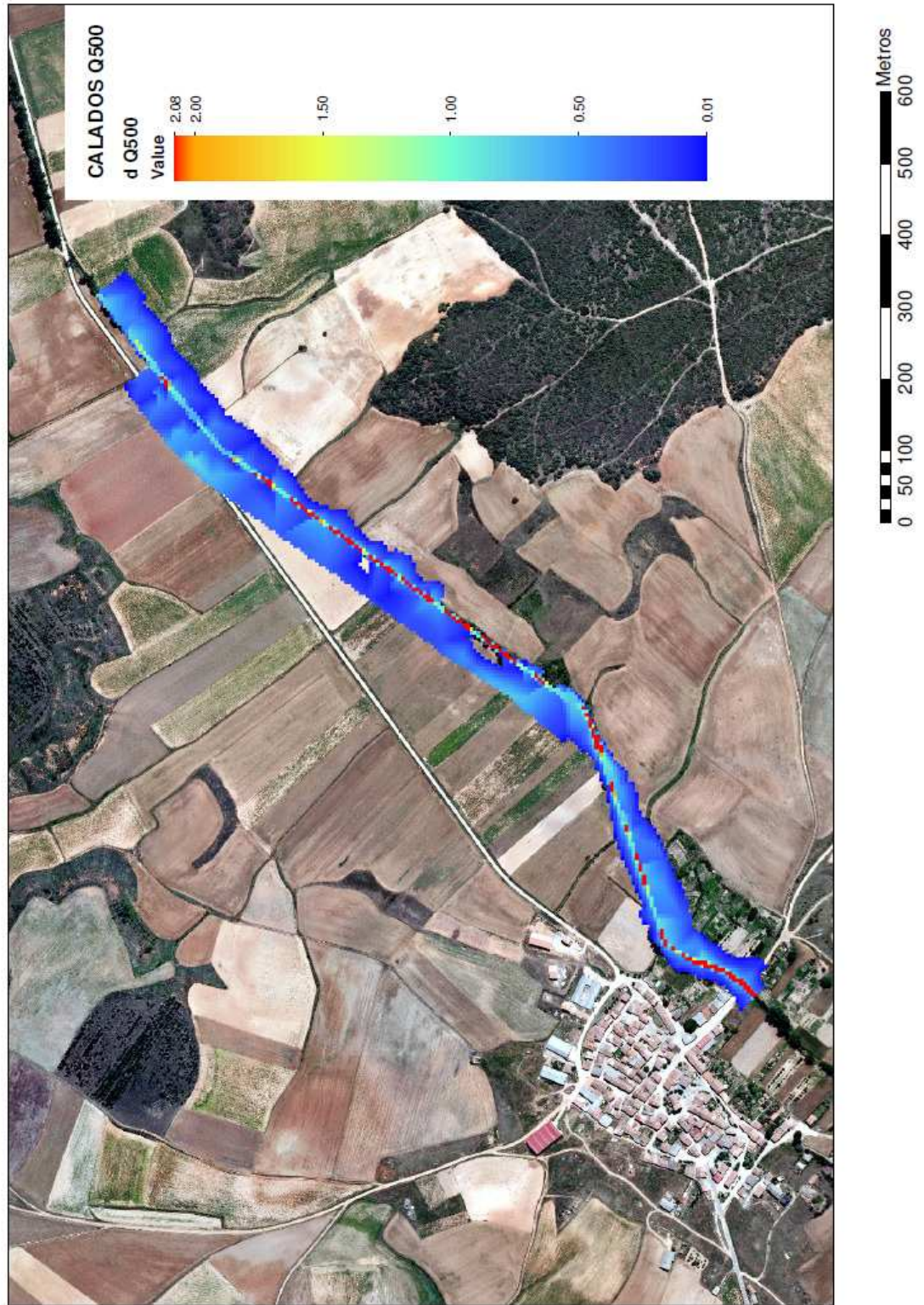
# MAPA DE CALADOS Q100

MODELO DATOS GPS



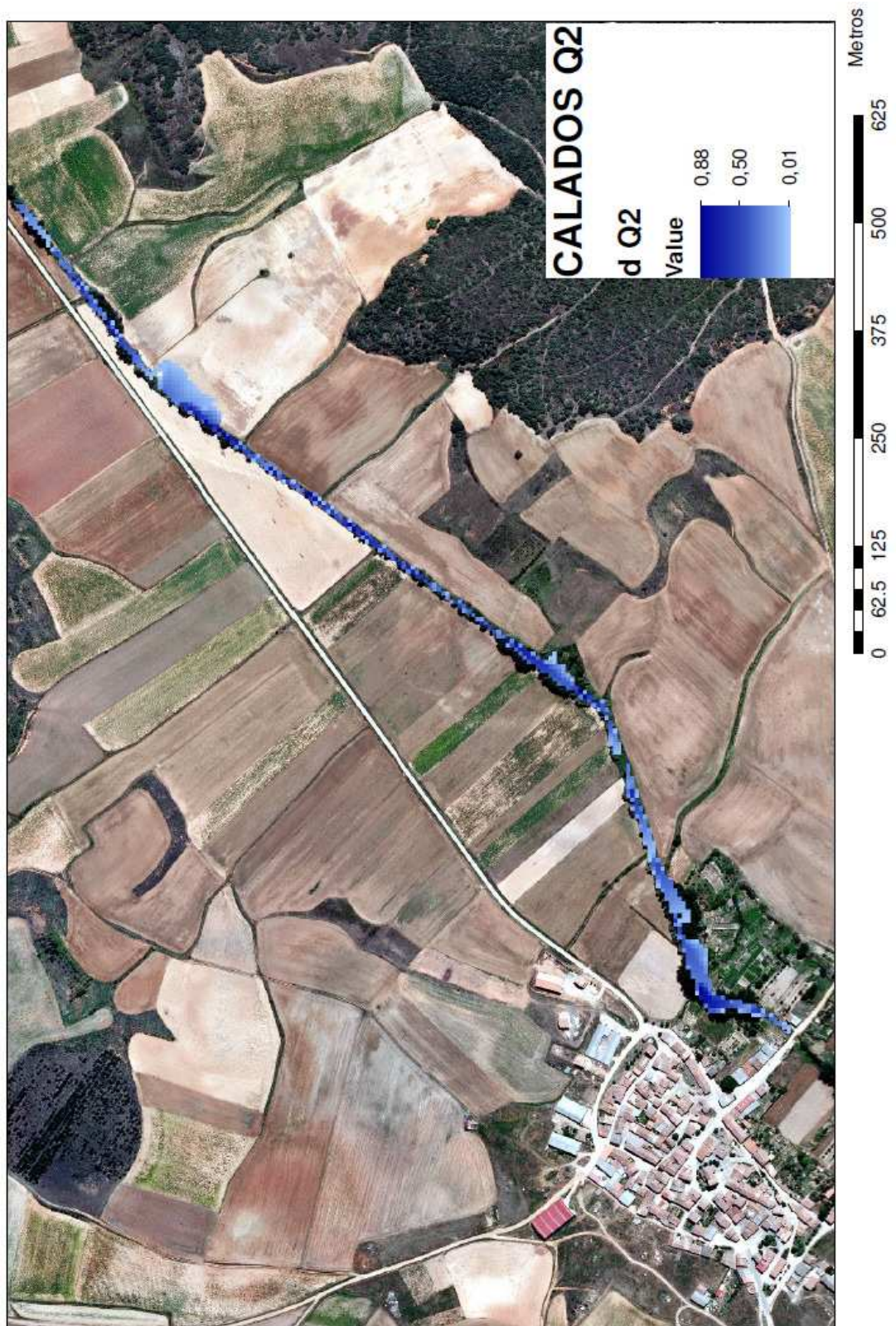


**MAPA DE CALADOS Q500**  
MODELO DATOS GPS



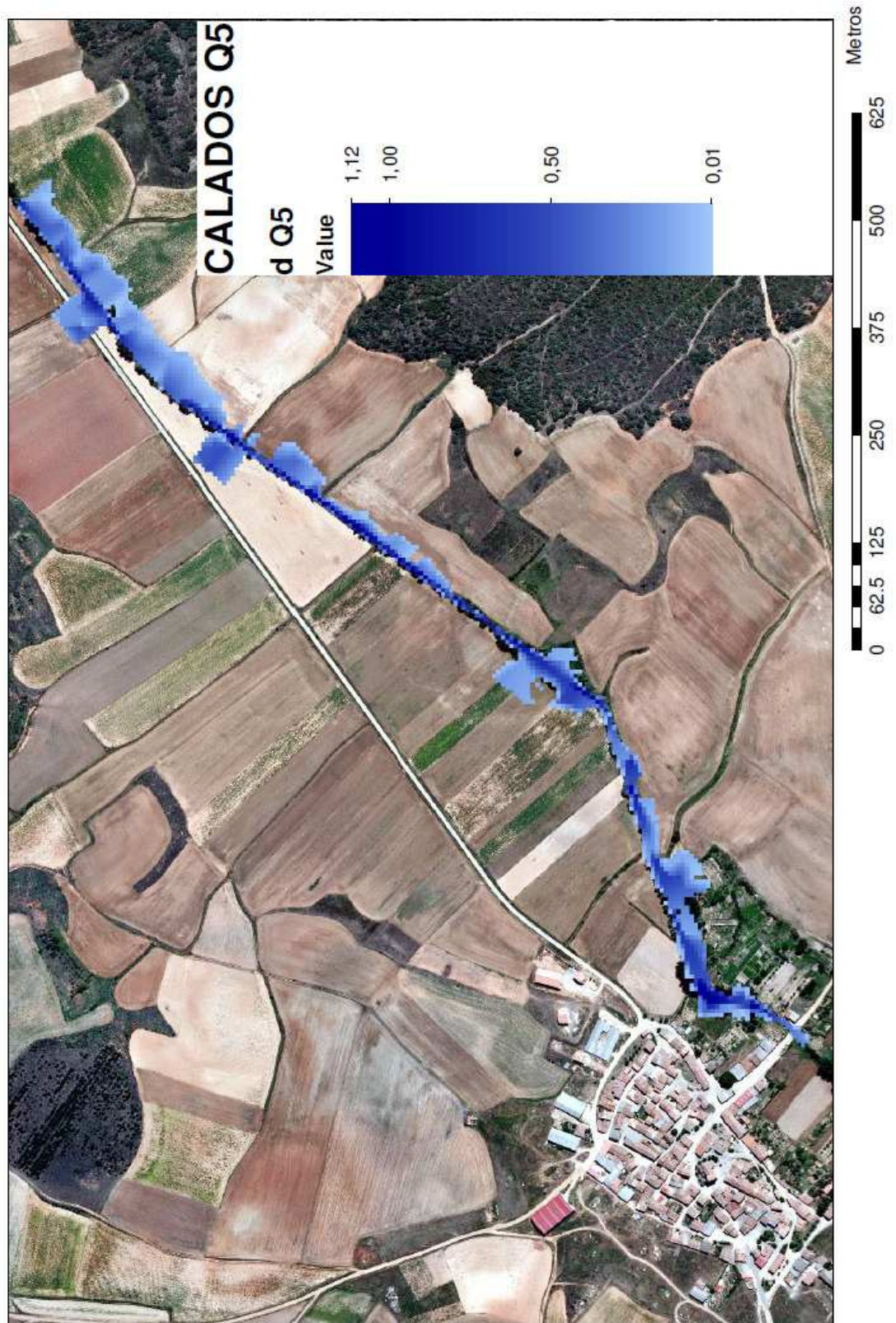


**MAPA DE CALADOS Q2  
MODELO DATOS LIDAR**



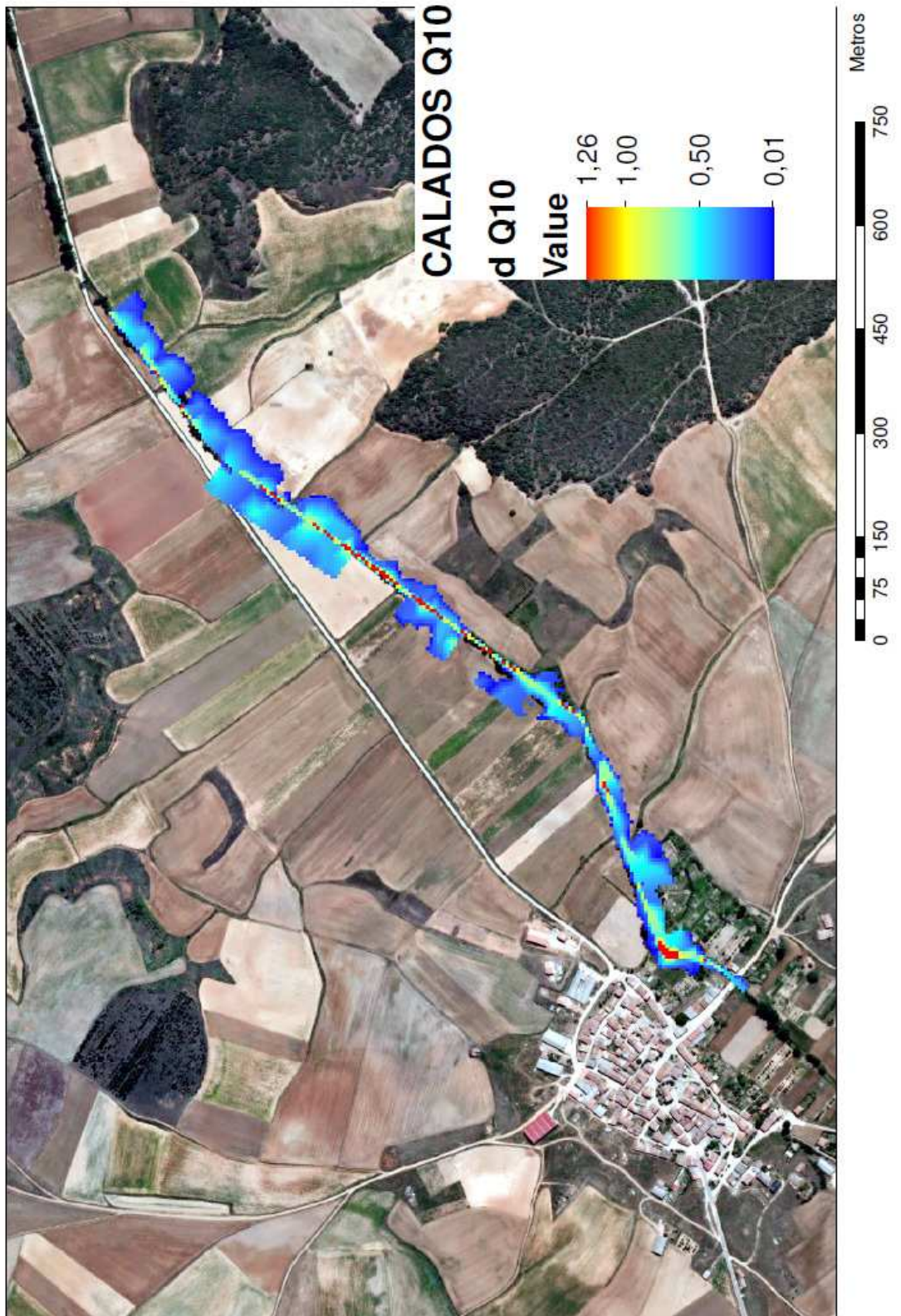


**MAPA DE CALADOS Q5  
MODELO DATOS LIDAR**



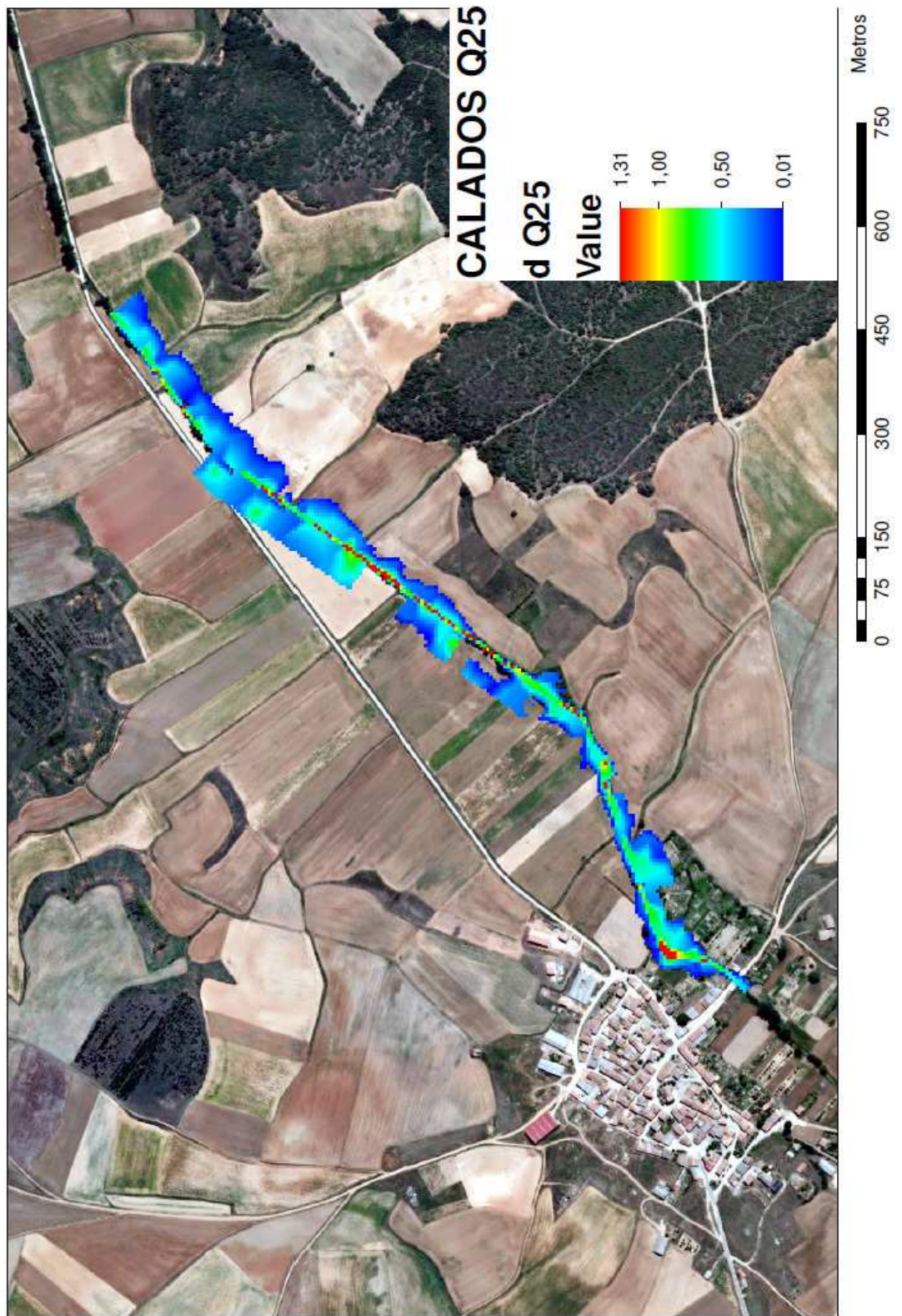


**MAPA DE CALADOS Q10  
MODELO DATOS LIDAR**

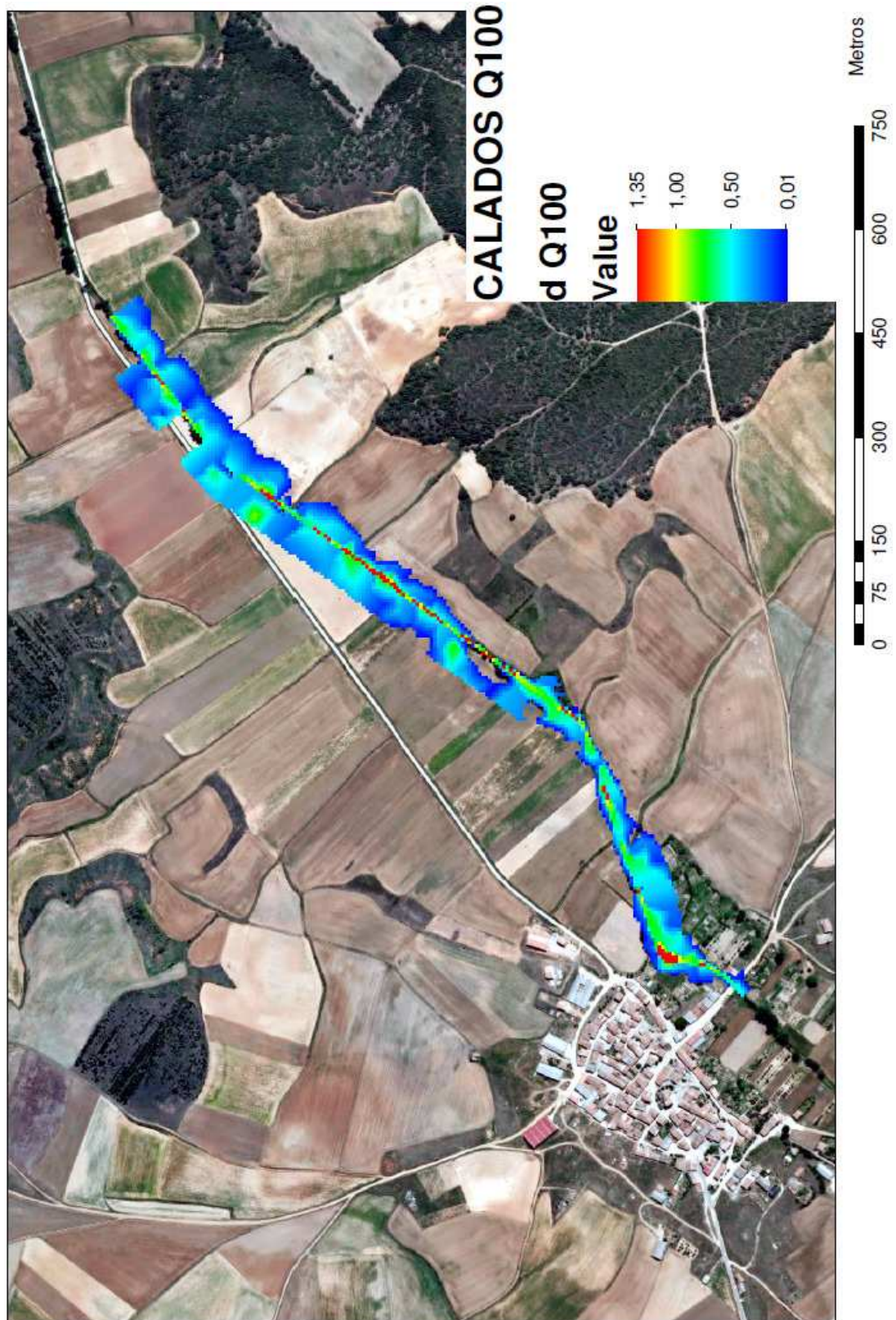




**MAPA DE CALADOS Q25  
MODELO DATOS LIDAR**



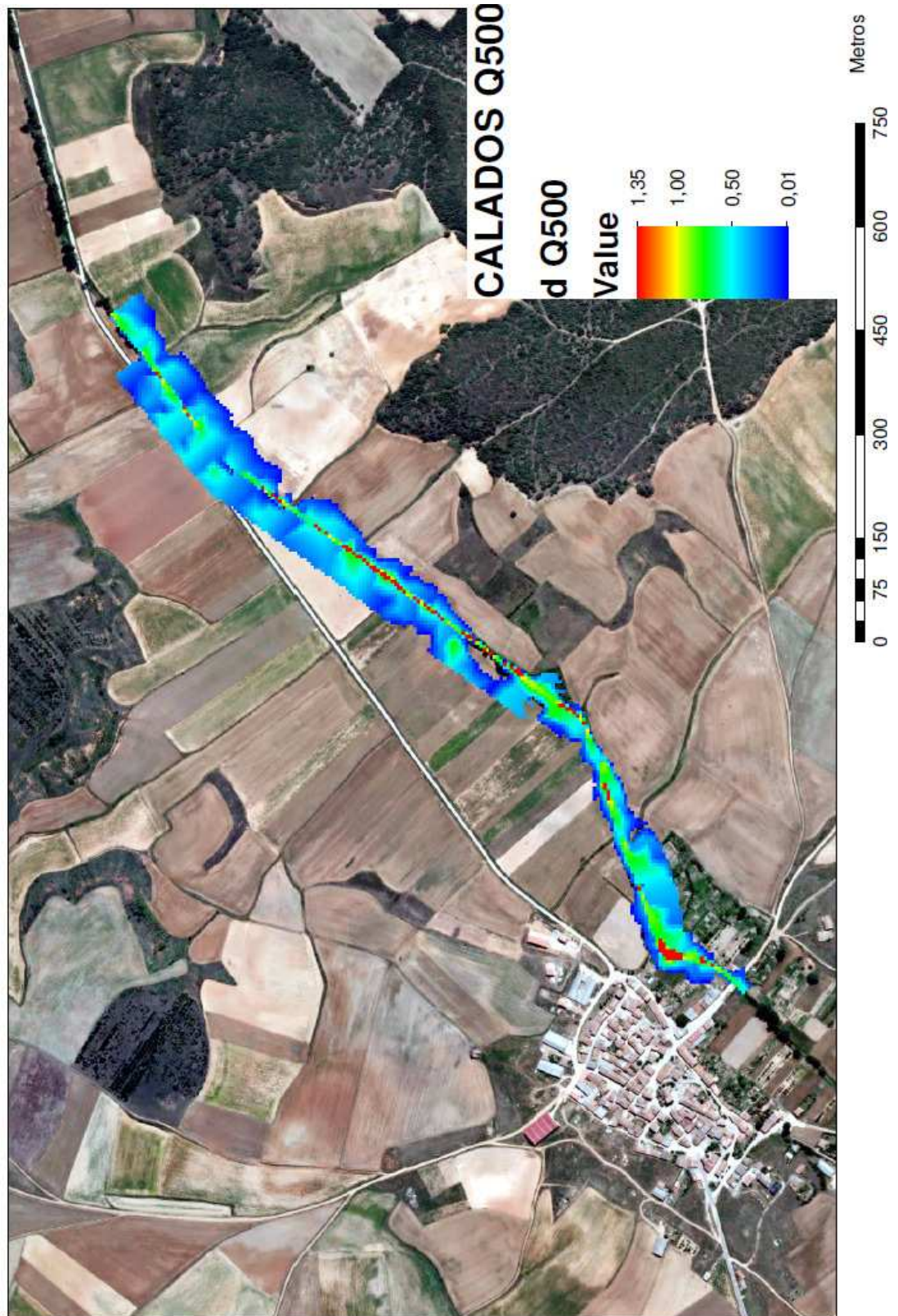
**MAPA DE CALADOS Q100  
MODELO DATOS LIDAR**





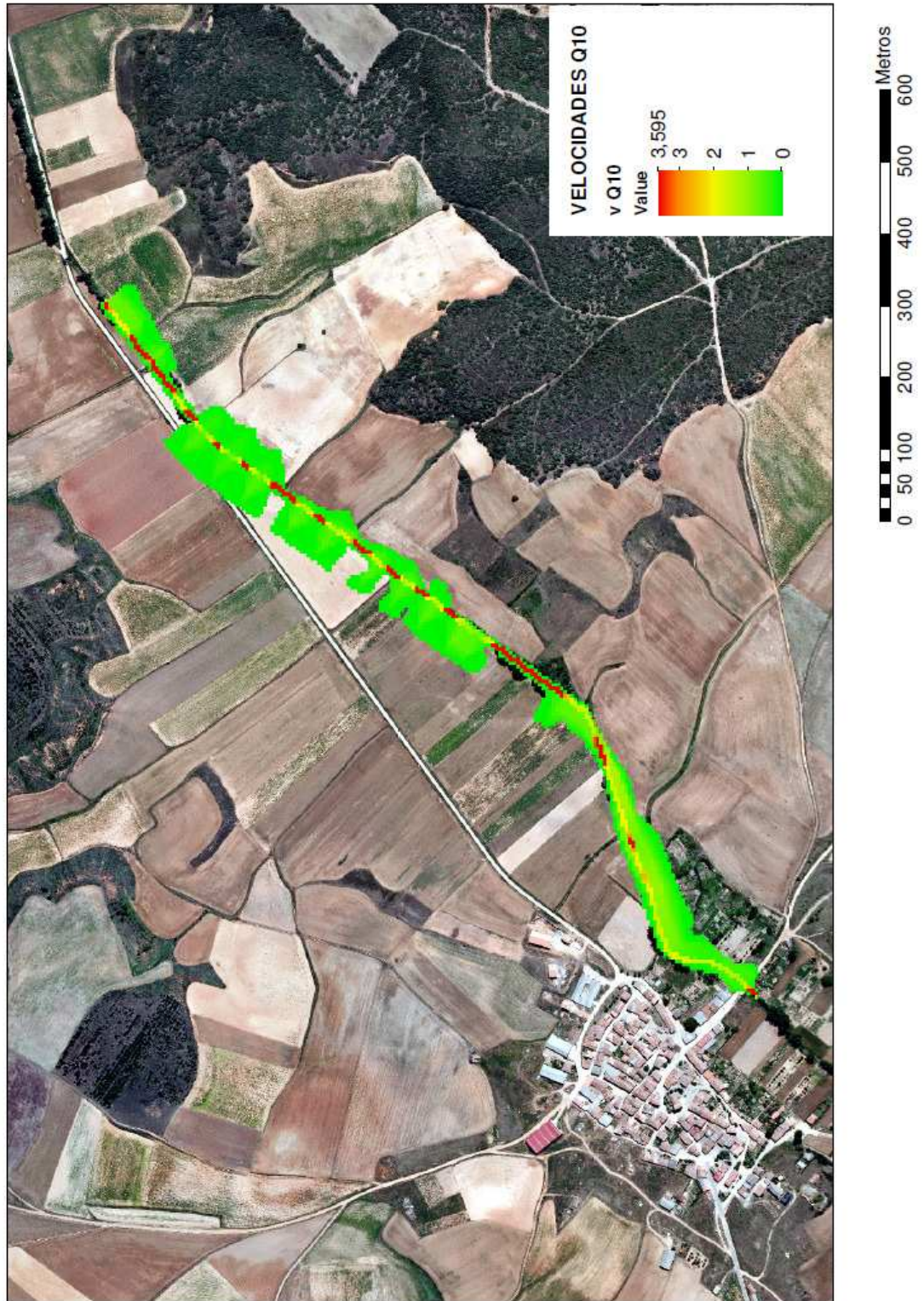


**MAPA DE CALADOS Q500  
MODELO DATOS LIDAR**

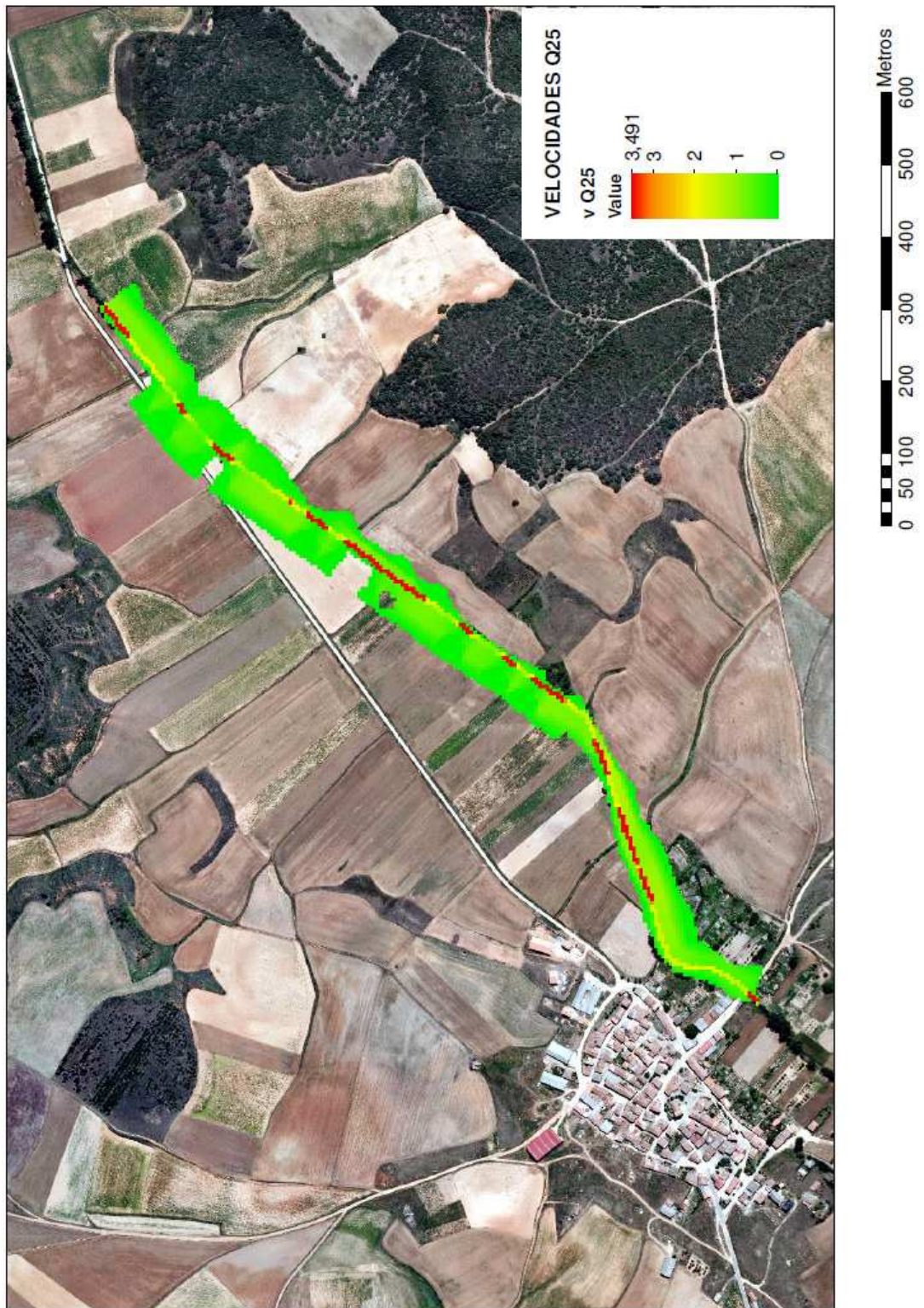




**MAPA DE VELOCIDADES Q10**  
MODELO DATOS GPS

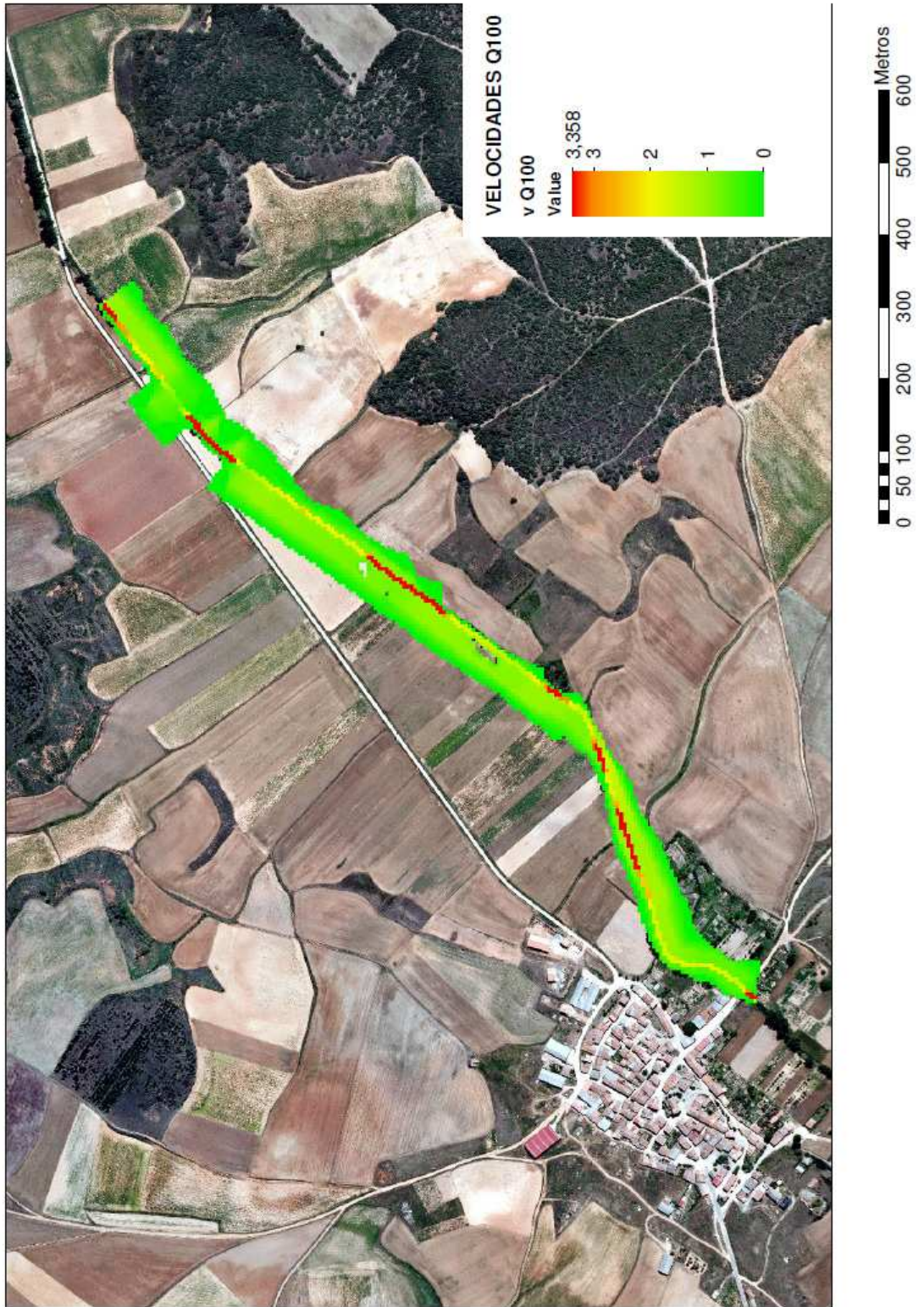


**MAPA DE VELOCIDADES Q25**  
MODELO DATOS GPS





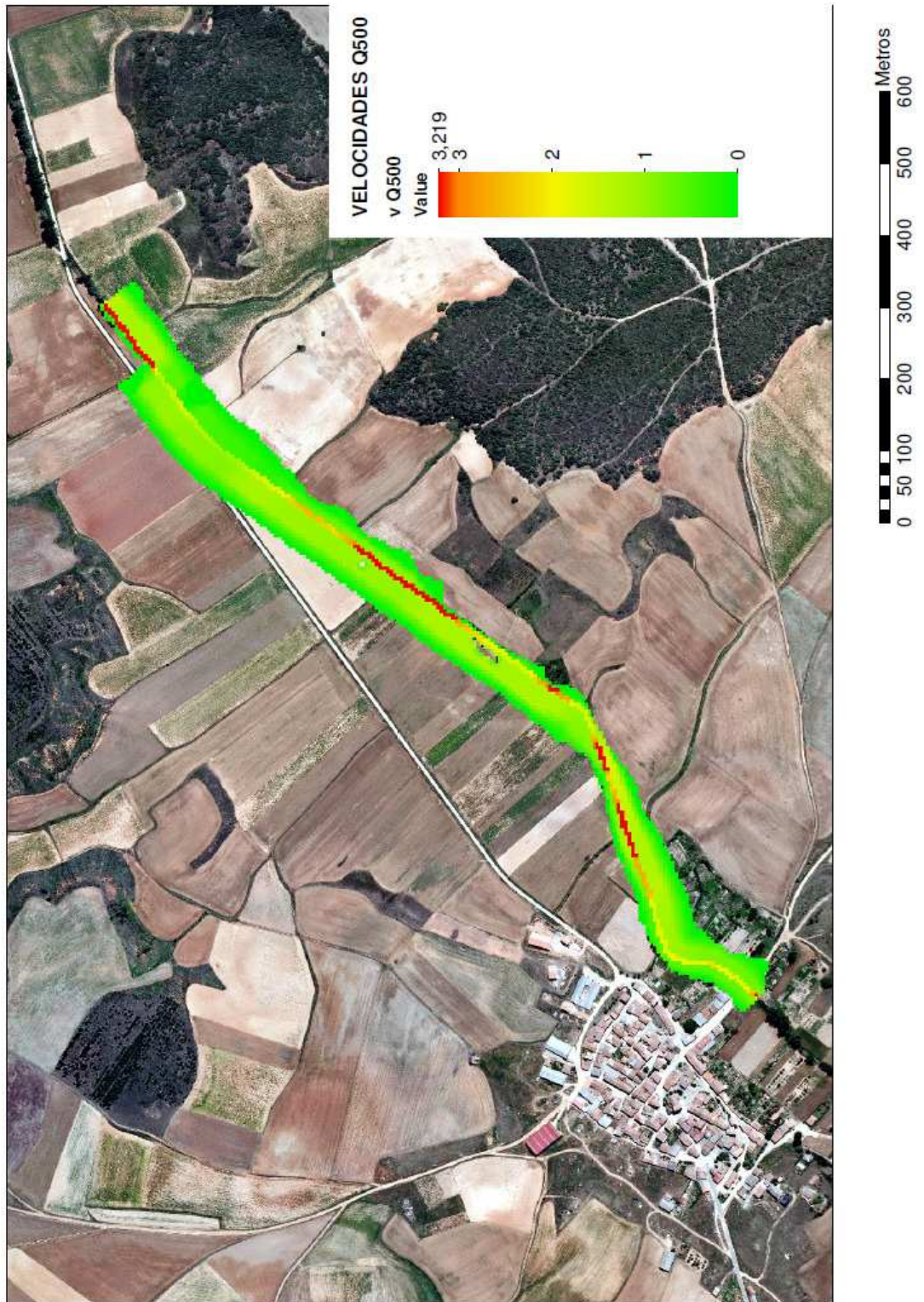
**MAPA DE VELOCIDADES Q100**  
MODELO DATOS GPS





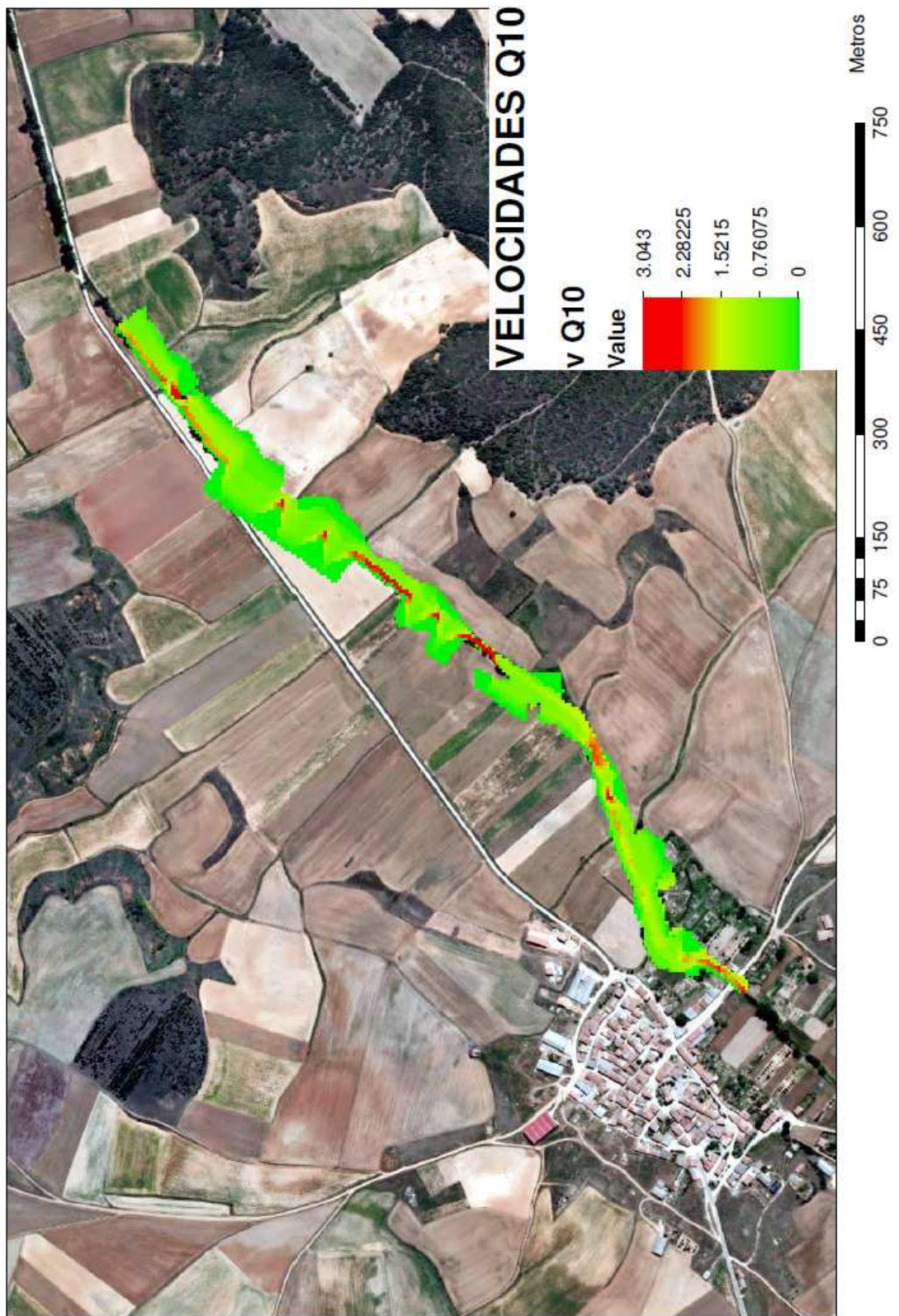
# MAPA DE VELOCIDADES Q500

MODELO DATOS GPS



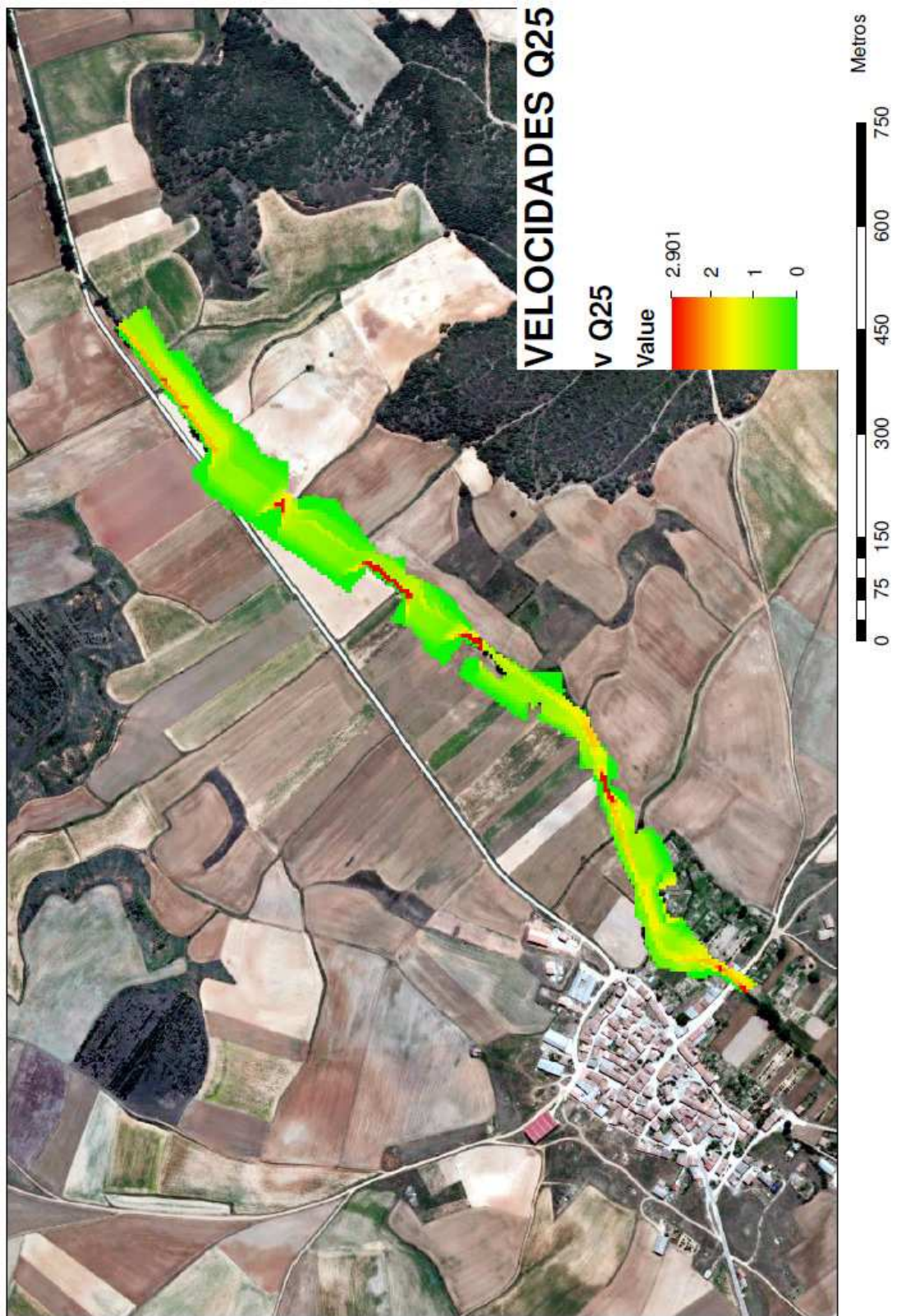


**MAPA DE VELOCIDADES Q10  
MODELO DATOS LIDAR**

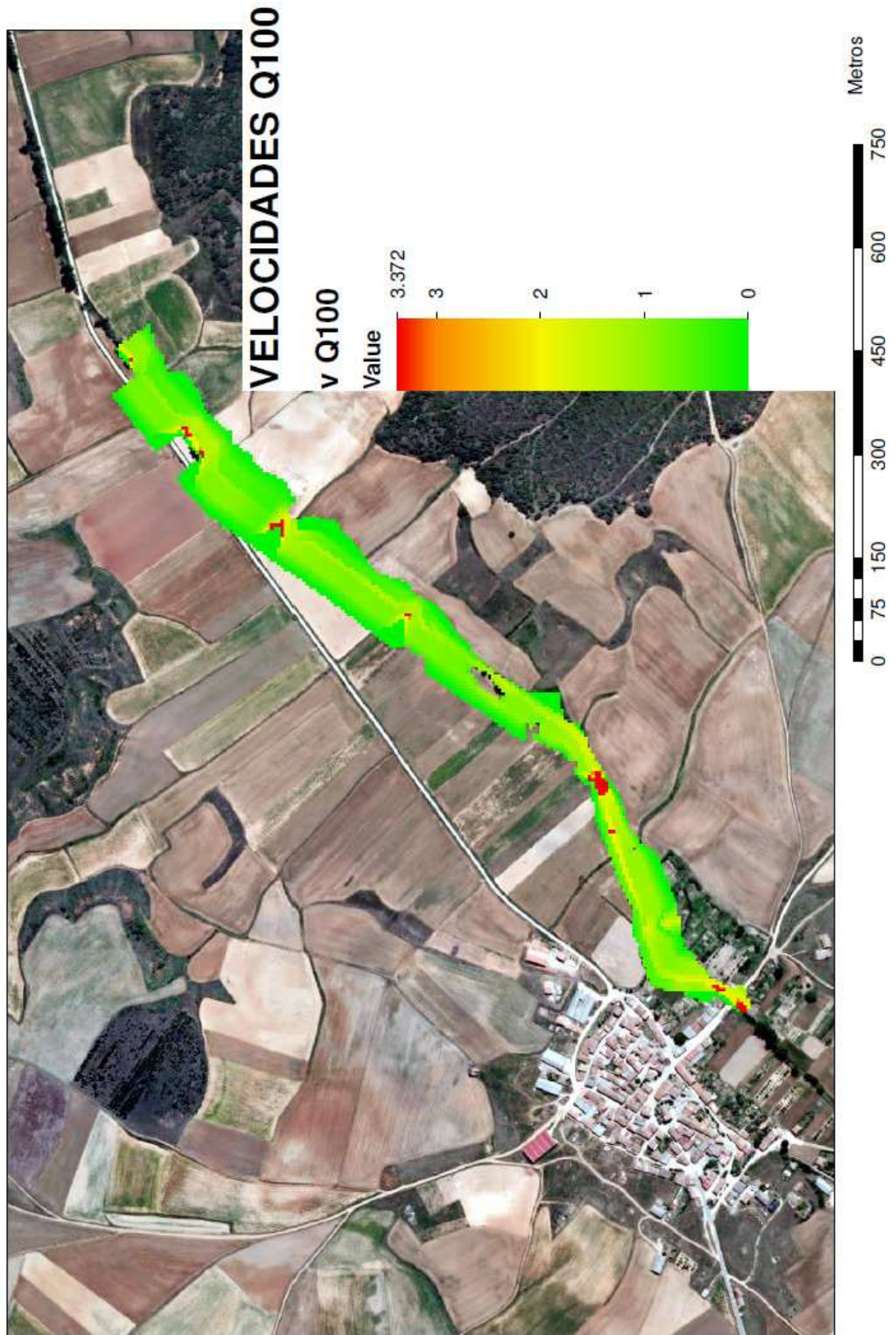




**MAPA DE VELOCIDADES Q25  
MODELO DATOS LIDAR**

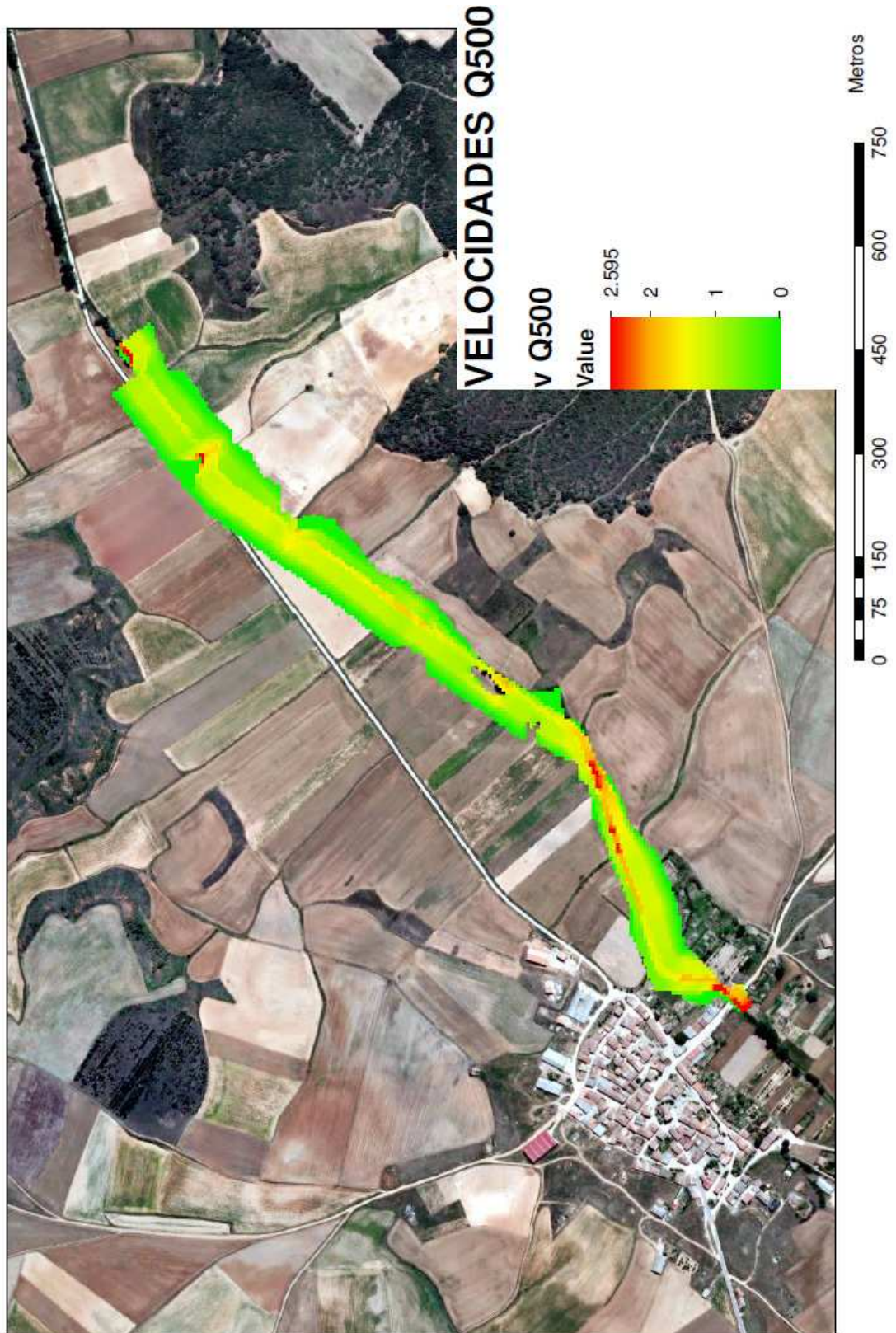


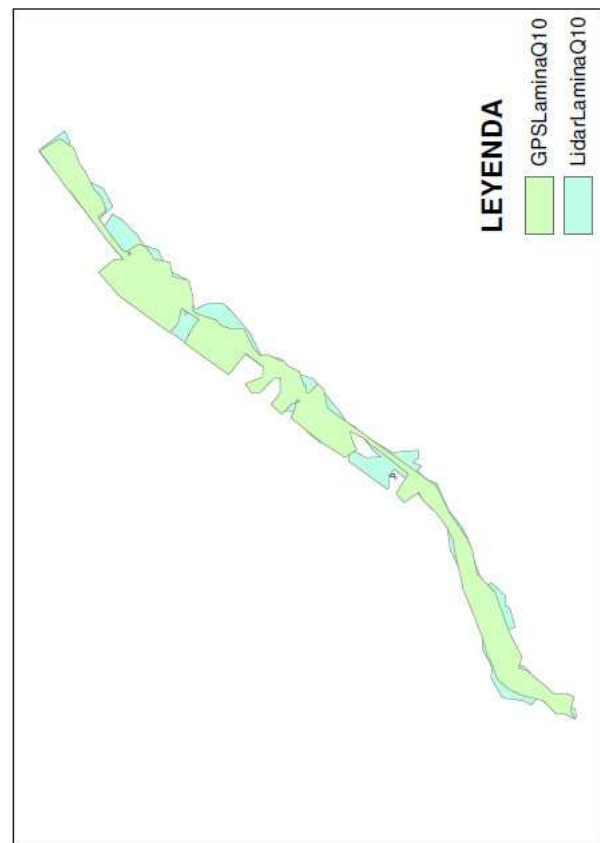
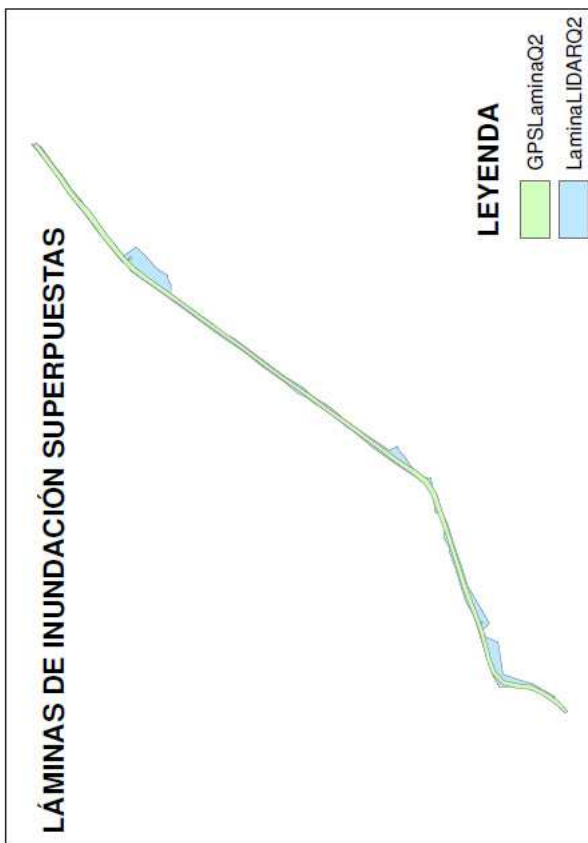
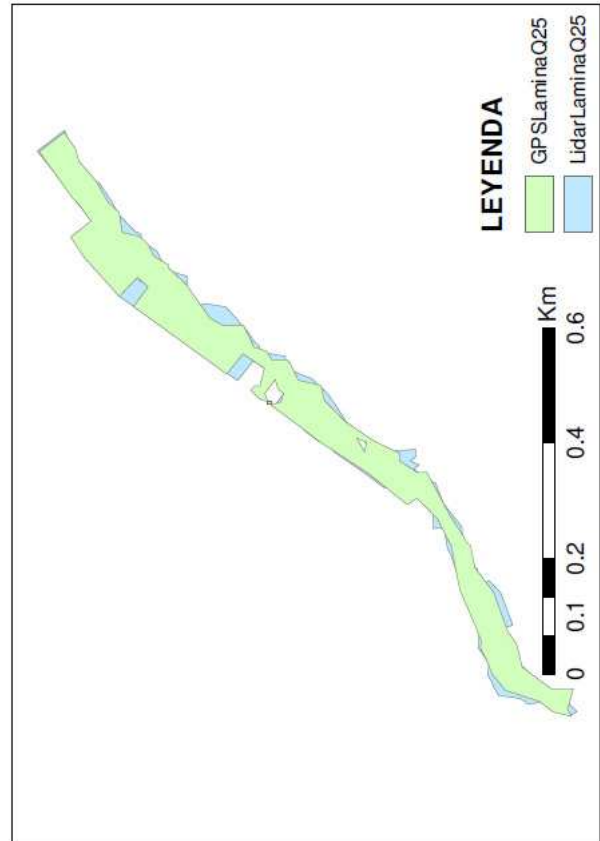
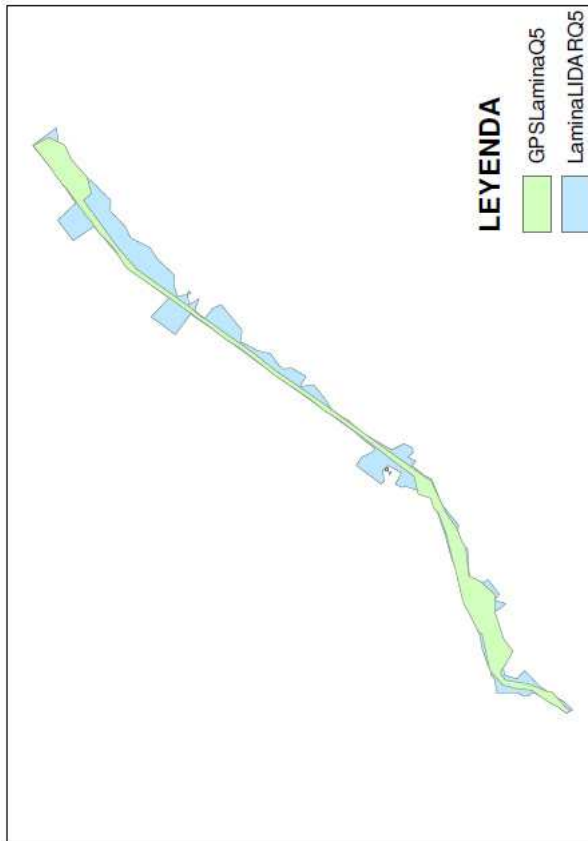
**MAPA DE VELOCIDADES Q100  
MODELO DATOS LIDAR**





**MAPA DE VELOCIDADES Q500  
MODELO DATOS LIDAR**







### LÁMINAS DE INUNDACIÓN SUPERPUESTAS



