

LIDAR vs. FOTOGRAMETRÍA EN LA OBTENCIÓN DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIONES PARA ESTUDIOS HIDROLÓGICOS.



UNIVERSIDAD
DE SALAMANCA

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA.
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ÁVILA

PROYECTO FIN DE MASTER.
MASTER EN GEOTECNOLOGÍAS CARTOGRÁFICAS PARA LA INGENIERÍA
Y LA ARQUITECTURA.

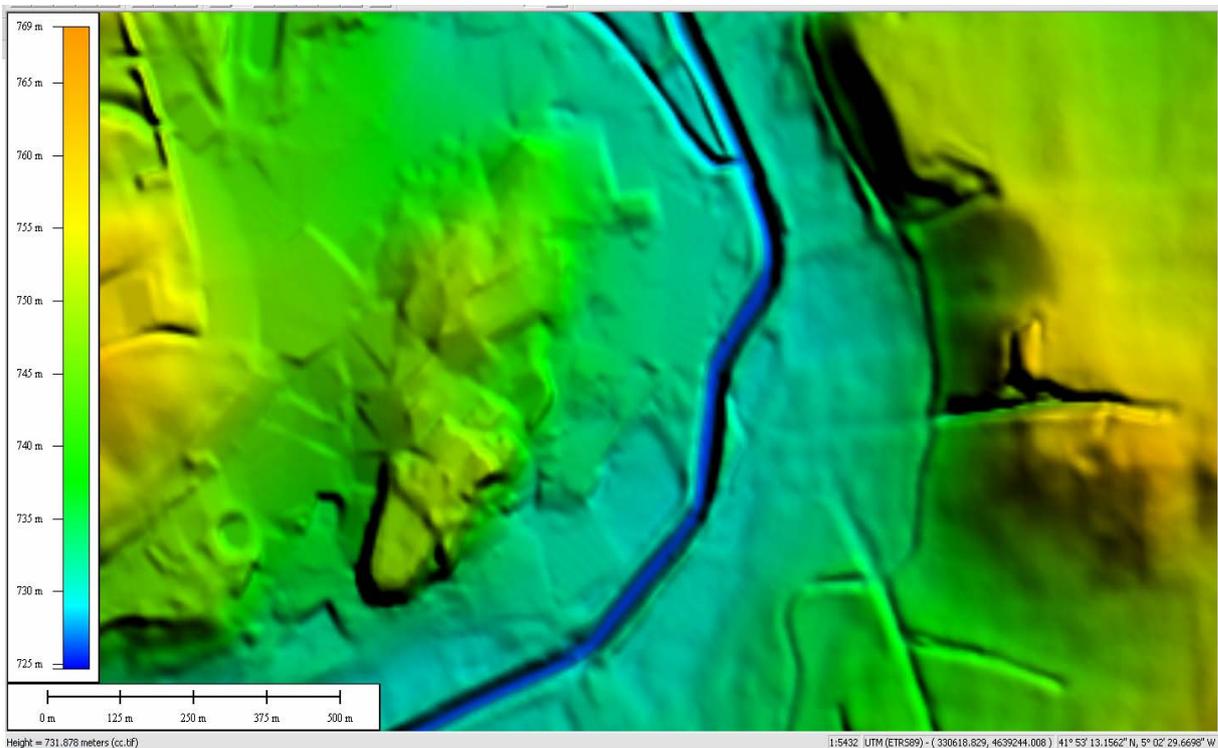
ÓSCAR ODÓN RODRÍGUEZ RICO

SEPTIEMBRE DE 2009

Modelo Digital del Elevaciones de origen LIDAR. Núcleo urbano de Medina de Rioseco.



Modelo Digital del Elevaciones de origen Fotogrametría. Núcleo urbano de Medina de Rioseco.



Agradecimientos.

Desarrollar este proyecto ha sido una labor muy instructiva e interesante, he tenido que conjugar varias disciplinas, por un lado las cartográficas, y por otro las hidráulicas y las informáticas, lo que lo ha convertido en un auténtico estudio cartográfico para la ingeniería. He tenido el privilegio de tener varios consultores, y es a ellos a los que debo un agradecimiento especial: María González Corral y Carolina Muñoz, compañeras de trabajo, que han sido de especial ayuda en todos los temas de hidráulica; David Nafria, quien siempre me ha orientado con sus oportunas y útiles indicaciones; Javier José García Cruz, quien ha puesto sus conocimientos CAD a mi disposición. Terrasolid e Inclam que me han prestado gratuitamente las licencias de sus programas.

Este proyecto es una parte del master en Geotecnologías Cartográficas para la Ingeniería y la Arquitectura, el cual he podido cursar gracias a los acuerdos establecidos entre el Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León y la Universidad de Salamanca, y además debo una especial mención a la subdirección de Infraestructuras Agrarias del Instituto, por el apoyo que me ha ofrecido.

Realizar un master necesita de mucho tiempo y bastante sacrificio personal, el cual es más intenso cuando se compatibiliza con un trabajo, pues ese tiempo necesario se obtiene del tiempo libre y del ocio. Por ello, debo hacer una especial mención a Carmen, quien ha soportado con mucho cariño hacia mí, todas las horas de compañía que te he robado a lo largo de estos 12 meses, porque cuando te veía era cuando paraba de hacer las tareas y ya estaba muy cansado, y porque hacías todas las tareas domésticas que eran de mi obligación gratuitamente.

1. Introducción.
2. Antecedentes.
 - 2.1 PNOA
 - 2.2 Directivas y normativas.
 - 2.3 LIDAR.
 - 2.4 Situación actual.
 - 2.4.1 Datos
 - 2.4.2 Software y Modelo de análisis.
3. Objetivos.
4. Material y Métodos.
 - 4.1 El modelo digital del terreno obtenido por técnica de Fotogrametría.
 - 4.1.1 Especificaciones y consideraciones técnicas de la obtención del MDT, PNOA.
 - 4.1.2 Consideraciones técnicas.
 - 4.1.3 Especificaciones para la obtención de la cartografía.
 - 4.1.4 Composición de Modelo digital del terreno clásico
 - 4.2 LIDAR.
 - 4.2.1 Las características técnicas del vuelo.
 - 4.2.2 Los medios técnicos del vuelo.
 - 4.2.3 La descripción del vuelo realizado.
 - 4.2.4 El procesado geométrico de los datos.
 - 4.2.5 Obtención de datos en altitud ortométrica.
 - 4.2.6 Clasificación de los datos.
 - 4.2.7 Generación de superficies y Modelos digitales del terreno.
 - 4.3 Software.
 - 4.3.1 El Hec-RAS.
 - 4.3.2 El Guad_2D.
 - 4.4 Consideraciones de Matemática Hidráulica
 - 4.4.1 Régimen variable de una dimensión.
 - 4.4.2 Régimen cuasi-bidimensional.
 - 4.4.3 Régimen variable en dos dimensiones.
 - 4.4.4 La técnica de los volúmenes finitos
 - 4.5 Descripción Geográfica del área donde se pretende realizar el estudio y las simulaciones.
 - 4.5.1 Consideraciones hidrológicas.
 - 4.5.2 Consideraciones climáticas.
 - 4.5.3 Consideraciones geomorfológicas.
 - 4.5.4 Consideraciones edafológicas.
5. Diseño y explicación del Método empleado.
6. Comparativas y Resultados
 - 6.1 Comparativas geométricas entre los tipos de datos.
 - 6.1 Comparación de la lámina de agua.
 - 6.1.2 Diferencias de área de la lámina de agua.
 - 6.1.2 Diferencia de longitud en el perfil transversal de la lámina.
 - 6.1 Análisis de los calados.
 - 6.1 Otros análisis, no sistemáticos.
 - 6.1.1 Análisis con datos de alta densidad.
7. Las láminas de inundación.
8. Conclusiones finales.
9. Bibliografía. 10. Mapas de las llanuras de inundación.

Relación de gráficos, tablas y ecuaciones referenciadas en el documento.

Croquis.

Nº.	Concepto	Epígrafe
1	Emplazamiento de la balsa Esla-Carrión.	4
2	Emplazamiento del vuelo LIDAR.	4.2
3	Distribución de los puntos donde se analiza el calado	6.3

Ecuaciones.

Nº.	Concepto	Epígrafe
1	Ecuaciones de Saint Venant para modelos unidimensionales I	4.4.1
2	Ecuaciones de Saint Venant para modelos unidimensionales II	4.4.1
3	Ecuaciones de Saint Venant para modelos cuasi-bidimensional	4.4.2
4	Ecuación de las llanuras de inundación en el modelo cuasi-bidimensional.	4.4.2
5	Ecuaciones de Saint Venant en notación vectorial para modelos bidimensional	4.4.3.
6	Desarrollo de los términos de la ecuación de Saint Venant en notación vectorial para modelos bidimensionales.	4.4.3.
7	Desarrollo de las ecuaciones de Saint Venant para volúmenes finitos.	4.4.4
8	Desarrollo de las ecuaciones de Saint Venant para volúmenes finitos.	4.4.4
9	Desarrollo de las ecuaciones de Saint Venant para volúmenes finitos.	4.4.4

Tablas

Nº.	Concepto	Epígrafe
1	Características de la balsa Esla-Carrión.	4
2	Especificaciones técnicas para el MDT del PNOA.	4.1.2
3	Características técnicas del vuelo LIDAR.	4.2.1
4	Cantidad y de Densidad de datos por alturas de vuelo.	4.2.3
5	Cantidad y Densidad de datos obtenidos a vuelo 1000 m.	4.2.3
6	Análisis de la densidad dentro de la misma pasada.	4.2.3
7	Resultados del procesado geométrico de ajuste entre pasadas del LIDAR.	4.2.4
8	Tablas de estadísticas de aforos del río Sequillo en Medina de Rioseco.	4.5.1
9	Tabla de caudales de la estación de aforos del río Sequillo en Rioseco.	4.5.1
10	Temperaturas medias, de la comarca de Tierra de Campos.	4.5.2
11	Precipitaciones de la comarca de Tierra de Campos.	4.5.2
12	Relación de procesados realizado.	6
13	Estadísticas de comparación geométrica entre el LIDAR y el MDT.	6.1
14	Áreas de la lámina de inundación	6.2.1
15	Diferencias entre los el calculo de áreas de la lámina de inundación.	6.2.1
16	Diferencias de longitud en los perfiles de la lámina de inundación I.	6.2.2.
17	Diferencias de longitud en los perfiles de la lámina de inundación II.	6.2.2.
18	Relación de la diferencias de calado (I).	6.3
19	Relación de la diferencias de calado (II).	6.3
20	Relación de área con Dambreak.	6.4.1
21	Áreas con Hec_Ras en datos de 1x1.	6.4.1

Gráficos.

Nº.	Concepto	Epígrafe
1	Breaklines	4.1.2
2	MDT en tintas hipsométricas	4.1.2
3	T.I.N. (Triangulated Irregular Network)	4.1.2
4	MDT en tintas hipsométricas, con aspecto de relieve.	4.1.3
5	Imágenes de Cartografía 1:5000 Hojas E5-0343-7-4	4.1.3
6	Imágenes de Cartografía 1:1000. Sector de casco urbano de Lomoviejo, Valladolid.	4.1.3
7	MDT con construcciones en tintas hipsométricas, con aspecto de relieve.	4.1.4
8	Distribución de las pasadas en el vuelo LIDAR.	4.2.2
9	Vista lateral de datos LIDAR brutos.	4.2.6
10	Vista de puntos Terreno.	4.2.6
11	Vista de puntos sobre construcciones.	4.2.6
12	Vista de puntos de vegetación alta.	4.2.6
13	Vista de puntos sobre muros y cerramientos.	4.2.6
14	Vista de puntos sobre fachadas.	4.2.6
15	LIDAR clasificado.	4.2.7
16	LIDAR clasificado sobre ortofoto.	4.2.7
17	LIDAR en tintas hipsométricas sin construcciones.	4.2.7
18	LIDAR en tintas hipsométricas con construcciones.	4.2.7
19	Modelo 3D con terreno y construcciones.	4.2.7
20	Vistas de las herramientas Guad_2D.	4.3.2.
21	Lecho mayor del río Sequillo.	4.5.1
22	Cuenca hidrográfica del Río Sequillo, en tintas hipsométricas y ortofoto.	4.5.1
23	Imagen digital PNOA_CyL_NW_25cm área de Medina de Rioseco.	6.1
24	Resta del LIDAR respecto del MDT, en escala de grises II.	6.1
25	Resta del LIDAR respecto del MDT, en escala de grises II.	6.1
26	Ortofoto.	6.1
27	Resta del LIDAR respecto del MDT, en color RGB (I) y ortofoto.	6.1
28	Resta del LIDAR respecto del MDT, en color RGB (II).	6.1
29	Resta del LIDAR respecto del MDT, en escala de grises (III)	6.1
30	Croquis de la distribución de los perfiles.	6.2.2
31	Láminas obtenidas con Hec_Ras y datos de densidad 1x1 en LIDAR y MDT.	7
32	Láminas obtenidas con Hec_Ras y Guad_2d con datos LIDAR de 2x2.	7
33	Láminas obtenidas con Hec_Ras y Guad_2d con datos 5x5.	7
34	Láminas obtenidas con Hec_Ras y Guad_2d con datos 5x5 y 2X2 en casco urbano de Villabrágima.	7
35	Láminas obtenidas con Guad_2d con datos 2X2 en casco urbano de Villabrágima.	7

1. Introducción.

La arquitectura y la ingeniería son las principales disciplinas que siempre han necesitado de los distintos productos cartográficos para elaborar sus proyectos, estudios y análisis. A medida que las tecnologías geomáticas se han ido desarrollando el uso de los productos geomáticos se ha ido incrementando, hasta el punto de que existe una dependencia creciente y cada vez más fuerte de estos productos, para la elaboración de cualquier tipo de análisis o estudio. Actualmente esa dependencia es tal que, en muchos casos, para la elaboración de los distintos proyectos, si no existe una cartografía con una precisión adecuada a la escala del estudio y un cierto rigor en la compleción de datos y simbología, el proyecto puede carecer de valía o consistencia.

Este hecho, antes mencionado, provoca que las distintas disciplinas cartográficas se vean enriquecidas con un gran número de estudios y desarrollos tecnológicos que han surgido a lo largo de la última década. Así mismo y por ello, cada vez es más intensa la presión que ejercen las distintas disciplinas, para obtener productos cartográficos que sean más precisos y variados.

Por otro lado, aunque no aisladamente, la tecnología en conjunción con las ciencias puras está constantemente tratando de mejorar y generar nuevos sensores, que sean capaces de obtener más y mejores datos, y así satisfacer las expectativas que las distintas ingenierías están demandando. Un ejemplo, hecho realidad, del planteamiento antes mencionado es el LIDAR, cuyo fundamento no es nada novedoso, ya que es un distanciómetro; pero el LIDAR, actualmente, no sólo es capaz de obtener la distancia, sino también la intensidad de la señal irradiada, el número de eco, etc. En definitiva, puede facilitarnos un conjunto de datos que permiten dar un valor añadido a la distancia. Este valor añadido permite que, al generar algoritmos matemáticos de tratamiento de la información, se puedan clasificar esos datos en función de la superficie en la que se reflejaron, lo que permite generar unos modelos digitales de terreno, vegetación, edificaciones, etc.

Actualmente el escenario es que las tecnologías son capaces de obtener infinidad de datos geomáticos, la informática de software y hardware aumenta exponencialmente

su capacidad del tratamiento de la información y a medida que pasa el tiempo las ingenierías demandan cada vez mayor realismo y precisión en los datos y, en algunos casos, demandan datos nuevos sin haber utilizado los existentes. Por consiguiente, les corresponde a las disciplinas cartográficas poner un poco de orden o establecer unas pautas de uso de cada uno de los distintos productos geomáticos.

En virtud del escenario antes dibujado, este proyecto pretende desarrollar una modesta comparativa en torno a las diferencias que puedan derivarse respecto del uso de modelos digitales del terreno, comparando los obtenidos por técnicas de fotogrametría y los obtenidos mediante técnicas LIDAR para aplicaciones hidrológicas.

Aunque más adelante se comentará detalladamente, la razón que motiva la realización de este análisis en torno a los modelos digitales del terreno, estriba en que para todo país miembro de la Unión Europea, la directiva 2007/60/CE obliga a realizar análisis de inundación en todas las cuencas y obras hidráulicas, con el objetivo de evaluar y reducir los riesgos de inundaciones y sus afecciones a la salud humana, el medio ambiente, los bienes y las actividades económicas. En consecuencia, sobre este hecho se está fundamentando la necesidad de obtener un LIDAR de todo el territorio nacional, por parte de algunos organismos de la Administración General del Estado.

Independientemente de los resultados y conclusiones que se obtengan, considero necesario establecer ya desde el principio que este proyecto no tiene animadversión hacia ninguno de los sistemas para la obtención del Modelos digitales de elevaciones, sino que pretende mostrar la idoneidad de los distintos métodos de obtención de un modelo digital del terreno para la realización de estudios hidráulicos.

2. Antecedentes.

Este apartado pretende comentar cual es la situación social, legal, tecnológica y cartográfica en la que se circunscribe esta comparativa.

En los últimos 5 años los modelos digitales del terreno se han popularizado bastante, a ello han contribuido varios hechos, aunque quizás el más decisivo ha sido la facilidad de acceso a esta información e incluso, en algunos casos, su gratuidad. Concretamente, en España tenemos actualmente a fecha de 2009, varias coberturas completas de modelos digitales del terreno, pero de especial calidad en relación a al resto de colecciones son las 2 últimas coberturas que se han generado, y que abarcan todo el territorio nacional. Estas 2 coberturas han sido generadas dentro del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea, El PNOA.

2.1. PNOA

La producción de ortoimágenes aéreas en España ha estado vinculada con las necesidades de la cartografía para los registros agrarios y la Política Agraria Común de la Unión Europea (PAC). Durante los años 1998 y 1999 se realizaron en toda España las primeras coberturas de ortofotografía en color en grandes áreas. En aquel momento se trabajó con cámaras de película fotográfica a escala 1:33.000, y los fotogramas fueron digitalizados en escáner fotogramétrico con resolución espacial de 0,7 metros por píxel. El objetivo fundamental del vuelo era la gestión de los registros agrarios, en especial la actualización del registro de plantaciones vitícolas.

La cobertura aérea fue completada durante los años 2000 y 2001 a través de diversos vuelos fotogramétricos con cámara de película a escala 1:30.000, realizados por los Ministerios y Consejerías de Medio Ambiente y Fomento, cuyo fin era la ordenación de montes y espacios naturales protegidos. Fue en ese momento cuando se consiguió disponer de la primera cobertura de ortofotografía completa de la mayor parte de la España, con resolución de 0,7 metros.

Durante el año 2002, con motivo de la creación del Sistema de Información Geográfica para la política Agraria Comunitaria (SIGPAC), el Fondo Español de Garantía Agraria, organismo responsable a nivel nacional de la gestión de la Política Agraria Comunitaria, se hizo cargo de la coordinación de los trabajos de producción de ortofotografía aérea de 0,50 metros de resolución para toda España. En Castilla y León el objetivo se centró en actualizar la primera cobertura de los años 1998 y 1999, mediante un vuelo con cámara de película a escala 1:30.000. Una vez finalizados los trabajos, con éxito, se dio por terminada la actualización de la cobertura de toda Castilla y León con resolución de 0,50m.

Simultáneamente, en el caso de Castilla y León, fue publicado el Plan Cartográfico de Castilla y León 2003-2008 (Decreto 55/2003, BOCYL 14 de mayo de 2003), éste establecía los objetivos de actualización de ortoimágenes para la región. Los objetivos consistían en conseguir una resolución de 0,25 metros, con una frecuencia de actualización de 5 años, y los materiales derivados deberían servir de base para la producción del Mapa Topográfico Regional 1:5.000.

El Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) nace en el año 2003 por iniciativa del Instituto Geográfico Nacional de España (IGN). La idea principal es aunar los esfuerzos de todas las administraciones involucradas en la producción de ortoimágenes digitales. Hasta ese momento cada Comunidad Autónoma, y los diferentes organismos de la Administración General del Estado, realizaban de forma independiente sus proyectos de ortofotografía, llegando a producirse en algunos casos duplicidad de trabajos. Ante esta situación el IGN propone un plan por el cual el Instituto participa en la financiación de la producción de ortofotografía, hecho que hasta ese momento realizaban las Comunidades Autónomas, a cambio de establecer unas directrices básicas comunes para todos los organismos participantes. Las directrices consistieron fundamentalmente en una resolución espacial de 0,50 metros y una frecuencia de actualización de 2 años.

Se establecieron convenios entre el IGN y todas las comunidades autónomas para realizar las ortofotos de todo el territorio nacional, con pequeños matices según las

particularidades de cada territorio, en Castilla y León eran dos coberturas una de 50 y otra de 25 cm., cada una de ellas completaba cada 4 años.

2.2. Directivas y normativas.

Durante los últimos 20 años, la Unión Europea y todos y cada uno de los países miembro, han venido desarrollando unas políticas de especial protección medioambiental muy intensas, las cuales se han traducido en leyes y normativas desarrolladas dentro de los países miembros que tienen el objetivo de regular la intervención en el medio ambiente, con el fin de proteger a éste en todas sus dimensiones: complejo vegetal, animal y antrópico. Así, , surgen las siguientes leyes:

- 1995. Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el riesgo de inundaciones.
- Orden de 12 de Marzo de 1996, por la que se aprueba el Reglamento Técnico sobre seguridad de Presas y Embalses.
- 1996. Guía técnica para la clasificación de Presas en función de su riesgo potencial.
- Real Decreto 9/2008, de 11 enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, del 11 de abril.
- 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
- Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo del 23 de Octubre de 2000. Por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.
- 2001. Guía técnica para la elaboración de Planes de Emergencia de Presas.

- 1967 Orden del 31 de marzo. Instrucción para proyectos, construcciones y explotación de grandes presas.

Todas y cada una de las distintas obras hidráulicas, que se realicen, tienen el mismo objetivo, la mejora de la explotación del recurso agua. Así pues, esta serie de leyes tienen la finalidad de regular la explotación de ese recurso natural, el agua.

La creación de Presas o Balsas nos ayudará a regular caudales y, en consecuencia, nos permite modificar las condiciones originales del medio ambiente, lo que pudiera generar una serie de impactos que se deben conocer y paliar de antemano, uno de ellos es el riesgo de inundación por ruptura de ese contenedor de aguas. Así pues, dentro de este planteamiento, y acorde con los criterios de clasificación de la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil, surge La Guía Técnica de Clasificación de Presas, en función del riesgo potencial y como consecuencia de la obligatoriedad de clasificar todas las presas y balsas existentes. Esa clasificación va a ser el instrumento básico para la gestión y mejora de la seguridad.

En definitiva, la modificación del reglamento de dominio público hidráulico establece que los titulares de presas o balsas con muros de una altura superior a 5 metros o con una capacidad de embalse mayor a 100.000 m³ estarán obligados a solicitar su clasificación.

Una vez clasificada la infraestructura, para aquellas que tengan categoría de "gran presa" o sean del tipo A o B, o para las que sin estar calificadas como las anteriores puedan generar perjuicios a bienes y personas, se debe establecer un plan de emergencia; el cual consiste en la delimitación de las llanuras de inundación. Dicho plan de emergencia será la base para la elaboración del plan de actuación, el cual consistirá de determinar qué acciones se llevarán a cabo para minimizar los efectos de una inundación y evitar, ante todo, pérdidas de vidas humanas.

La clasificación se ejecutará conforme a lo que establece La Guía Técnica para la Clasificación de Presas de 1996, que menciona las siguiente categorías:

- Categoría A: corresponde a las presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede afectar gravemente a núcleos urbanos o servicios esenciales, o producir daños materiales o medioambientales muy importantes.
- Categoría B: corresponde a las presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede ocasionar daños materiales o medioambientales importantes o afectar a un reducido número de viviendas.
- Categoría C: corresponde a las presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede producir daños materiales de moderada importancia y sólo, incidentalmente, pérdida de vidas humanas. En todo caso, a esta categoría pertenecerán todas las presas no incluidas en las Categorías A o B.

Una presa o balsa será considerada "gran presa" si se cumplen, al menos, una de las siguientes condiciones:

- Altura superior a 15 metros, medida desde la parte más baja de la superficie general de cimentación hasta la coronación.
- Altura comprendida entre 10 y 15 metros, siempre que tengan alguna de las siguientes características:
 - Longitud de coronación superior a 500 metros.
 - Capacidad de embalse superior a 1.000.000 de metros cúbicos.
 - Capacidad de desagüe superior a 2.000 metros cúbicos por segundo.

Finalmente la ley establece la obligatoriedad de redactar un Plan de Emergencia de Presas para todas aquellas que resulten clasificadas como A o B en función del riesgo potencial en caso de rotura.

2.3. LIDAR.

Curiosamente desde hace unos pocos años, un “nuevo” sensor se ha convertido en el mayor protagonista en todos los foros, congresos y documentos de análisis fotogramétricos, el LIDAR. Cuya esencia reside en que es un dispositivo del tipo de sensores activos que permite determinar la distancia desde un emisor a un objeto o superficie, utilizando un haz láser pulsado; donde la distancia se determina midiendo el tiempo de retraso entre la emisión del pulso y su detección a través de la señal reflejada. A nivel técnico, se hace necesario recordar que esto no supone ningún avance nuevo, pues la medición de distancias a través del tiempo que tardan las ondas de radio desde que son emitidas hasta que son recibidas, es lo que ya hacía el radar desde su creación en el año 1935.

En realidad, el LIDAR surge en los años 70 en los laboratorios de la NASA, pero no se le encontró uso o aplicación hasta que no se desarrollaron los sistemas de posicionamiento y navegación, ya que sería entonces cuando el LIDAR se instauró como una alternativa más para la Cartografía.

El LIDAR se convierte en una alternativa a la cartografía en torno al año 1988, cuando el Profesor Ackerman del Instituto de Stuttgart, lo introdujo en las actividades de investigación de Fotogrametría. Así, durante los años 90 es cuando comienzan a desarrollarse las diferentes técnicas y tecnologías LIDAR, especialmente por los estudios desarrollados para el análisis de la atmósfera mediante sensores LIDAR, Ackerman (1998).

Su desarrollo fue muy tímido, si consideramos que en 1996 solamente existía una compañía que comercializaba el LIDAR (Optech). Afortunadamente, hoy ya existen unas 40 compañías que ofertan sistemas LIDAR.

Desde el punto de vista del fundamento físico de medición, los sensores LIDAR pueden clasificarse en 2 tipos, el LIDAR de tiempo de vuelo y el LIDAR de diferencia de fase. Con la tecnología LIDAR, aplicando el sistema de posicionamiento y navegación de doble frecuencia y con bases GPS en tierra situadas entre 20 Km. y 50 Km de distancia, (acorde con lo que establecen las especificaciones de las casas comercializadoras de este sensor), se puede obtener una información cuya precisión en la georreferenciación oscila en torno a muy pocos centímetros, naturalmente siempre que se parametrize adecuadamente la altura de vuelo, el ángulo de escaneo y se tengan en cuenta todas las demás consideraciones tecnológicas propias del sensor.

Este hecho ha puesto de manifiesto que el LIDAR es una tecnología que ofrece mejores capacidades. En definitiva, que nos proporciona unos modelos digitales del terreno más precisos que los que obtiene la generación de estos modelos por técnicas de fotogrametría, para una misma escala de vuelo; y, además, permite disponer de información del suelo debajo de la vegetación, aspecto que para las técnicas de fotogrametría es imposible.

Estos hechos antes mencionados, junto con las siguientes consideraciones empíricas que a continuación se mencionan, las cuales se derivan de hacer controles de calidad de los modelos digitales del terreno que han sido obtenidos por estéreo-correlación:

- Existen artefactos que son fruto de una edición generalizada.
- Existen diferencias geométricas entre bloques de MDT, que proceden de bloques que han sido orientados fotogramétricamente en procesos distintos.
- Existe variabilidad en virtud del operador que ha editado el Modelo Digital.

Han llevado a la consideración generalizada de que el LIDAR es la alternativa adecuada para la obtención de Modelos Digitales de elevaciones muy precisos. Por lo que se está planteando, por parte de la Administración General del Estado, la necesidad de obtener un MDE de todo el territorio nacional de alta calidad, es decir, desde sensores LIDAR.

2.4. Situación actual.

Finalmente, dentro de este apartado de antecedentes, se hace necesario constatar cómo y con qué tipos de datos y software se están realizando los distintos análisis para la clasificación de las presas y la realización de los distintos test de riesgo de inundabilidad.

2.4.1. Datos

En relación al tipo de datos que se están utilizando, he podido comprobar, que el Modelo Digital del Terreno, obtenido por estéreo-correlación de paso de Malla 5x5 del plan PNOA, no está apenas siendo utilizado, ni por los principales organismos con responsabilidad hidrológica e hidráulica: las Confederaciones Hidrográficas, ni por algunos de los estudios de ingeniería hidráulica. Sin embargo, sí está siendo utilizado por algún analista de la Administración General del Estado. Por lo tanto, ¿Cuál es la información que están utilizando? Se está utilizando un modelo digital del terreno que se obtiene a partir de las curvas de nivel del Mapa Topográfico Nacional o Regional. Concretamente se puede extraer de una cobertura de curvas de nivel MTN 50k, donde las curvas están cada 20 metros; también a partir del MTN 25K, donde las curvas están cada 10 metros; y finalmente a partir del Mapa Topográfico Regional 10k, donde las curvas están cada 5 metros. Concretamente, el Modelo Digital más extendido en su uso, para Castilla y León, ha sido la generación de un modelo de paso de malla 20 por 20 metros, a partir del MTR 10k.

Estas acciones, en si, no conforman ninguna negligencia, ni osadía, ya que siguen el planteamiento oficial que se de establece en la Guía Técnica para la Elaboración de los Planes de Emergencia de Presas del Ministerio de Medio Ambiente.

2.4.2. Software y Modelo de análisis.

En relación a los Software o modelo de análisis para calcular las llanuras de inundación producidas por la posible rotura o funcionamiento incorrecto de una presa o balsas, se hace necesario constatar que los modelos existentes son:

- Modelos unidimensionales en régimen variable.
- Modelos cuasi-bidimensionales.
- Modelos bidimensionales.

Considerando los planteamientos actualmente más aceptados al respecto, la selección del tipo de modelo estará en función de varios factores, por ejemplo: si el valle es abrupto, el más adecuado será el modelo unidimensional. Sin embargo, si tenemos zonas con comportamientos claramente bidimensionales, deberemos recurrir a modelos cuasi-bidimensionales o modelos bidimensionales. Los del primer caso, los unidimensionales, requieren de gran habilidad y experiencia en el análisis para obtener un buen resultado; y los del segundo, los bidimensionales, necesitan de una topografía muy detallada para dar resultados fiables. Por ello, se hace necesario recordar que este último aspecto es el que será abordado detenidamente a lo largo del proyecto.

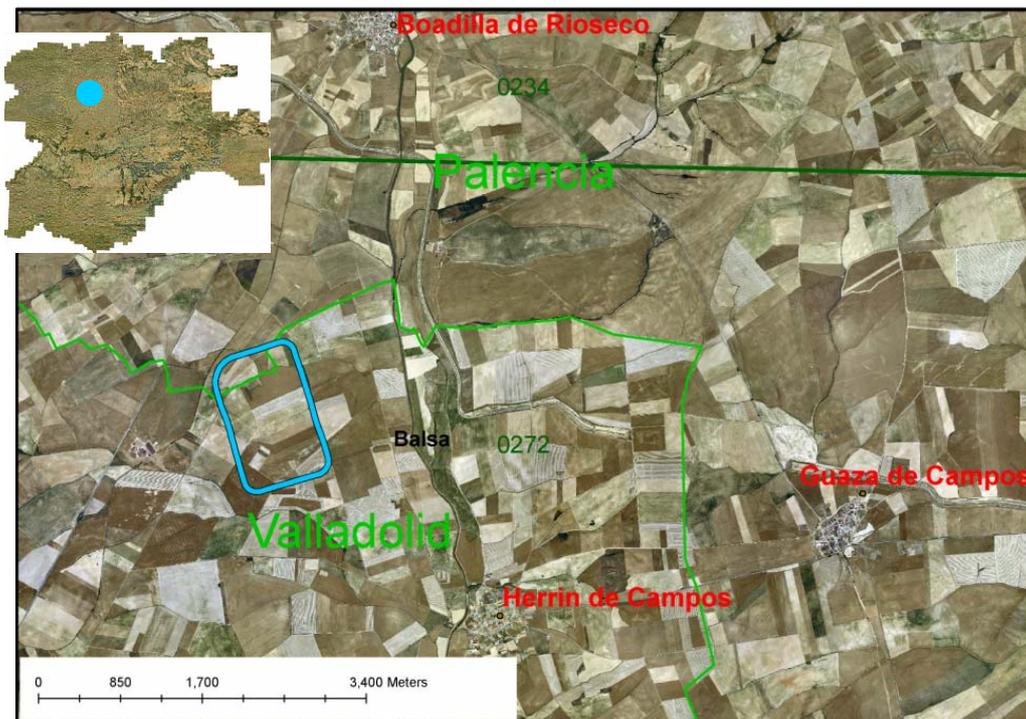
La mayoría de los modelos comerciales son unidimensionales, permiten el cálculo en régimen variable, los más extendidos son DAMBRK, MIKE-11, HEC-RAS y SOBEK. La Asociación de Presas de Canadá, en el Congreso de 2005, incluyó un estudio que compara HEC-RAS con FLDWAV y DAMBRK. Las conclusiones fueron:

- El FLDWAV es una evolución del DAMBRK.
- Ambos, HEC-RAS y DAMBRK, usan el mismo modelo, la misma base teórica y las mismas técnicas numéricas, por lo que conducen a los mismos resultados cuando los parámetros introducidos son idénticos.
- HEC-RAS tiene unas mejores funciones de pre y post procesamiento. Los datos son más fáciles de editar, modificar y visualizar en pantalla.

2.5. La Balsa

Todos los estudios realizados se corresponden con un planteamiento real, el cual se circunscribe a un proyecto de transformación en regadío del sector IV de la Zona regable del Trasvase Esla-Carrión. Para lo cual se pretende hacer una balsa con una capacidad de 9.600.000 m³, que se emplazará en la confluencia de los términos municipales de Herrín de Campos, Villalón de Campos y Boadilla de Rioseco. Las características geométricas y ubicación de la balsa son:

Cota de Coronación.	784.0 m.
Cota de fondo.	772.0 m.
Cota del agua. (N.M.N.)	782.72 m.
Resguardo sobre. (N.M.N.)	1.25 m.
Superficie de ocupación de la balsa.	1.080.195 m ² .
Superficie de embalse (N.M.N.)	1.239.270 m ² .
Volumen del Embalse (N.M.N.)	9.963.562 m ³ .
Volumen del desmonte	1.795.685.43 m ³ .
Volumen del terraplén en cuerpo de presa	1.953.316.53 m ³ .
Anchura del camino de coronación	6.00 m.
Longitud del camino de coronación.	4.144.6 m.



Croquis 1. Emplazamiento de la balsa Esla-Carrión.
Tabla 1. Características de la balsa Esla-Carrión.

3. Objetivos.

Una vez señalada la situación legal, técnica y tecnológica en torno a la obtención de modelos digitales de elevaciones, se hace necesario señalar cuál es el objetivo de este proyecto. Así pues, si consideramos la obligatoriedad que establece la ley de clasificar las presas y embalses para elaborar un plan de emergencia cuando proceda, y, además, la obligatoriedad que establece la Directiva sobre Inundaciones, de hacer este tipo de análisis de todas las cuencas, se hace imprescindible elaborar modelos de inundación para detectar los sectores más vulnerables. En consecuencia, este proyecto pretende mostrar las diferencias que existen en los resultados, cuando se utilizan diferentes datos y diferentes modelos de cálculo, concretamente:

1. Realizar un análisis descriptivo de los datos procedentes del LIDAR y de la fotogrametría, un control de calidad de los mismos y construcción de un MDT de fotogrametría adaptado para la modelización hidráulica, basado en datos de librería de libre distribución.
2. Construir un MDT óptimo para su uso en modelización hidrológica, a partir de datos de librería ya existentes.
3. Analizar las diferencias que se obtienen a partir de los cálculos de simulación hidrológica, cuando se usan MDT obtenido por fotogrametría, respecto a cuando se usan MDTs obtenido mediante un sensor LIDAR. Efectuar un análisis en torno a la necesidad de realizar un LIDAR para la elaboración de llanuras de inundación.
4. Comprobar que las diferencias observadas cuando se usan diferentes MDT son comparables a las diferencias que existen por el uso de los diferentes modelos de simulación empleados por los softwares: HEC-RAS, Guad_2D y DamBreak.
5. Valorar el efecto del uso de datos de alta resolución, un MDT de malla 1x1 m o 2x2 m, en relación a cuando se ejecuta ese mismo análisis utilizando datos de densidad media, un MDT de malla 5x5.

4. Material y Métodos.

A lo largo de este apartado se van relacionar las características técnicas de los datos o información con la que se van a llevar a cabo los diferentes cálculos, y los modelos de cálculo que se van a utilizar para luego hacer las diferentes comparativas de los resultados obtenidos.

En relación al Material o información utilizada serán:

- El modelo digital de elevaciones obtenido por técnica de Fotogrametría.
- El modelo digital de elevaciones obtenido mediante el LIDAR.

En relación a los modelos de cálculo serán

- Hec-RAS.
- Quad Creator.
- Dambreak.

Finalmente, como colofón del análisis del material y de los métodos utilizados, se adjuntarán algunas consideraciones técnicas y fundamentos matemáticos de hidráulica, ya que la características de este proyecto giran en torno a los estudios hidráulicos.

4.1. El modelo digital del terreno obtenido por técnica de Fotogrametría.

Considerando lo comentado en los antecedentes, no se pretenden utilizar datos provenientes de la cartografía vectorial topográfica como única fuente para componer el modelo digital del terreno; pero si consideramos que el MDT PNOA tiene una densidad de 5x5 y el LIDAR tiene una densidad de 1x1, se hace necesario matizar el MDT PNOA con el fin de obtener una información de densidad y precisión similar, que permita comparar ambos tipos de datos.

Por lo tanto, el planteamiento es el siguiente: se utilizará la cartografía vectorial del Mapa Topográfico Regional 1:5000, para extraer toda la información de elementos lineales, puntos y recintos que contengan información altimétrica del terreno y de edificaciones, los cuales serán posteriormente incorporados a el MDT PNOA 5x5, como líneas de ruptura, para realizar una interpolación y obtener así un modelo digital de elevaciones de igual densidad a la del LIDAR.

El planteamiento consiste en obtener dos tipos de datos, un Modelo Digital del Terreno de 1x1 y un MDT en estado normal de generación, en malla 5x5.

La fusión de ambos tipos datos, el MDT y la cartografía, en algunos casos podría suponer un gran problema; ya que, originalmente, podrían estar ambos en datum distintos o, simplemente, pueden presentar un pequeño desplazamiento procedente de la orientación fotogramétrica, pequeño pero suficiente como para no poder conjugar ambos tipos de datos, ya que el resultado final de la mezcla de esa información sería un MDT muy alejado de la realidad.

En el caso de que se produzca un desplazamiento, se hace necesario determinar cuál es el desplazamiento a partir de unos puntos de control. Una vez conocido dicho desalineamiento, si éste es sistemático, se debería proceder a su transformación con el fin de lograr una conjugación lo más real posible, y en el caso que de no exista ningún desplazamiento sistemático, y no se pueda determinar ninguna transformación, la conjugación será imposible.

En nuestro caso, no se produce ninguna discrepancia entre ambos productos, ya que ambos datos proceden del mismo vuelo fotogramétrico y, en consecuencia, dependen del mismo proceso de orientación fotogramétrica. La razón estriba en que los vuelos PNOA de Castilla y León de resolución 25cm. son la base para la obtención de la MTR 1:5.000.

4.1.1. Especificaciones y consideraciones técnicas de la obtención del MDT, PNOA.

El objetivo es obtener un modelo digital del terreno en formato GRID, con un paso de malla de 20 veces el GSD nominal respecto de las imágenes digitales originales del vuelo fotogramétrico, 5 metros. Este modelo de elevaciones se obtendrá por estéreo-correlación a partir de las imágenes digitales de vuelo, ya orientadas, donde el e.m.c. de la orientación no debe superar el valor de un g.s.d. en planimetría y 1.5 veces el g.s.d. en altimetría.

Especificaciones

Objetivo	Obtener un modelo del terreno a nivel del suelo (natural o artificial)	Debe ser útil para múltiples fines, tales como: hidrología (escorrentías, avenidas...), estudios de erosión, anteproyectos de infraestructuras (regadíos, canalizaciones, redes de carreteras, etc.)
Obtención de un MDT	Se obtendrá un Modelo Digital del Terreno por correlación automática y depuración estereoscópica interactiva,	Todos los puntos de la malla deben estar situados sobre el terreno, ignorando las copas de árboles, tejados de edificios y otros objetos artificiales que sobresalgan del mismo. En las zonas de agua, (mar, embalses y lagos) la cota del MDT será constante e igual a la de la orilla
En áreas urbanas	MDT se adaptará al nivel del suelo (ignorando los edificios)	Se obtendrá por interpolación a partir de puntos dados manualmente en las calles y zonas abiertas
Líneas de ruptura "breaklines"	Trazado manual estereoscópico	Se trazarán en aquellos lugares en los que no quede suficientemente definido el relieve con la malla de correlación (principalmente elementos artificiales como presas, terraplenes, etc.), mediante trazado manual estereoscópico.
Resolución del MDT	El paso de malla del MDT de correlación será de 5 m. En el caso de que los puntos medidos no se sitúen siguiendo una malla regular, las distancias entre puntos deberán ser iguales o inferiores a 5 metros.	Se realizará una edición manual en zonas donde la correlación no dé buenos resultados.
MDT en formato GRID	Si el MDT ha sido obtenido mediante una nube de puntos irregular, se procederá a obtener un MDT de malla regular de 5 x 5 mediante interpolación.	Todos los puntos de la malla tendrán coordenadas X, Y UTM enteras, múltiplos del paso de malla.
Precisión de los MDE	El error medio cuadrático en Z será menor o igual a 1 m.	
Precisión de los MDE. Error máximo	Será menor o igual a 2 m en el 95% de los casos y no podrá haber ninguno con un error superior a 4 m.	
Corte de ficheros	Por hojas MTN25	El corte de hojas se obtendrá aplicando un rebase de 100 metros con respecto a las cuatro esquinas teóricas, redondeado a múltiplos de 10 m.

4.1.2. Consideraciones técnicas. La metodología.

- **El primer** hecho será la generación de líneas de ruptura o BreakLines, mediante procedimientos de restitución fotogramétrica. Este tipo de líneas serán las que determinan una modificación de la pendiente y serán consideradas como tales, tanto, aquellas que definen obras artificiales como las que sean parte del terreno; y quedarán excluidas de esta consideración, las construcciones y edificaciones. Así mismo, se podrán incluir como tales, las líneas que definen los viales o infraestructuras de comunicación, hidrografía, presas, taludes, terraplenes, etc.

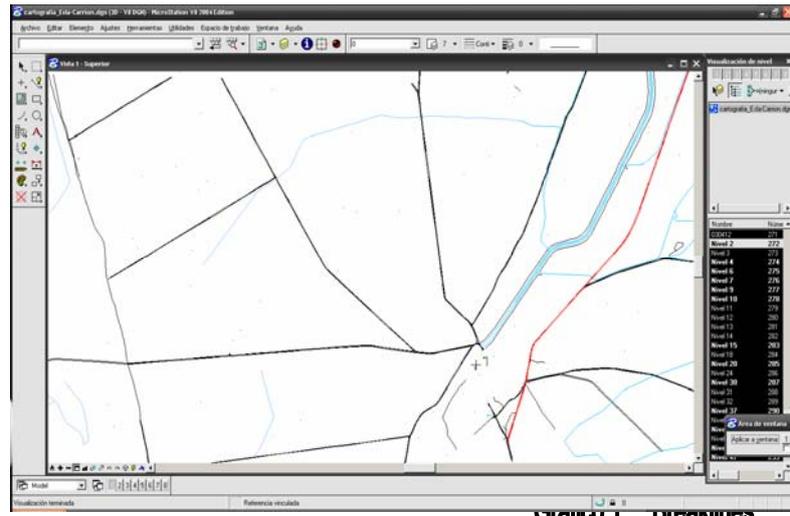


Gráfico 1. Breaklines.

- **El segundo paso**, es un proceso automático, la correlación, aunque según el software que se utilice las estrategias pueden variar. Los condicionamientos matemáticos que se utilizan en todos los programas son los mismos: la condición de colinealidad, utilizando las restricciones de epipolaridad para facilitar la búsqueda, pero la materialización de ello es distinta según los programas:
 - Unos software consideran que si lo que se desea obtener es un grid, las posiciones "x" e "y" ya son conocidas de antemano, solamente hay que hallar el rallo perspectivo de cada punto a cada una de las imágenes, utilizando las dos condiciones antes mencionadas.
 - Mientras que otros programas primeramente correlan elementos en la imagen (suelen ser bordes) y sobre ellos se correlan puntos, para posteriormente interpolar la malla de puntos a partir de los puntos correlados.

En relación a las estrategias de correlación que pueden ser regulables por los operadores, son: correlación por entidades, ajustes de mínimos cuadrados y, a mayores, se debe determinar la densidad de la malla a generar y el tipo de orografía. Esto último establece el rango de tolerancia para la búsqueda de los puntos homólogos, ya que el paralaje en función de la orografía podría variar mucho.

- **El tercer paso** consiste en aplicar suavizados. Los suavizados y filtrados consisten en lo siguiente:
 - En los casos en los que la correlación genera puntos muy alejados en z respecto de sus colindantes, éstos serán eliminados; o bien, será matizada su posición z, tratando de definir planos más o menos homogéneos.
 - En los sectores donde la información presente un alto grado de heterogeneidad, ésta será homogeneizada; para ello se utilizará el coeficiente de correlación y se eliminarán los puntos que presenten los peores valores de coeficiente de correlación. Con ello se eliminarán todos los puntos que podrían presentar una baja precisión altimétrica.
- **El cuarto paso** consiste en la revisión mediante visión estéreo de los puntos. En este proceso se ejecutarán las siguientes labores:
 - Se eliminarán los puntos que se vean incorrectamente posicionados sobre el terreno.
 - Se generarán líneas de ruptura donde se vea que puedan faltar.
 - Se modificarán los puntos que presenten discrepancias con respecto al terreno.
 - Se eliminarán los puntos que se sitúan sobre las edificaciones.
 - Se tratará de observar, mediante sombreados y tintas hipsométricas, si el MDT presenta aspecto de artefactos sobre el terreno, para eliminarlos.

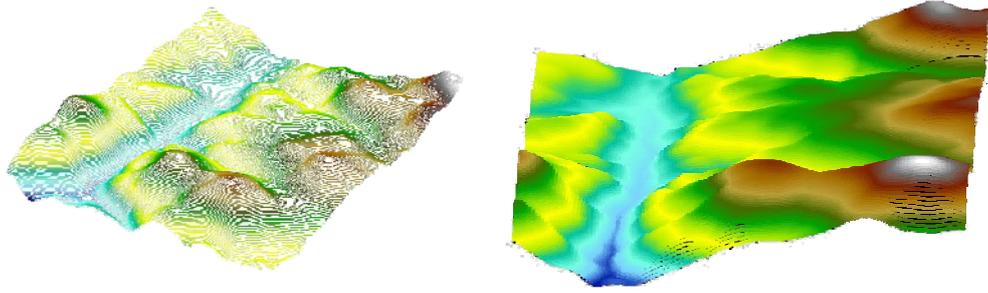


Grafico 2. MDT en tintas hipsométricas.

- **El quinto y último paso** consiste en la generación de los productos finales. Con la información de los puntos editados y las líneas de ruptura se genera un TIN (Triangulated Irregular Network), a partir de este producto y mediante técnicas de interpolación se generará el Modelo Digital del Terreno en formato grid, tanto en archivos de puntos xyz con paso de malla 5x5, como en archivos ráster de 5 m. de tamaño de pixel.

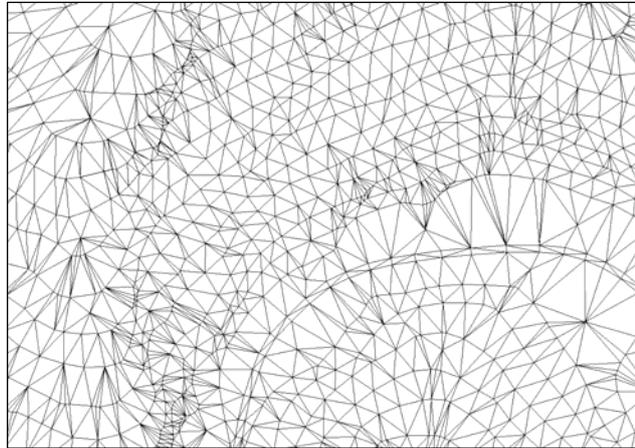


Grafico 3. T.I.N. (Triangulated Irregular Network)

4.1.3. Control de calidad del Modelo digital de elevaciones.

La utilización de los productos geomáticos para distintos proyectos ingenieriles, exige que estos productos cumplan unos estándares de calidad, lo que implica que éstos hayan superado satisfactoriamente los controles de calidad.

En consecuencia, los Modelos digitales del Terreno del PNOA pasan 2 controles de calidad, uno a cargo de las Comunidades Autónomas y el otro a cargo de la Administración General del Estado.

En el caso que nos ocupa, el control de calidad del MDT, lo llevó a cabo el Instituto Tecnológico Agrario por parte de la Junta de Castilla y León. La zona de trabajo se

encuentra dentro de la hoja del MTN50 0272, y corresponde al cuadrante noroeste de Castilla y León, conforme a la distribución de cuadrantes de producción PNOA. Las imágenes utilizadas proceden del vuelo fotogramétrico realizado en julio de 2008 con una resolución espacial aproximada de 0,25 m.

El control de calidad consiste en 2 actividades:

- El control geométrico, se contrasta la altimetría del MDT respecto a puntos obtenidos por técnicas GPS, que han sido post-procesados utilizando bases cercanas, de tal forma que la precisión de estos puntos oscila los 5 cm en planimetría y los 10 en altimetría.

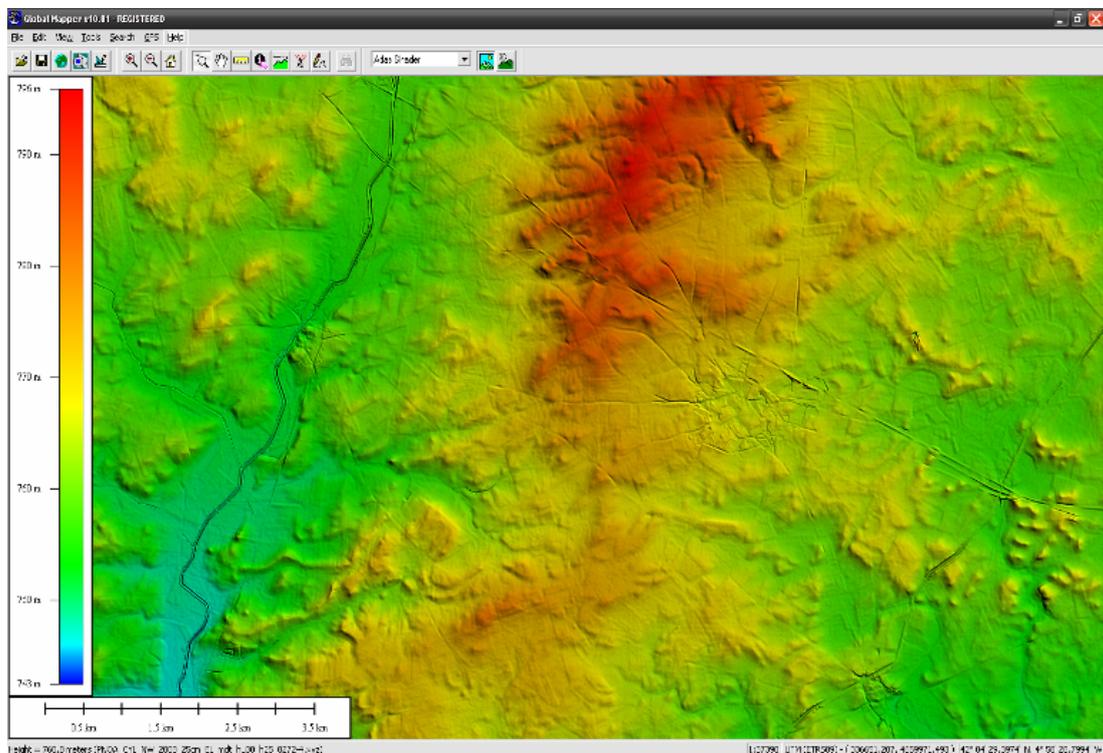
En nuestro caso, la unidad de control será el bloque de vuelo fotogramétrico, como en este caso el bloque de vuelo del cuadrante PNOA_CYL_NW_2008, se corresponde con el bloque SurOeste, es un bloque que está compuesto por 7 hojas 50k (es decir, es un bloque rectangular compuesto por de 3.5 x 2 hojas 50k).

El proceso de control geométrico consiste en la comparación de la altimetría de 146 puntos de chequeo GPS, con respecto a la altimetría del MDT en esa misma coordenada planimétrica. Los datos obtenidos son:

- Error Medio Cuadrático es de 0,46 m.
- Desviación estándar es de 0,45 m.
- Errores máximos son de 1,50 y -1,77 m.

- El control visual, para ello se hace necesario generar un archivo raster de 32bits a partir de la malla grid xyz. A ese archivo imagen se le aplica una coloración de tintas hipsométricas y una iluminación para que la visualización muestre aspecto de relieve. La iluminación consiste en aplicar un juego de luces y sombras, suponiendo una fuente de luz situada a 45 grados de altura sobre el terreno y con un azimut de 0°.

Gráfico 4. MDT en tintas hipsométricas, con aspecto de relieve.



Mediante la revisión visual del MDT desde estos archivos ráster, se pueden detectar sectores que presenten edición en bloques, edición irreal que procede de artefactos o interpolados groseros. Concretamente, en relación al control visual de este bloque se detectaron interpolados groseros que dan aspecto de escaleras y, en consecuencia, el producto fue devuelto a la empresa adjudicataria para que solventara esta situación. Lo cual fue corregido y entregado nuevamente sin ese error.

4.1.4. Especificaciones para la obtención de la cartografía.

Cartografía 1:1000

La cartografía se realiza en el Datum European Terrestre Reference System 89, considerando las latitudes referidas al Ecuador, positivas al Norte, y las longitudes referidas al Meridiano de Greenwich, positivas al Este y negativas al Oeste del mismo. La materialización del sistema de referencia se apoyará en la red regente y se considerará el origen de altitudes referidas el nivel medio del mar que define el mareógrafo fundamental de Alicante. El Sistema de Representación será la proyección conforme Universal Transversa de Mercator (UTM), materializada en los husos 29 y 30. (Pliegos de Cartografía de Castilla y León)

La captura de la información se hará desde imágenes digitales obtenidas en vuelo fotogramétrico, el cual deberá contener un recubrimiento estereoscópico suficiente como para poder cartografiar toda la superficie en 3D., permitiéndose el vuelo siempre que la altura solar sea igual o superior a 35°.

Las cámaras para la toma de las imágenes podrán ser cámaras analógicas, si la focal es superior a 150 milímetros, y las cámaras digitales de gran formato. Se considera imprescindible que la cámara haya sido calibrada dentro de los dos últimos años hasta la ejecución del vuelo. Las imágenes digitales o los fotogramas escaneados se utilizarán en RGB y sin compresión.

Para georreferenciar correctamente las imágenes se deberá ejecutar un apoyo, para ello será necesario establecer unos Puntos de Apoyo, que se obtendrán a partir de una Red Trigonométrica enlazada y apoyada en la Red Geodésica, mediante técnicas de topografía clásica (triangulación, trilateración o poligonación); o mediante técnicas de posicionamiento global (GPS), en este caso se hará mediante el método estático diferencial, apoyándose en un vértice de la red geodésica.

Con las imágenes digitales o los fotogramas escaneados, junto con las coordenadas de los puntos de apoyo, se procederá a la orientación fotogramétrica de las imágenes, la Aerotriangulación, donde se espera una precisión de 1 g.s.d. en planimetría y 1,5 g.s.d. en altimetría.

La captura de la información se realizará mediante una restitución fotogramétrica, teniendo presente un modelo de datos cartográficos ya establecido y las siguientes consideraciones:

- Se deberán recoger todos aquellos detalles que sean identificables a partir del vuelo, en su posición exacta y verdadera, con una dimensión mínima de 1 milímetro en el dibujo. Así mismo, también se recogerán los elementos que sean de interés, aunque su dimensión de dibujo sea menor de 1 mm., en el plano se representarán mediante símbolos.
- En relación a la altimetría, se restituirán curvas de nivel con una separación de 1 metro y, cuando la pendiente sea inferior a 12,5 %, se interpolarán curvas de 0,5 m. y se incluirán puntos de cota en todos los cruces de vías, cambios de pendientes, etc.

Las precisiones serán de 20 cm. en planimetría y 25 cm. en altimetría. El trabajo de restitución deberá completarse con una revisión de campo y su posterior edición.

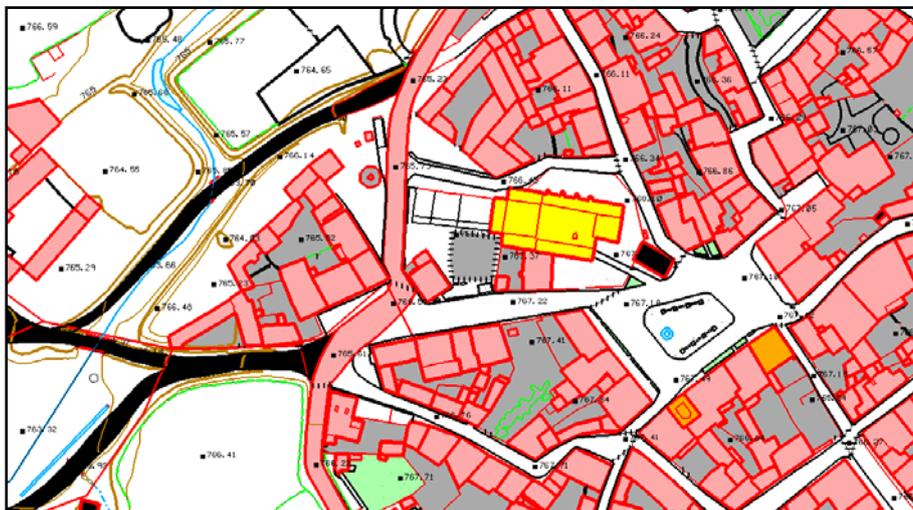


Gráfico 6. Imágenes de Cartografía 1:1000 Sector de casco urbano de Lomoviejo, Valladolid.

Cartografía 1:5000

En relación a la cartografía 1:5000, los condicionamientos son muy parecidos, salvo que se obvian los procesos de vuelo fotogramétrico, apoyo y orientación, ya que se utilizan los datos PNOA. Por consiguiente las variaciones que deben contemplar son:

En Altimetría se restituirán curvas de nivel cada 5 m. y, cuando la pendiente sea inferior a 12,5 %, se interpolarán curvas de 2,5 metros. Se restituirá toda la información hidrográfica, los usos del suelo, las construcciones, las vías de comunicación y todo tipo de conducciones.

En relación a la precisión se pide que sea igual o inferior a 60 cm. en planimetría y 75 cm. en altimetría.

El E.M.C. se obtendrá mediante el levantamiento de una muestra de 30 puntos sobre zonas de trabajo elegidas al azar, sobre el 10% de los bloques fotogramétricos.

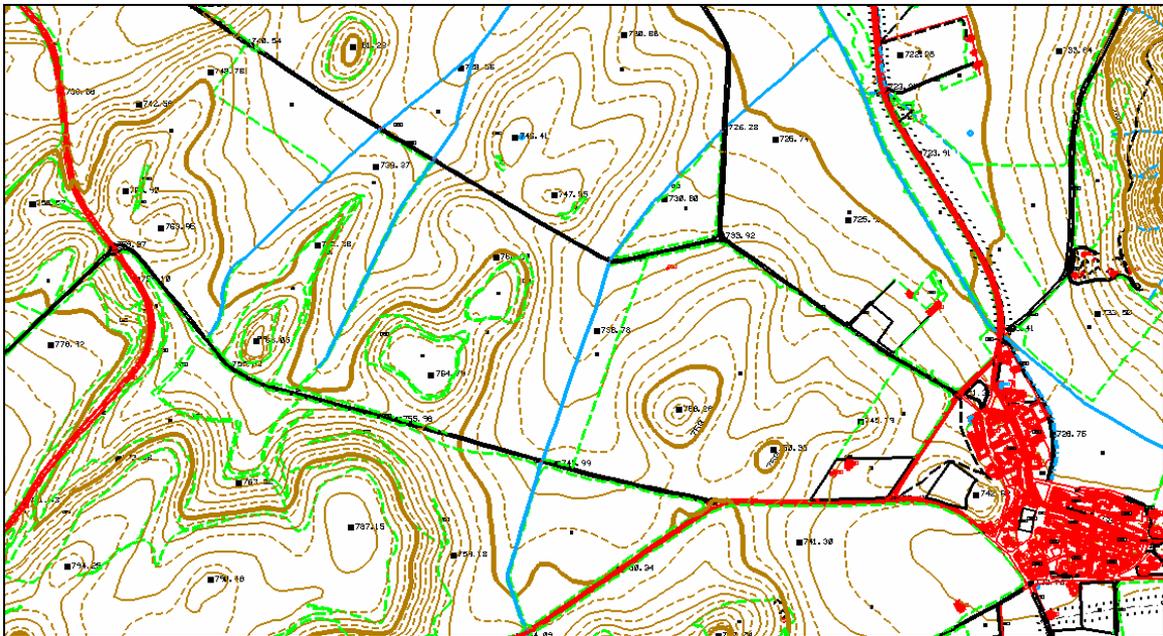


Gráfico 5. Imágenes de Cartografía 1:5000 Hojas E5-0343-7-4

4.1.5. Composición del Modelo digital del terreno procedente de fotogrametría, para su aplicación en modelización hidrológica.

A continuación se va a describir la metodología seguida para la formación del modelo digital del terreno de alta densidad, a partir de los datos cartográficos existentes. La información de partida es la siguiente:

- Un MDT de paso de malla 5x5. Con origen estéreo correlación del vuelo PNOA.
- Cartografía 1:5000 del Mapa Topográfico Regional, con información altimétrica, curvas de nivel cada 5 metros y todos los elementos que aparecen sobre el terreno. Con origen vuelo PNOA.
- Cartografía 1:1000 de cascos urbanos, con información altimétrica cada metro y con todos los elementos que aparecen sobre el terreno. Con origen en vuelos específicos para cada casco urbano con GSD de 10 cm.

El procedimiento para obtener un MDT de paso de malla 1x1, ha sido el siguiente:

Sobre el MDT PNOA, utilizando las construcciones de ambas cartografías, se han eliminado todos los puntos del MDT que se sitúan planimétricamente dentro de las edificaciones.

Sobre las cartografías 5000 y 1000 se ha eliminado la información de todos los elementos que no se posicionen sobre el suelo o que no sean relevantes para la modelización hidrológica, como los tendidos eléctricos, muros, toponimia, vegetación, puntuales de registros.

Los tres productos se han unido formando un TIN que representa un Modelo Digital de Superficie adaptado y se ha interpolado una malla regular de un metro de resolución.

En la imagen adjunta se muestra una imagen raster del MDT PNOA y cartografía de tamaño de píxel 1 metro.

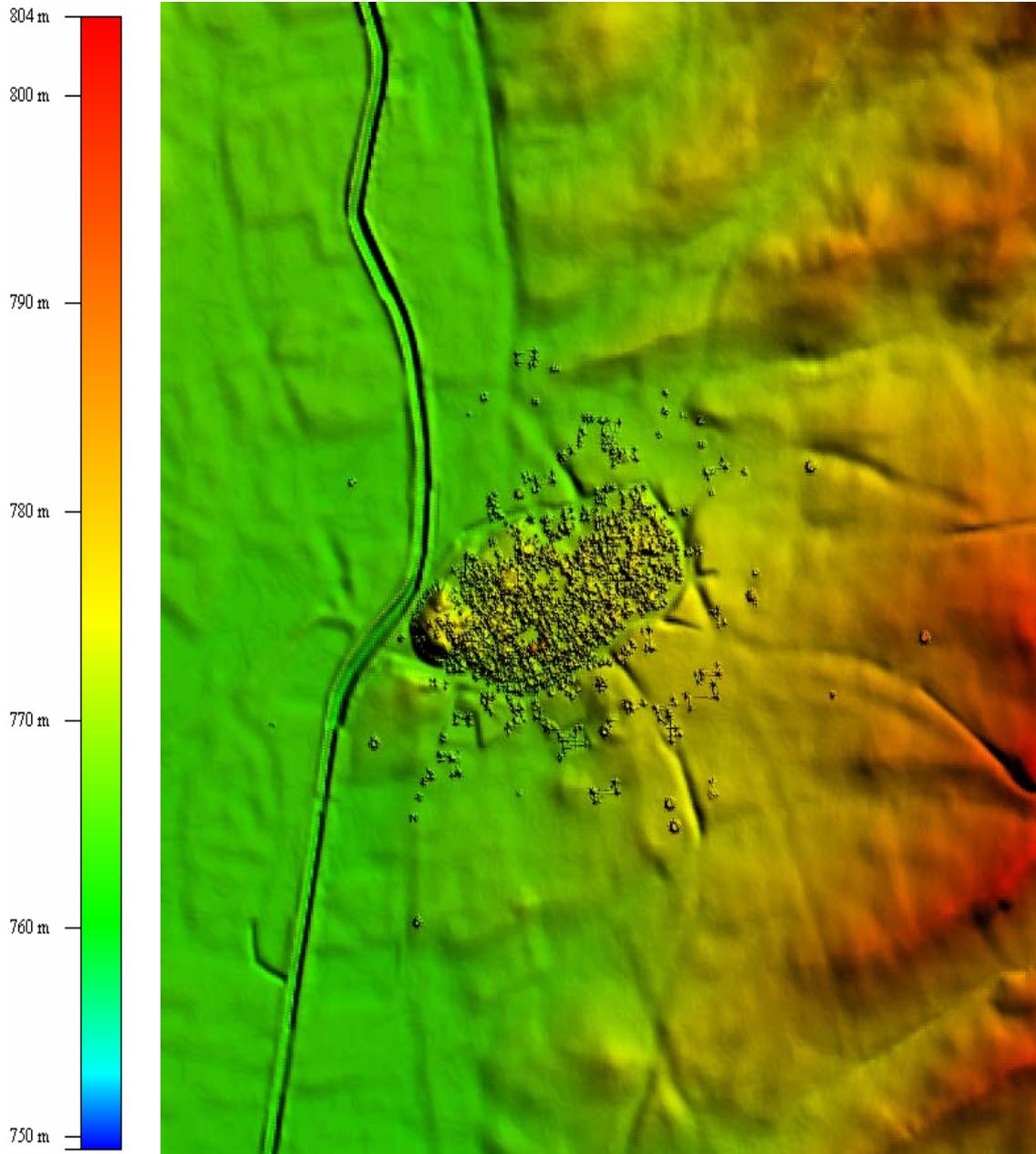


Gráfico 7. MDT con construcciones en tintas hipsométricas, con aspecto de relieve.

Escala gráfica. 0 m 250 m 500 m 750 m 1000 m

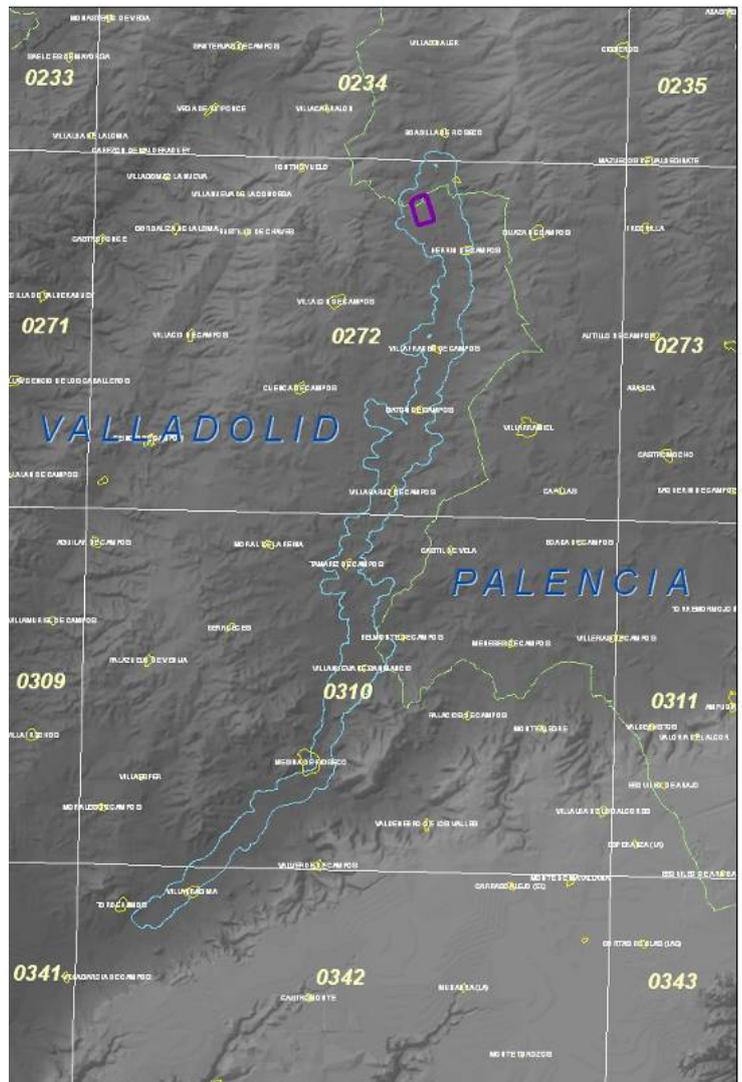
El sector que representa este Modelo Digital del Terreno se corresponde con el municipio de Herrín de Campos.

4.2. LIDAR.

El Instituto Tecnológico Agrario, con el objetivo de proceder a la clasificación de la balsa de riego trasvase Esla-Carrión que se va a construir, decide constatar un vuelo LIDAR, para obtener un MDT de alta densidad y precisión. En relación a las consideraciones ahora mencionadas, se plantea un vuelo LIDAR que debe tener las siguientes características:

- Vuelo LIDAR que cubra el contorno de la zona afectada por el proyecto, para obtener una densidad de puntos mínima de 1 pto/ m² y un FOV de 40° máximo.
- Pasadas de vuelo LIDAR a varias alturas de vuelo, con un FOV máx. de 60°, cuyo objetivo es el análisis de los datos recogidos.

El sector en el que se producirá la captura es el que se observa en el gráfico que se adjunta a continuación, contiene una superficie de aproximadamente 8.000 ha.



Croquis 2. Emplazamiento del vuelo vuelo LIDAR.

4.2.1. Las características técnicas del vuelo son:

Vuelo a 1000 m.	
Características	Valor
Densidad de puntos	1 puntos / m ² .
Corredor	728 m.
Ángulo de la toma	40°
Velocidad de la Aeronave	61.8 m/s.
Altitud sobre el terreno	1000 m.
Rango de repetición del pulso	100 Hz.
Eff. Rango de Medición	50.000 Hz.
Beam Divergence	0.5 mrad.
Ecos	4
Velocidad del terreno	120 nudos
Vuelo a diferentes alturas	
Características	Valor
Densidad de puntos	La máxima posible
Altitud	2.500, 2.400, 2.300, 2.200 hasta 1.800m.
Corredor	2.000 m.
Ángulo de la toma	60° ángulo completo
Velocidad de la Aeronave	51.5 m/s.

Tabla 3. Características técnicas del vuelo LIDAR.

4.2.2. Los medios técnicos del vuelo son:

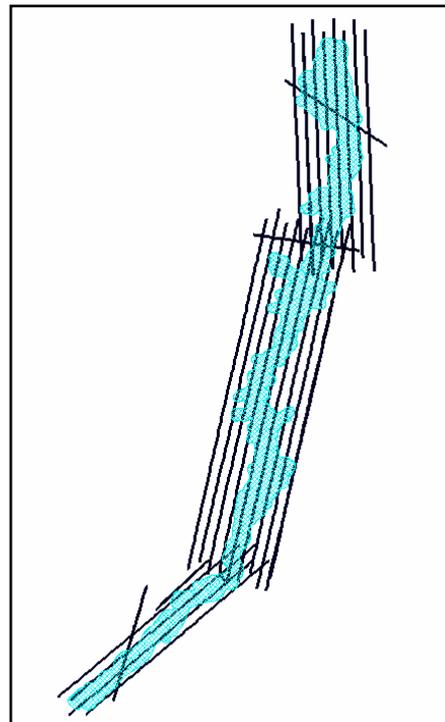
- El Avión es un modelo Diamond DA42 Twin Star. Sus características son:
 - Motor: Twin Thielert TAE Centurión 1.7 Turbo diesel. Potencia total: 270hp.
 - Hélices: MT 3 palas.
 - Dimensiones: Longitud: 8,56 m., anchura: 2,49 m.
 - Peso máximo de despegue: 1.785,49kg.
 - Capacidad de combustible: 197 litros, Autonomía vuelo : 8 horas.
 - Velocidad de ascenso, a nivel del mar: 390,14m/min.
 - Máxima altitud operativa: 5.500m / 18000ft.
 - Velocidad de crucero 80%: 47,25 l/h.
 - Velocidad de pérdida: 56kias y Velocidad de pérdida 62 kias.
 - Velocidad máxima operativa para aterrizaje: 194 kts.
 - Viento cruzado máximo demostrado: 20 kts.

- El LIDAR es un sensor aerotransportado del tipo láser escáner de largo alcance, modelo LMS-Q680, de la casa Riegl. Propiedad de Azimut S.A.
- El receptor GPS del LIDAR, es un NovAtel OEM 4-G2, L1 y L2 con una frecuencia a 2 Hz.
- El sistema Inercial para el LIDAR, es el modelo Aerocontrol IID, con una frecuencia de 256 Hz.
- El Sistema de Navegación GPS del Avión, es el modelo CCNS-4 de IGI.

4.2.3. La descripción del vuelo realizado:

Grafico 8.
Distribución de las pasadas en el vuelo Lidar

El vuelo se realiza a una altura de 1000 m. y tiene por objeto el escaneo de las llanuras de inundación del río Sequillo, se compone de 21 pasadas longitudinales y 3 transversales. Dada la distribución de las llanuras en sentido Norte-Sur, la dirección de las pasadas se asemeja en dirección a estos rumbos, tal como se observa en el grafico. La distribución de las pasadas se realizó tal como se refleja en el grafico adjunto. Las líneas en color negro representan las pasadas y el área azulado son los sectores de donde se obtienen datos.



El vuelo alto de 2.500 m se sustituyó por un vuelo descendente gradual, de tal forma que se realizaron 7 pasadas, entre los 1.800 y los 2.500 m. de altitud, con un FOV de 60°, con el objetivo de analizar la densidad en la captura. Los datos que se obtuvieron son los siguientes:

Tabla 4. Cantidad y de Densidad de datos por alturas de vuelo.

Altura	Puntos	Área aprox. (ha.)	Perímetro aprox. (Ha.)	Densidad
1,800	14,812,868	3,960.1	44.8	0.436
1,900	13,066,754	3,431.0	35.7	0.402
2,000	14,802,374	4,226.8	43.5	0.405
2,100	12,598,356	3,515.3	33.7	0.369
2,200	13,397,756	3,810.2	35.4	0.375
2,300	14,628,291	4,338.9	42.4	0.373
2,500	13,127,548	3,768.5	35.2	0.361

Podemos observar que el paso de malla aproximado oscila entre 2.29 y 2.77 m. y la densidad de la información en vuelo de 1000 m. de altitud es la siguiente:

	Puntos	Área	Densidad
Pas 1	22,354,011	2250.9	0.99
Pas 2	22,754,511	2296.6	0.99
Pas 3	7,395,689	726.2	1.02

Tabla 5. Cantidad y Densidad de datos obtenidos a vuelo 1000 m.

En el análisis de densidades, dentro de la propia pasada, se observa que no decrece hacia los extremos tal como las consideraciones teóricas plantean, la razón es que la toma de los datos nos es completamente nadiral, ya que el sensor no está sobre una plataforma de giro estabilizada. En consecuencia, el sensor LIDAR estará orientado en la misma actitud que tiene la aeronave en cada momento, y ésta depende de la fuerza de los vientos laterales y de la maniobras de navegación. En la tabla adjunta se puede apreciar la distribución de la densidad, para ello se han tomado datos de densidad en sentido transversal en varios tramos de la misma pasada.

Lecturas Transversales (metros del inicio de pasada)										Promedio
Lecturas Longitudinales (cada 100 m. de este a oeste)	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
	0.90	0.96	1.03	1.06	1.11	1.16	1.19	1.20	1.19	1.09
	0.91	0.94	0.97	0.99	1.02	1.02	1.01	0.99	0.98	0.98
	0.90	0.94	0.98	1.03	1.05	1.06	1.06	1.06	1.03	1.01
	0.83	0.88	0.92	0.97	1.01	1.04	1.05	1.06	1.06	0.98
	0.66	0.71	0.77	0.82	0.87	0.91	0.94	0.96	0.95	0.84
Promedio	0.84	0.89	0.93	0.97	1.01	1.04	1.05	1.05	1.04	0.98

Tabla 6. Analisis de la densidad dentro de la misma pasada.

4.2.4. El procesado geométrico de los datos.

Una vez procesada la información y aplicados los algoritmos para georreferenciar la información, se obtiene información de puntos discretos con todos los datos que pueden recoger este tipo de sensores: número de ecos, altitud del terreno desde donde irradió el haz de luz pulsada, intensidad de la irradiación recogida, tiempo, etc.

Con toda la información obtenida se hace necesaria una corrección geométrica de los datos, para ello se hizo un vuelo de calibración en un pequeño sector de 3x3 Km., sobre el cual se dieron 3 pasadas en sentido Este-Oeste y otras 3 pasadas en sentido Norte-Sur. Mediante el vuelo de calibración se calcularon los Offset entre los distintos sensores embarcados en el avión.

Los valores de los Offset, serán incorporados para el cálculo geométrico de georreferenciación de la información, pero aún es necesario, e incluso imprescindible, un segundo ajuste para eliminar las discrepancias en los bordes de pasada; éstas se deben a las limitaciones propias del sensor, en consecuencia se hace necesario realizar un ajuste para minimizar las desviaciones de los datos entre las diferentes pasadas.

Para realizar este cálculo se utilizan algoritmos de correspondencia de superficies planas, las cuales son extraídas de las nubes de puntos en las distintas pasadas. De todas las superficies extraídas se elegirán las superficies más planas y, con ellas, se ejecutará un ajuste iterativo por mínimos cuadrados hasta encontrar los parámetros de ajuste. En los gráficos, que se adjuntan, se observan los parámetros generales y los aplicados a cada pasada. El cálculo que aparece a continuación fue realizado por Azimut S.A.

5 RiPROCESS Scan Data Adjustment Protocol

Project:	SPAIN_2009_05_18
Protocol date:	2009-06-02 15:59
Operator:	MN
Comments:	Spain Q680
Program version:	RiPROCESS v1.3.0.2 (2009-03-09)
Computer:	VCOMP
Physical units:	m, deg

5.1 Observation parameters

Resolution [m]:	2.000
Diversification angle for StDevR application [deg]:	10.000
StDevR threshold for horizontal planes [m]:	0.000
StDevR threshold for skewed planes [m]:	0.050
Alpha threshold [deg]:	0.500
Height threshold [m]:	0.200
Maximum number of horizontal observations:	800
Maximum number of skewed observations:	800
Horz. angle threshold (for horizontal) [deg]:	0.000
Skew angle threshold (for EW/NS) [deg]:	10.000

5.2 Calculation parameters

Calculation mode:	Analyse
Calculation time:	17 secs, 51 msec
Max. num. evaluations:	2000
Tolerance:	0.000100
Param. check level:	Default
Search active:	True
Search radius [m]:	1.000
Angle tolerance [deg]:	5.000
Max. normal dist. [m]:	1.000
Quadtree cells - active:	True
Quadtree cells - count:	79385

5.3 Calculation results

Number of free parameters:	0
Number of observations:	76014
Error (Std. deviation) [m]:	0.0452

5.4 Laser data

Name	Roll	Pitch	Yaw	East	North	Height	Time
00518_070313	0.008	-0.010	0.007	-0.954	0.000	0.031	0.0000
00518_071217	0.000	0.009	0.015	0.037	0.000	0.000	0.0000
00518_072135	0.005	-0.006	0.007	0.022	0.000	0.007	0.0000
00518_073059	-0.004	-0.002	0.031	0.013	0.000	0.023	0.0000
00518_073956	0.001	0.007	-0.001	0.020	0.000	0.023	0.0000
00518_075410	0.003	0.000	0.006	0.055	0.000	0.009	0.0000
00518_080035	0.005	-0.007	0.021	0.055	0.000	0.003	0.0000
00518_080721	0.001	0.008	0.021	0.028	0.000	0.004	0.0000
00518_081339	0.001	-0.004	0.023	0.029	0.000	0.008	0.0000

Tabla 7. Resultados del procesado geométrico de ajuste entre pasadas del LIDAR.

4.2.5. Obtención de datos en altitud ortométrica.

Los datos originalmente se obtienen en cotas elipsoidales debido al uso de posicionamiento por satélite, por lo que para poder ser utilizados en los distintos proyectos de ingeniería han de ser transformados en cota ortométrica.

Este proceso consiste en calcular el valor de ondulación del geoide para el sector en el que se localizan los datos y aplicarlo al valor z de los puntos LIDAR. Para el cálculo se utilizó el programa Mincurv, que es una aplicación del Instituto Geográfico Nacional de España, el cual usa de la malla del geoide IBERGEO95, y mediante mínimos cuadrados aplica el valor de dicha malla al punto para el que se desea calcular el valor. En consecuencia, con esta aplicación y una malla de 100 puntos, se calculó la curvatura para este sector y se aplicó posteriormente a todos puntos LIDAR.

4.2.6. Clasificación de los datos.

Los datos obtenidos se corresponden con información discreta posicionada en todos los elementos que se pueden observar sobre la superficie terrestre.

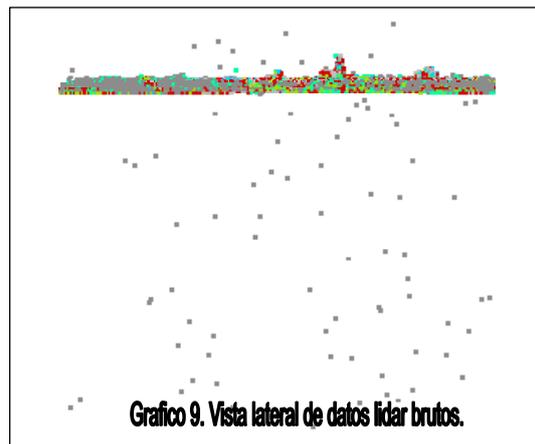
La información acerca de, en que tipo de elemento ha sido irradiado el haz de luz, no se tiene a priori, y se necesita para los diferentes usos del LIDAR, por ello hay que asignar esa información a los datos, la cual se obtiene mediante la clasificación, es decir asignar un valor añadido a la información, ya que ésta va a contener información del elemento en el que se posiciona.

La clasificación es un aspecto muy importante, pues en virtud de los cálculos o estudios que se deseen ejecutar, será necesario un Modelo de terreno, de construcciones, de superficies, etc. En consecuencia, a continuación incluiré una guía para la clasificación de la información LIDAR, elaborada en virtud de los análisis ejecutados en este proyecto.

Guía de Clasificación de la información LIDAR del campo de calibración; Guía de clasificación de un LIDAR de alta densidad.

En una primera aproximación a los datos, se procede a su visualización desde todos los ángulos, con el objetivo de obtener la información visual necesaria para determinar cuál debe ser el mejor método de trabajo. En esta labor se observa una primera incoherencia, debido a la existencia de un abundante número de puntos fugados y hundidos; éstos se corresponden con puntos que por alguna razón han sido mal calculados, bien porque en su procesado había mucha relación de señal-ruido o, simplemente, podría ser debido a la siguiente explicación:

- En alguno de los casos, considerando que estamos sobre un casco urbano, los puntos fugados podrían ser aves.
- De igual modo, los puntos hundidos en alguno de los casos se podrían haber producido por una reflexión del láser en distintos objetos del casco urbano hasta llegar de vuelta a sensor, por lo que al aumentar el tiempo de recorrido de la señal se entiende que están más lejos del sensor y se mostrarán como puntos hundidos.



La determinación de la clase de suelo (ground) es la que mejores garantías de éxito presenta, en todos los softwares que se utilicen. Se trata de determinar planos e inclinaciones, partiendo de los puntos más bajos, de tal forma que cuando un punto, respecto de sus vecinos, presenta pendientes imposibles, (las cuales son parametrizables), dicho punto es desechado. Pero cuando dicho punto presenta pendientes lógicas, un valor menor del parámetro establecido y, además, existe una continuidad de planos con los demás puntos contiguos, dicho punto se clasifica como punto terreno. Este proceso se realiza de forma iterativa, de manera que al final del proceso el programa clasifica como puntos terreno aquellos que presentan los mejores valores de continuidad de planos y pendientes. Ver imagen adjunta a continuación.

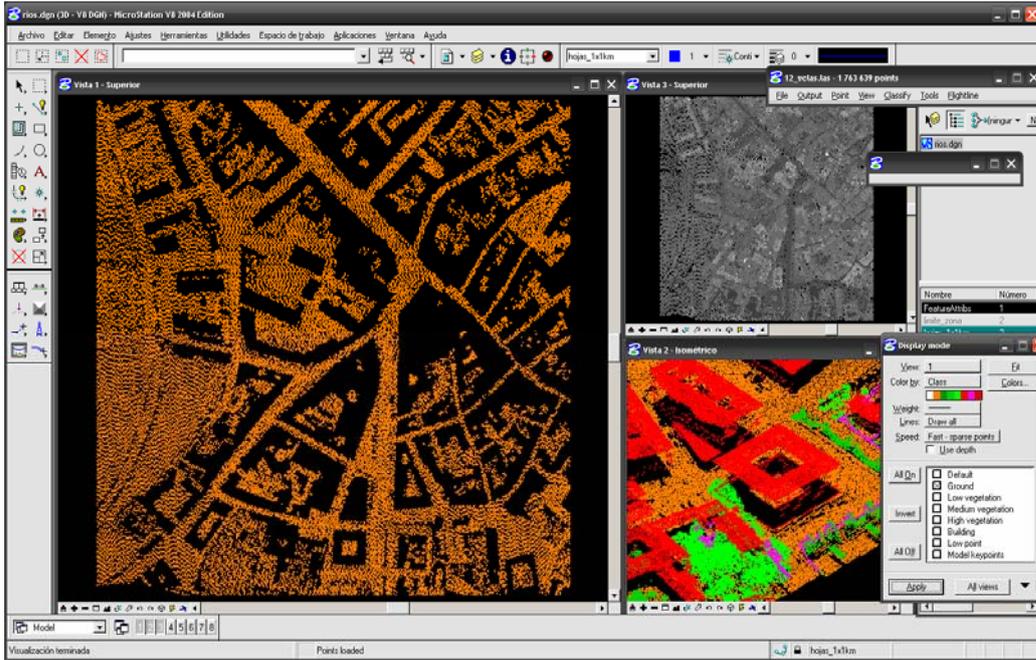


Grafico 10. Vista de puntos Terreno

La clasificación de las edificaciones necesita de los puntos terreno y de parámetros: el tamaño mínimo de las edificaciones. Este proceso consiste en determinar planos inclinados y continuos dentro de la tolerancia dada. Las garantías de éxito, en esta clasificación, son muy elevadas. Ver imagen adjunta a continuación.

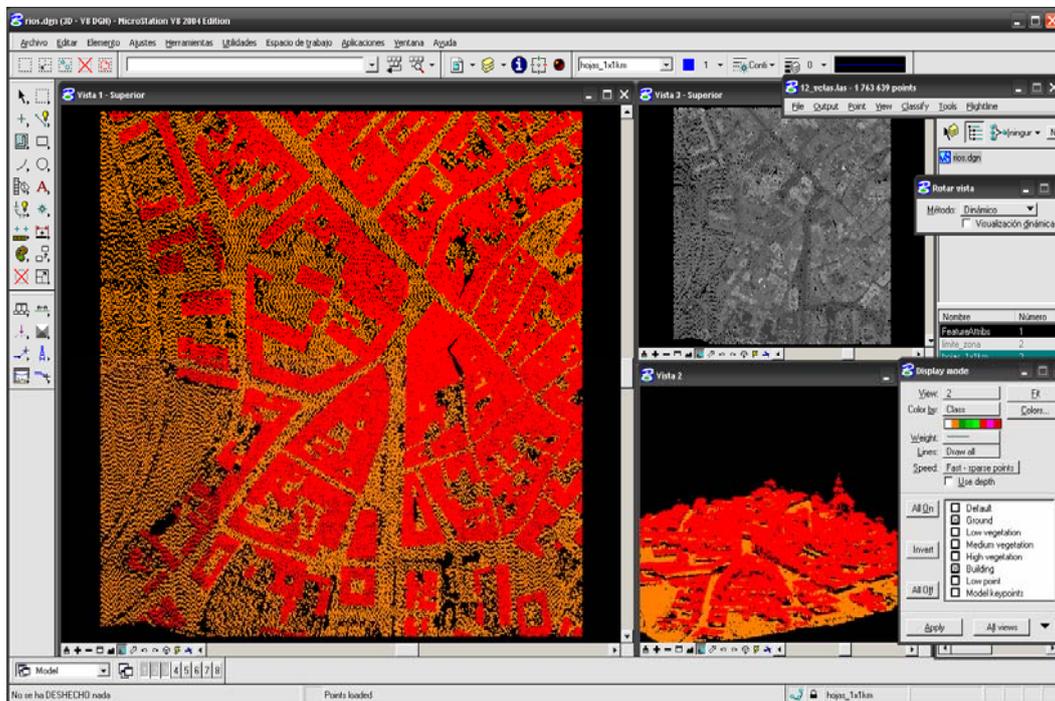


Grafico 11. Vista de puntos sobre construcciones.

Las siguientes clasificaciones no son tan automáticas como las anteriores, existe un amplio abanico de puntos en todo tipo de superficies: fachadas, muros, mobiliario urbano, coches, vegetación, chimeneas, antenas, grúas de construcción, viandantes, animales, etc. El método, que he empleado, consiste en clasificar los distintos elementos, empezando por los más altos y continuando hasta clasificar los más bajos,

Para clasificar la vegetación alta, los software suelen incorporar utilidades que pueden determinar puntos en virtud de la distancia al terreno y su distribución, es decir, los puntos sobre los árboles aparecen elevados y en grupos aislados o grandes agrupaciones. Este tipo de

clasificación en las áreas urbanas no es muy exitosa, aunque sí algo más en los sectores rurales. Otra solución consiste en utilizar el valor de intensidad, ya que la intensidad de la vegetación es muy concreta debido a su coloración y a la variabilidad en los planos de reflexión

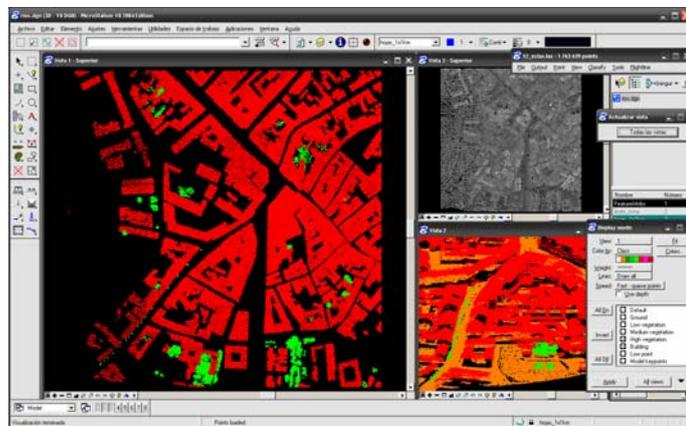


Grafico 12. Vista de puntos de vegetación alta.

Determinar muros y cerramientos presenta grandes dificultades ya que los puntos, en las fachadas y en la vegetación media y baja, se sitúan a la misma altura que los muros y cerramientos. Su clasificación en los sectores urbanos requiere de una labor manual y en los sectores rurales se pueden obtener desde las clasificaciones de elementos lineales, aunque con muy pocas garantías de éxito. Actualmente, en la mayoría de los casos, se opta por eliminar esta información, salvo para trabajos concretos y específicos y de muy pequeña escala.

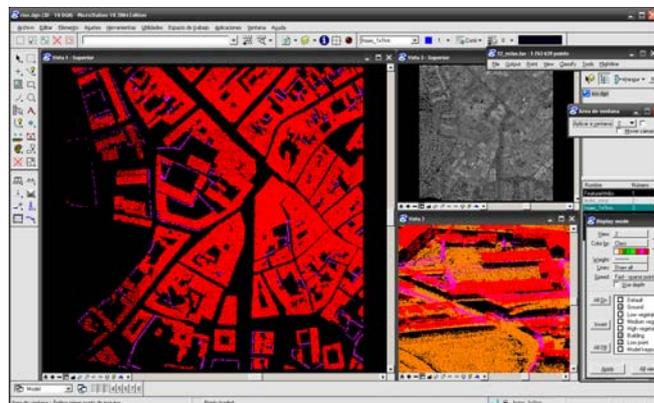


Grafico 13. Vista de puntos sobre muros y cerramientos.

- La determinación de fachadas se puede automatizar mediante los siguientes procedimientos:
 - Los software tienen una herramienta para determinar polígonos, por consiguiente se podrían generar polígonos de las construcciones, de tal forma que todos los puntos sin clasificar que están dentro de los polígonos se van a corresponder con fachadas. Este procedimiento va a presentar algunos errores que deberán ser revisados y reclasificados manualmente.
 - Considerando que en las fachadas, en la mayoría de los casos, los puntos se corresponden con puntos de los ecos 2 y 3, se podrían clasificar los puntos de estos ecos, que están dentro de las construcciones, como fachadas. Ya que el eco 1, cuando hay varios ecos en las construcciones, suele situarse en los aleros.
- En la vista 2 de la siguiente imagen, los puntos verdes, azules y rojos se corresponden con las fachadas, y equivalen a los ecos 1, 2 y 3 cuando hay ecos múltiples. El blanco es eco 1, único. En este caso, también se puede observar que alguno de los ecos únicos está localizado en las fachadas, por lo que la automatización plena es compleja.

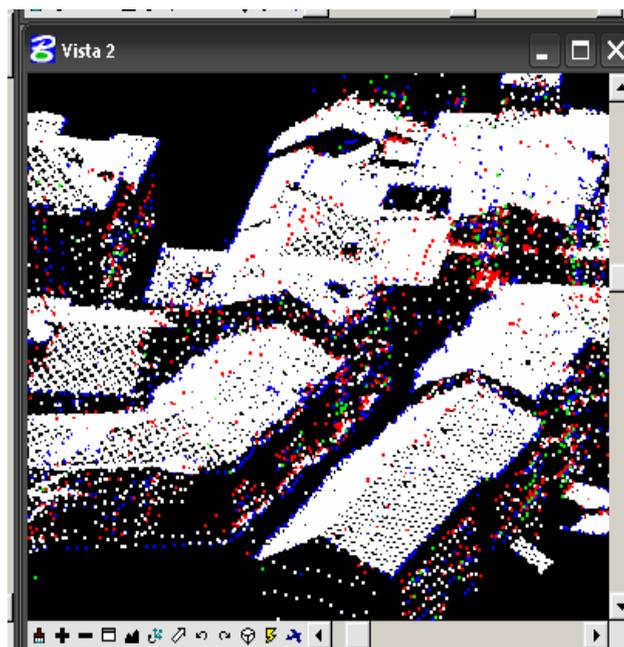


Gráfico 14. Vista de puntos sobre fachadas.

4.2.7. Generación de superficies y Modelos digitales del terreno.

Los datos obtenidos y clasificados se pueden visualizar de distintas formas y pueden generar productos variados para ser utilizados en los distintos proyectos.

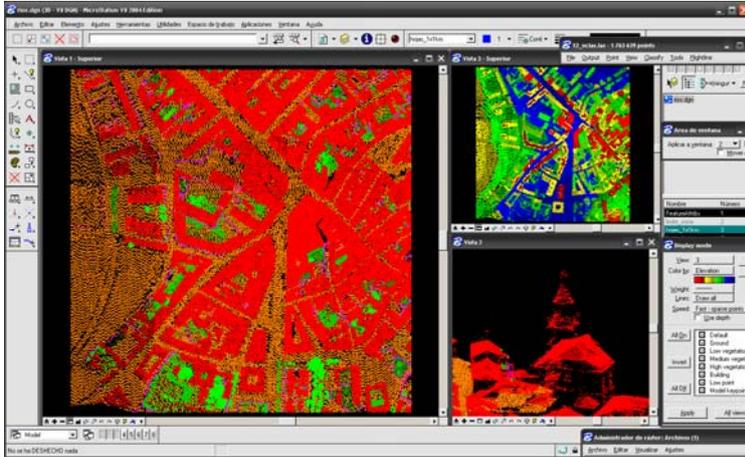


Gráfico 15. Lidar clasificados; Gráfico 16. Lidar clasificados sobre ortofoto.

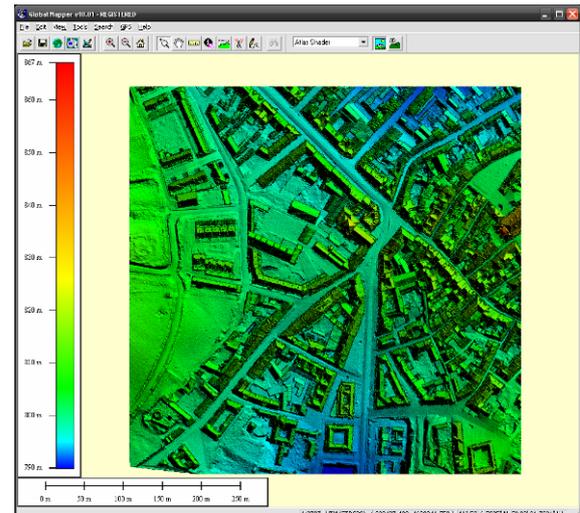
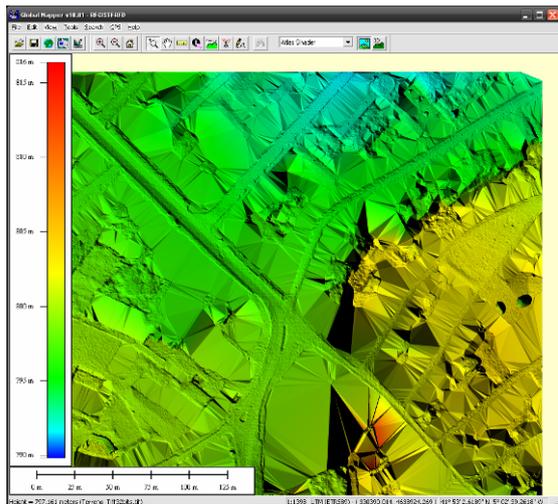
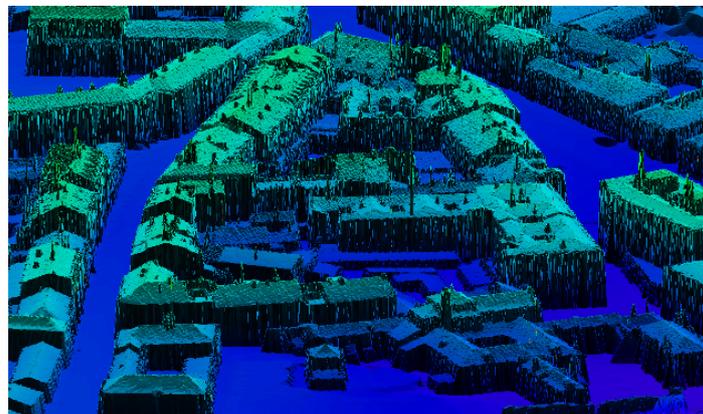


Gráfico 17 y 18. Lidar en tintas hipsométricas con y sin construcciones.

Gráfico 19. Modelo 3D con Terreno y construcciones.



4.3. Software.

En este apartado se pretenden examinar las características de los modelos de análisis para analizar las llanuras de inundación. El modelo de análisis consiste en la realización de una simulación de rotura de la balsa con su posterior demarcación de las llanuras de inundación, ello se ejecutará mediante dos software distintos el Guad-2D y el Hec-Ras. Se ha decidido por estos dos software porque usan un modelo de análisis distintos: el Guad-2D utiliza un sistema de cálculo bidimensional, mientras que el Hec-Ras utiliza un sistema unidimensional.

El Dambreak también se ha utilizado, pero como el modelo numérico que utiliza es idéntico al utilizado por el Hec_RAS, sólo se va a realizar algún cálculo para observar su funcionamiento. Por lo tanto, aunque se mencionará en las comparativas, no va a ser objeto de estudio en este proyecto.

4.3.1. El Hec-RAS.

Hec-Ras son las siglas de Hydrologic Engineering Center River Analysis System. A priori, es un software que pretende determinar las llanuras de inundación en un modelo de datos cuando se establece una ruptura de una presa o balsa, o se produce un gran aumento de una avenida.

Este software fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros Hidráulicos de la Fuerzas Armadas de los Estados Unidos, en el centro Davis en California en el año 2003. Es un programa gratuito, y puede trabajar en un entorno GIS, lo que le confiere un gran atractivo y facilita enormemente la comparación de los distintos resultados obtenidos. El modelo de trabajo de Hec-Ras podría resumirse en que es un programa capaz de resolver las ecuaciones de energía de Saint Venant, es decir mantener la conservación de la masa y la cantidad de movimiento entre las distintas secciones o perfiles que se le suministran, considerando un flujo en una dimensión, en movimiento estable, variado o gradualmente variado.

El análisis tiene una serie de premisas, para poder realizar un cálculo correctamente es imprescindible que las secciones sean perpendiculares al sentido de avance del flujo en lecho menor de la esorrentía. También permite considerar lo obstáculos que el flujo se encuentre en su paso: puentes, estrechamientos. En este estudio no se han considerado los puentes, ya que el modelo de Guad_2D no los utiliza, así podemos asimilar mejor los resultados de ambos para establecer las comparativas que son objeto del proyecto.

Utiliza los condicionamientos físicos de conservación de la energía y los que afectan al movimiento del agua, que son: la fuerza que impulsa el movimiento, la gravedad y la fuerza que mayor resistencia ejerce al movimiento, el rozamiento. En otras palabras utiliza las ecuaciones de la energía potencial, la cual depende de la altura del agua y de la superficie, y la energía cinética la cual depende de la masa y la velocidad.

Si consideramos A, la sección 1, y B a la sección 2, y la fricción entre la sección mediante el coeficiente de Manning, el cual oscila desde 0.020 para superficies muy lisas y planas, hasta 0.100 para superficies muy rugosas y desiguales; obtenemos que la fórmula de conservación de la energía a aplicar es la siguiente:

$$E_{\text{cinética_A}} + E_{\text{potencial_A}} + \text{distancia} \times \text{fricción} = E_{\text{cinética_B}} + E_{\text{potencial_B}}$$

El modo de trabajo con este software es el siguiente:

- En primer lugar se delimitarán los perfiles y las llanuras de inundación aproximadas, así como la asignación de coordenadas 3D a los perfiles. Ello se realiza desde un GIS, en nuestro caso ArcGIS 9.3.
- El segundo paso es realizar los cálculos con el Hec-RAS, propiamente dicho.
- El tercer y último paso, consiste en que con los resultados obtenidos en Hec-RAS, serán explotados en un SIG, con el objeto de establecer las llanuras de inundación, calados y caudales mediante la aplicación de los datos calculados con respecto a un TIN.

4.3.2. El Guad_2D.

El Software Guad-2D es un programa Español, desarrollado en la Empresa Inclam Ingenieros del Agua, este es un estudio de ingeniería hidráulica y medioambiental con sede en Madrid, en colaboración con el Grupo de investigación hidráulica computacional del Área de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Zaragoza.

Sintetizando, este software utiliza el modelo bidimensional de simulación, diseñado para el análisis de ondas de avenida provocadas por la lluvia o por la destrucción gradual o espontánea de presas y muros de contención de grandes depósitos de agua. Tiene 3 herramientas, 2 gratuitas y una con derechos de uso mediante el pago de la correspondiente la licencia.

Guad Creator es el paso previo al Guad_2d, con esta herramienta el usuario podrá preparar los datos de la simulación para su posterior cálculo numérico. Esta herramienta es gratuita.

Guad | 2d simula mediante algoritmos numéricos de volúmenes finitos, permitiendo obtener resultados reales tanto en regímenes estacionarios supercríticos, subcríticos o mixtos. Esta herramienta incluye todas las condiciones posibles (seco, mojado o partiendo de una simulación anterior). Es una herramienta de pago.

El **GuadView** tiene capacidades GIS que posibilitan la visualización, mediante capas ráster, vectoriales y ortofotos, de los resultados de la simulación, con lo que así se podrán identificar las zonas inundables o las láminas de nivel, los calados, las velocidades y los caudales.



Gráfico 20. Vistas de las herramientas Guad_2D.

La imagen que se adjunta ha sido tomada del catálogo promocional del software.

En lo que se refiere al modelo matemático que utiliza, se pueden comentar algunas de las consideraciones que M. Rodríguez A., Brufao P. y Murillo J. enuncian en su publicación, analizando el modelo bidimensional de este software:

El movimiento del flujo depende de los principios fundamentales de conservación de la masa y de la segunda ley de Newton. Los autores, para resolver las ecuaciones del modelo matemático, usan el método de volúmenes finitos, ya que pretenden combinar lo mejor de los métodos finitos, su flexibilidad geométrica; con lo mejor de los métodos en diferencias finitas, su flexibilidad en la definición del flujo discreto. Así, para resolverlo, se calcula el valor de las variables en los centros de cada celda del Modelo digital del terreno, por ello la elección del tipo de malla (rectangular, cuadrada, hexagonal...) es importante para las simulaciones numéricas.

El modo de trabajo es el siguiente:

- En primer lugar se establece todo el conjunto de parámetros para realizar la simulación, esto se prepara con la herramienta Guad-Creator.
- En segundo lugar se realiza la simulación numérica mediante la herramienta Guad-GUI.
- En último lugar se analizan los resultados obtenidos mediante la herramienta Guad-View.

4.4. Consideraciones de Matemática Hidráulica

Los estudios que se pretenden desarrollar tienen por objeto conocer las variables hidráulicas de calado, velocidad y caudal, durante un episodio de avenida o inundación. La validez y la adecuación a la realidad, de los resultados obtenidos en estas variables, va a depender de que las ecuaciones de partida y el esquema numérico se ajusten lo máximo posible a la realidad física y, por supuesto, que los datos o información objeto representen fielmente el espacio de estudio.

Los modelos matemáticos de análisis hidráulico han ido evolucionando especialmente durante los últimos 20 años, de igual modo a como se han ido desarrollando y evolucionando las capacidades de cálculo de los ordenadores.

Antiguamente, el análisis sólo se hacía en modelos unidimensionales, en la actualidad se está planteando la necesidad de utilizar modelos bidimensionales o cuasi-bidimensionales, ya que se ha demostrado que la hipótesis unidimensional se aleja demasiado de la realidad y esa lejanía es mayor si predomina el flujo horizontal sobre el flujo vertical.

A continuación voy a hacer una pequeña reseña en relación a los tipos de régimen, así como sus consideraciones matemáticas.

4.4.1. Régimen variable unidimensional.

El régimen de una dimensión se divide en régimen variable, que es cuando las variaciones de calado y caudal se producen en tiempos muy prolongados y grandes distancias, y en régimen rápidamente variado, que corresponde a cuando las variaciones son lo contrario del caso anterior.

Las ecuaciones que describen ambos regímenes, en la lámina libre, son las de Saint Venant, éstas parten de la premisa de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento. Concretamente estas ecuaciones, cuando se trata de un modelado de terreno que genera una masa de agua, que no es en forma de prisma, son las siguientes:

Ecuaciones 1. Ecuaciones de Saint Venant para modelos unidimensionales I.

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{U} + \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{F} = \mathbf{H}$$

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} A \\ Q \end{pmatrix} ; \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + gI_1 \end{pmatrix} ; \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 0 \\ gI_2 + gA(S_0 - S_f) \end{pmatrix}$$

Donde A es la sección de área mojada, Q el caudal circundante, I la fuerza debida a la presión, F es el tensor de flujo y H es el término independiente.

En el caso contrario, cuando el modelado genera una masa de agua en forma de prisma serán:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA(S_0 - S_f)$$

Ecuaciones 2. Ecuaciones de Saint Venant para modelos unidimensionales II

4.4.2. Régimen cuasi-bidimensional.

Estos modelos surgieron con los primeros intentos por modelar la inundación de zonas llanas a partir del desbordamiento de los cauces principales, para resolverlo se plantearon las ecuaciones de Saint Venant para el cauce principal, mientras que las llanuras de inundación representaban células de almacenaje. Es decir, puede haber un

$$b \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

caudal lateral de entrada, donde Q es el Caudal, x la abscisa de la sección, t el tiempo, b el ancho de la superficie, g la gravedad, I_0 la pendiente del fondo e I la pendiente motriz.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{Q}{A} q = gA[I_0 - I]$$

Ecuaciones 3. Ecuaciones de Saint Venant para modelos cuasi-bidimensional

Las llanuras de inundación se esquematizan mediante células de almacenamiento conectadas entre si, la ecuación que lo define es la que se adjunta a continuación, donde A_{sk} es el área superficial de la célula k, z_k y z_i son las cotas de la lámina de agua en la células k e i y Q_{ki} es el caudal de transferencia entre ambas.

$$A_{sk} \frac{\partial z_k}{\partial t} = \sum_i Q_{ki}(z_k, z_i)$$

Ecuaciones 4. Ecuación de las llanuras de inundación en el modelo cuasi-bidimensional.

4.4.3. Régimen variable en dos dimensiones.

A partir de las leyes físicas de conservación que rigen el flujo de un fluido (la masa, la cantidad de movimiento y las ecuaciones constitutivas); si particularizamos en un fluido incomprensible e isótropo, el agua, se obtienen las ecuaciones de Navier-Stokes para el movimiento instantáneo; y si en estas ecuaciones consideramos variable el tiempo, obtendremos las ecuaciones del Reynolds; y si a estas últimas se integran respecto de la profundidad para eliminar la verticalidad llegamos a las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales. Estas serán validas siempre que se cumplan las siguientes premisas: las velocidades verticales deben ser muy pequeñas y las pendientes de fondo del cauce

serán muy suaves, lo que confiere un gran predominio de la dimensión horizontal sobre la vertical. Si utilizamos la notación vectorial las ecuaciones de Saint Venant para dos dimensiones serán \rightarrow

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{U} + \nabla \mathbf{F} = \mathbf{H}$$

Ecuaciones 5. Ecuaciones de Saint Venant en notación vectorial para modelos bidimensional

Donde \mathbf{U} es el vector de variables del flujo, \mathbf{F} es el tensor de flujo y \mathbf{H} es el término independiente o término fijo. Esta ecuación tiene 3 términos: el primero representa la variación temporal local, masa y cantidad de movimiento; el segundo es la variación espacial de flujo; y el tercero, también llamado término independiente, representa la ganancia o pérdida de masa o de cantidad de movimiento por unidad de tiempo, pero como la variación de masa siempre debe

ser nula, la primera componente del vector independiente es siempre cero.

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix}; \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} hu & hv \\ hu^2 + g\frac{h^2}{2} & huv \\ huv & hv^2 + g\frac{h^2}{2} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 0 \\ gh(S_{ax} - S_{fx}) \\ gh(S_{ay} - S_{fy}) \end{pmatrix}$$

Ecuaciones 6. Desarrollo de los terminos de la Ecuaciones de Saint Venant en notación vectorial para modelos bidimensional

4.4.4. La técnica de los volúmenes finitos

Este planteamiento, actualmente, ha demostrado ser muy útil para desarrollar esquemas de alta resolución en 2 dimensiones. Además permite discretizar el dominio con mallas irregulares y por lo tanto se adapta a los contornos.

Si utilizamos la formulación integral de las ecuaciones, obtendremos una expresión integral para un volumen V cualquiera de las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales.

$$\int_V \mathbf{U}_i dV + \int_V \nabla \mathbf{F} dV = \int_V \mathbf{H} dV$$

Si aplicamos el teorema de Gauss a la segunda integral tendremos, la siguiente ecuación, donde S es la superficie que encierra a V .

$$\int_V \mathbf{U}_i dV + \oint_S (\mathbf{F} \cdot \mathbf{n}) ds = \int_V \mathbf{H} dV$$

Si llamamos con U_{ij} y H_{ij} , respectivamente, al valor promedio en el volumen finito V de las variables dependientes y del término independiente, la ecuación anterior se puede reescribir como

$$\mathbf{U}_i = \frac{-1}{V_{i,j}} \oint_S (\mathbf{F} \cdot \mathbf{n}) ds + \mathbf{H}_{i,j}$$

Ecuaciones 7, 8 y 9. Desarrollo de las ecuaciones de Saint Venant para volúmenes finitos.

4.5. Descripción Geográfica del área donde se pretenden realizar el estudio y las simulaciones.

Como último apartado en el análisis de los datos y de los métodos a utilizar, se hace necesario hacer un pequeño análisis geográfico de las características hidrológicas, climáticas y geológicas del área, ya que el medio en el que se va a desarrollar esta simulación nunca será ajeno e impasible ante un episodio de inundaciones. Por consiguiente, si del análisis de los condicionamientos geográficos se derivará alguna consideración de especial relevancia para episodios de inundación se debería tener en cuenta.

4.5.1. Consideraciones hidrológicas.

La simulación se va a centrar en torno a río Sequillo ya que, tras la ruptura de la balsa, el agua va a discurrir por el lecho mayor de este río.

El río Sequillo según los textos antiguos se le llamaba "Rivulo Sicco", "Rivo Sico" o "Torrente Sicca". La acepción semántica de su nombre hace referencia a su principal característica, su escaso caudal. Pero es el único río de esta comarca que no se seca en verano, gracias a los aportes continuos del Canal de Castilla.

En su recorrido pasa por 4 provincias, León, Palencia, Valladolid y Zamora. Desemboca en el río Valderaduey, entre Cañizo y Castronuevo, después de haber hecho un recorrido total de 123 Km.

Nace en la provincia de León, de unos cerros que hay entre San Martín de la Cueva y Villarán de Cea a unos 935 metros de altitud. Su dirección es de Norte a Sur, y atraviesa los términos de: San Nicolás del Real Camino, Escobar, Villada, donde recibe por el Este aguas del arroyo los Templarios; continúa por Villacidaler y Boadilla de Rioseco, Herrín de Campos, Villafrades, Gatón, Villabaruz y Tamariz donde es atravesado en altura por un ramal del Canal de Castilla. El río continúa hacia Villanueva de San Mancio, donde recibe las aguas del río Aguijón y donde su caudal adquiere

cierta entidad; pero es, especialmente, en Medina de Rioseco recibe un caudal constante del Canal de Castilla. Prosigue por Villabrágima, Tordehumos, Villagarcía, Villanueva de los Caballeros y San Pedro de Latance, y en la provincia de Zamora toma dirección Oeste y pasa por Belver de los Montes, para desembocar en el río Valderaduey a 657 metros de altitud.

La diferencia de altura entre el nacimiento y la desembocadura es de unos 278 metros, discurre por un lecho menor encauzado artificialmente 6 metros, en torno a su amplio y llano lecho mayor. En la imagen adjunta se puede observar la orografía del valle por donde discurre el río Sequillo, la z está exagerada en valor 1 a 7 Metros y el sector observado se corresponde con una escala 1:50.000.

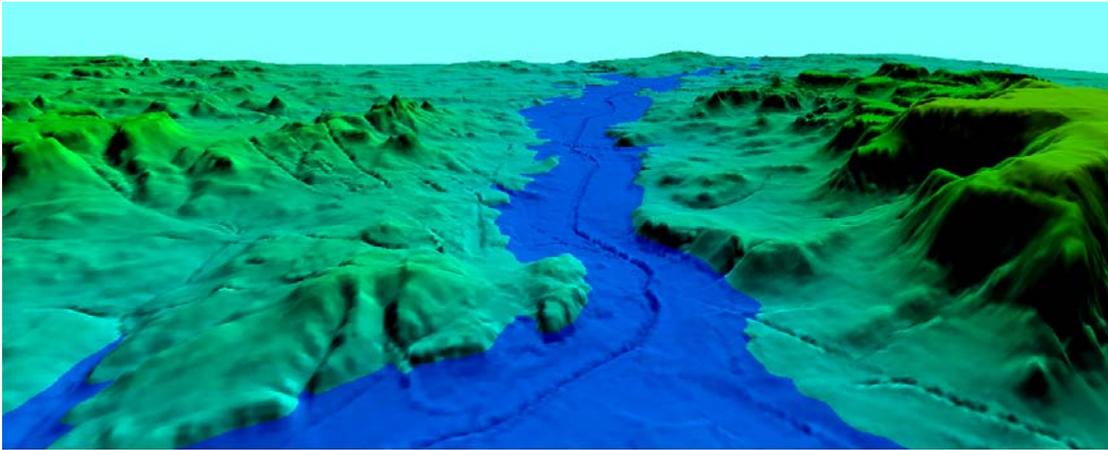


Grafico 21. Lecho mayor del río Sequillo.

El interfluvio de la derecha, según se observa en la imagen aunque en realidad se sitúa en la margen izquierda del río, se corresponde con los Montes Torozos; y el interfluvio de la izquierda se corresponde con las cuestas de Tierra de Campos. Con el color azul intenso está demarcando el lecho mayor de río Sequillo.

Sus aguas suelen ser marrones por la abundancia de lúgamo arcilloso de su cauce.

Su caudal medio oscila en unos 99 m³ en Medina de Rioseco, aunque podemos denotar algún episodio muy esporádico de desbordamientos, en 1793 destruyó completamente 70 casas de las 73 que formaban el pueblo de Villafrades y en 1835, en Herrín de Campos, arrasó el ganado lanar, las mieses de las eras, etc.

En cuanto a los acuíferos: los profundos tienen su origen en el terciario, se les calcula una potencia de 1000 m. y los superficiales son restos de paleocauces, presentan muy poca profundidad y su colmatación esta asociada a las precipitaciones de primavera y otoño, que es cuando son abundantes, pero se suelen secar en verano.

En la siguiente tabla se adjuntan los datos de caudales del río Sequillo de los últimos 30 años, según la estación de aforos de Medina de Rioseco.

CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL DUERO

SERVICIO DE AFOROS Y ESTADÍSTICAS

RESUMEN HISTÓRICO DE DATOS DE LA ESTACIÓN

ESTACIÓN DE AFOROS Nº: 124
Río: SEQUILLO
En: MEDINA DE RIOSECO

Clasificación decimal: 02-01-18-03
Superficie cuenca estación: 802 Km²
UTM X: 330930 UTM Y: 4639524

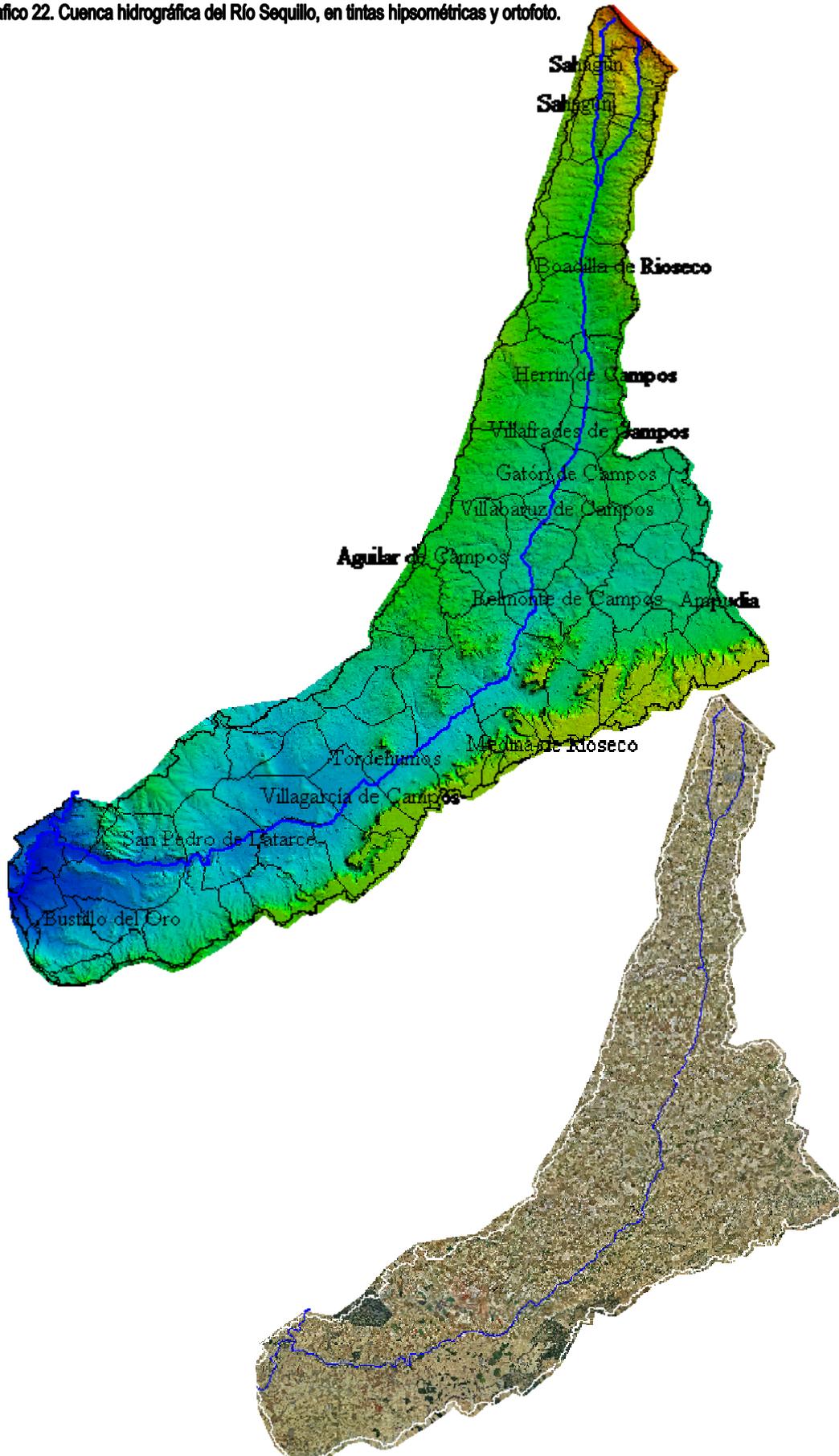
AÑOS	DATOS ANUALES			APORTACIONES MENSUALES EN Hm ³												CAUDALES MÁXIMOS ANUALES						
	PREC		APORTACIÓN	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	Q ₂	Fecha		Q ₂	Fecha		
	mm.	mm.	Hm ³													m ³ /s	mes	dia	m ³ /s	mes	dia	
1972-73	397	15	12.17	2.11	2.02	1.37	3.14	1.04	0.57	0.28	0.95	0.33	0.09	0.18	5.00	1	22	.	.	.	.
1973-74	455	19	15.06	0.37	1.24	0.57	2.82	2.88	3.82	1.51	0.89	0.25	0.68	0.11	0.34	11.87	3	22	.	.	.	.
1974-75	321	19	15.44	0.51	0.87	1.08	1.01	0.98	0.75	0.92	0.75	1.88	1.93	2.03	2.98	3.63	8	28	.	.	.	.
1975-76	350	97	77.53	11.81	9.94	7.33	8.23	10.44	9.90	7.90	0.77	2.28	2.45	2.88	3.85	7.85	10	22	.	.	.	.
1976-77	501	34	26.95	2.95	1.18	0.94	3.23	5.20	1.88	1.01	2.44	3.54	1.28	1.85	1.89	4.33	1	31	5.50	1	31	.
1977-78	491	52	41.84	1.57	0.87	4.20	2.48	9.31	7.23	2.03	2.48	3.11	4.94	2.34	1.51	28.20	3	1	37.05	3	2	.
1978-79	474	73	58.89	1.35	0.98	2.17	8.33	18.98	7.72	5.82	3.28	3.98	3.74	3.25	3.55	21.12	2	11	28.19	2	10	.
1979-80	381	30	23.88	2.51	1.89	1.90	1.89	1.92	1.49	1.85	2.17	2.24	2.07	2.51	1.81	2.92	4	17	4.15	4	18	.
1980-81	278	15	12.14	2.80	1.05	0.88	0.73	0.59	0.65	0.72	0.51	0.58	1.82	1.23	0.77	2.15	7	8	2.89	10	.	.
1981-82	339	12	9.88	0.80	0.45	0.89	0.78	0.53	0.40	0.39	0.74	2.52	0.87	0.85	0.83	2.30	8	2	2.77	8	4	.
1982-83	441	15	12.29	0.57	0.70	0.42	0.39	0.31	0.51	1.78	1.31	1.48	1.59	2.45	0.82	2.84	5	2	3.73	5	2	.
1983-84	405	18	14.48	0.72	0.87	2.22	1.50	0.94	0.49	0.54	1.82	1.79	1.03	1.78	0.98	4.87	12	10	8.38	12	20	.
1984-85	540	43	34.38	1.87	4.99	3.77	2.95	8.53	2.52	3.27	1.98	2.51	1.11	1.35	1.53	9.70	2	11	18.10	2	11	.
1985-86	325	22	18.02	1.44	1.47	2.87	1.98	2.22	1.71	2.02	0.97	0.88	0.71	0.59	1.35	2.15	3	1	2.92	3	1	.
1986-87	384	18	14.80	0.83	0.73	1.95	1.91	1.82	1.50	1.04	0.87	1.49	1.93	0.23	0.51	2.78	8	15	22.41	8	12	.
1987-88	639	57	45.74	1.58	1.45	2.42	4.21	3.29	3.89	4.88	9.84	5.84	3.88	2.12	2.58	43.83	5	15	87.17	5	15	.
1988-89	389	25	20.09	1.83	1.89	1.18	1.40	0.95	1.33	1.70	4.08	1.81	0.88	0.70	2.58	4.71	9	11	5.37	9	11	.
1989-90	574	74	59.03	3.82	4.99	21.21	8.88	8.08	2.74	2.45	3.77	1.79	1.77	1.59	3.00	38.97	12	22	51.49	12	18	.
1990-91	.	34	27.04	1.08	1.11	2.08	2.58	1.88	4.83	1.94	1.43	1.88	2.44	1.57	4.88	9.23	3	9	12.99	3	9	.
1991-92	.	32	25.32	1.99	2.39	2.59	1.72	1.99	1.84	2.02	1.02	2.26	1.22	3.15	3.38	4.34	9	21	8.41	9	28	.
1992-93	.	41	32.84	1.07	2.84	3.91	1.77	0.97	2.48	2.17	3.78	2.72	1.89	4.70	4.59	8.48	8	27	9.42	8	28	.
1993-94	.	34	27.24	4.19	1.05	1.32	4.18	1.87	2.10	3.03	2.95	1.77	0.88	1.88	2.08	4.85	1	13	5.84	1	13	.
1994-95	.	14	11.21	0.53	0.52	0.21	1.48	1.45	0.51	0.91	1.28	1.18	1.07	0.79	1.33	4.07	7	4	5.17	7	3	.
1995-96	.	112	90.09	0.55	4.44	7.54	48.49	5.00	3.93	3.51	4.57	2.88	3.11	4.01	4.28	83.03	1	7	121.42	1	9	.
1996-97	.	85.3	68.38	2.40	1.88	10.55	22.82	7.18	2.15	1.52	3.00	8.37	3.82	4.01	3.30	35.28	1	21	42.07	1	21	.
1997-98	.	121	98.88	1.57	22.48	33.12	14.71	8.71	2.21	4.08	1.89	3.24	0.81	1.94	2.32	99.93	12	18	128.33	12	18	.
1998-99	.	34	28.87	0.40	0.09	0.21	0.89	0.38	0.59	1.90	2.09	2.55	5.48	7.43	4.90	8.23	7	28	10.22	8	28	.
1999-00	.	33	28.83	1.94	1.42	1.70	1.42	1.28	2.97	4.05	2.57	2.70	1.94	2.25	2.39	2.49	4	5	2.91	8	11	.
2000-01	.	93	74.48	1.79	1.89	10.38	15.97	8.47	17.28	5.01	5.02	2.23	2.20	2.11	2.17	32.00	3	5	48.40	3	5	.
2001-02	.	23	18.28	1.15	0.88	0.97	1.98	1.01	1.85	2.32	1.91	1.38	1.83	1.59	2.24	5	13	2.39	5	13	.	
2002-03	.	62	49.90	1.52	1.85	5.89	10.83	7.31	5.44	4.77	3.83	2.15	2.24	2.01	2.28	18.40	2	28	32.90	12	27	.
2003-04	.	35	27.81	1.15	3.72	3.97	2.28	2.25	3.21	3.14	2.48	1.34	1.35	1.82	1.30	8.98	12	1	18.90	12	1	.
2004-05	.	14	11.58	0.79	0.43	0.54	0.87	0.88	0.79	1.87	1.18	1.02	1.38	1.12	1.33	1.39	4	8	1.80	4	8	.
2005-06	.	37	29.31	1.91	5.49	2.51	2.79	1.92	2.78	4.23	1.88	1.84	1.42	1.88	0.80	4.14	11	8	4.87	11	8	.
2006-07	.	43	34.28	0.98	4.54	7.83	2.00	3.31	2.81	2.38	4.87	2.01	1.27	1.38	1.32	12.00	11	28	15.10	11	28	.

VALORES

MEDIO8:	424	42	34.00	1.82	2.88	4.34	5.31	3.80	3.02	2.52	2.44	2.21	1.89	2.03	2.13	15.14	.	.	23.18	.	.	.
MÁX.:	639	121	98.88	11.81	22.48	33.12	48.49	18.98	17.28	7.90	9.84	8.37	5.48	7.43	4.90	99.93	.	.	128.33	.	.	.
MÍN.:	278	12	9.88	0.37	0.09	0.21	0.39	0.31	0.40	0.28	0.51	0.25	0.09	0.08	0.18	1.39	.	.	1.80	.	.	.
CAUDAL MEDIO (m ³ /s)	1.08	0.88	1.03	1.82	1.98	1.49	1.13	0.97	0.91	0.85	0.71	0.78	0.82									

Tabla 6. Tablas de estadísticas de aforos del río Sequillo en Medina de Rioseco.

Grafico 22. Cuenca hidrográfica del Río Sequillo, en tintas hipsométricas y ortofoto.



4.5.2. Consideraciones climáticas.

Los datos de las estaciones de medición meteorológica que hay en la zona son:

Las temperaturas medias

MES	Medina de Rioseco	Villalón de Campos	Media
Enero	4,21	3,74	3,97
Febrero	5,76	5,69	5,72
Marzo	8,39	8,70	8,54
Abril	10,37	9,42	9,89
Mayo	13,91	13,72	13,82
Junio	18,08	17,89	17,99
Julio	21,34	21,42	21,38
Agosto	21,00	21,00	21,00
Septiembre	17,87	16,11	16,99
Octubre	12,93	12,17	12,55
Noviembre	7,92	6,67	7,30
Diciembre	4,88	4,30	4,59

Tabla 10. Temperaturas medias de la comarca de Tierra de Campos

Precipitaciones (en mm.)

	Sahagún	Villada	Villalón	Villacarra.	Villafrades	Medina R.	Berrueces	MEDIAS
Enero	45,90	47,76	49,76	45,20	47,26	39,53	42,48	45,41
Febrero	39,53	40,94	43,07	41,45	37,13	33,55	35,36	38,72
Marzo	34,72	38,63	25,79	35,29	34,82	31,22	33,54	33,43
Abril	36,49	38,99	45,41	41,89	41,53	38,63	42,45	40,77
Mayo	55,24	53,81	53,21	57,88	46,43	46,26	49,21	51,72
Junio	41,49	39,75	33,41	45,25	35,54	34,33	40,83	38,66
Julio	16,95	18,60	24,53	23,14	20,05	21,54	18,20	20,43
Agosto	16,18	18,13	19,87	17,13	14,06	15,45	14,33	16,45
Septiembre	31,39	33,75	33,15	36,20	31,84	30,30	31,16	32,54
Octubre	48,30	43,58	46,59	50,30	44,11	41,93	44,00	45,54
Noviembre	52,62	54,25	48,31	56,22	47,01	47,14	51,33	50,98
Diciembre	44,28	46,04	47,93	50,56	47,10	43,75	50,80	47,21

Tabla 11. Precipitaciones de la comarca de Tierra de Campos

TOTAL	461,87
--------------	---------------

Con los datos expuestos se puede constatar que el clima es un Mediterráneo fresco, según la clasificación agroclimática de Papadakis se corresponde con: invierno avena fresca y verano maíz.

La media anual de las precipitaciones es la normal de este sector, la margen norte del río Duero, su ubicación Norte es la que explica una media de precipitaciones un poco más altas que en el centro de la cuenca del Duero.

4.5.3. Consideraciones geomorfológicas.

El modelado del terreno se corresponde con una pequeña cuenca, donde las cuestas de laterales recogen el agua de las precipitaciones y las conducen hacia el centro del valle, por donde discurre el río Sequillo.

Las cuestas, muy alomadas, son residuos de antiguos paramos. El valle es amplio y llano, y su composición procede del desmantelamiento de las parameras ahora cuestas, por ello el recubrimiento del valle se corresponde con depósitos aluviales: arenas, arcillas, y gravas. Son depósitos generados a lo largo del Cuaternario. La potencia de este recubrimiento es grande, superior a los 25 metros en algunos sectores.

4.5.4. Consideraciones edafológicas.

El suelo tiene una coloración rojiza, es la que da el nombre característico a esta zona, "La facies Tierra de Campos", esta coloración se debe a la abundancia de arcillas rojas, es decir son arcillas con abundante hierro y, debido de la oxidación de este hierro, el suelo presenta su aspecto rojizo. En cuanto a los tipos de suelo, hay 3 según la clasificación de la USDA 1985:

- Anfisoles, formado por depósitos arcillosos, arenosos y limosos. En su perfil se pueden distinguir los horizontes A/B/C., está bastante estructurado y tiene vocación agraria.
- Inceptisoles, este es un suelo de transición entre los anfisoles y los entisoles, su perfil tiene horizontes A, B y C, este último es muy escaso. Este terreno presenta alta capacidad agraria en regadío.
- Entisoles, es un suelo sin desarrollar, no tiene horizontes, solamente se pueden distinguir los horizontes A y C., presenta malas capacidades agrarias, aunque sí se puede explotar en este sentido.

5. Diseño y explicación del Método empleado.

Este punto redunda todo lo expresado anteriormente, pero su objetivo es sintetizar todo el planteamiento para facilitar la comprensión del lector:

- **el objetivo fundamental** de este proyecto es analizar las diferencias en las simulaciones numéricas en episodios de inundación, en función de dos condicionantes fundamentales: el modelo de los datos y la calidad de la información geográfica y cartográfica.
- **Los modelos de datos** que se van a utilizar son dos: análisis unidimensional mediante el Hec-Ras y análisis bidimensional mediante el Guad-Creator.
- **Los datos cartográficos** que se van a utilizar son de dos tipos: modelo digital del terreno procedente de un vuelo LIDAR de densidad 1x1 y modelo digital del terreno obtenido por técnicas de fotogrametría de 1x1, el cual procede de una interpolación de la cartografía existente con el PNOA_MDT de 5x5.
- **Las consideraciones geográficas** no son ningún condicionamiento relevante, ya que no es un valle angosto que pudiera inducir velocidad, ni tiene profundos calados; además, se muestra laxo frente a procesos de fricción y el caudal del río y las precipitaciones son muy poco significativos.

El vuelo LIDAR recorre 43 Km. del cauce y lecho mayor del Río Sequillo. Si tenemos en cuenta todo el tramo antes mencionado, para realizar el análisis, el volumen de los datos es grande, por lo que se optó por utilizar una parte más pequeña para hacer los cálculos comparativos. En consecuencia, se realizaron los cálculos desde el punto donde se situará la balsa hasta que la llanura llega al tercer núcleo urbano, lo que supondrá un recorrido de 12 Km. Así mismo y vistas las consecuencias que se derivan de hacer simulaciones en torno a los primeros 70 Km., se ha podido constatar que esos primeros 12 km. se corresponden con el sector más vulnerable.

En cuanto a los datos, se van a utilizar 2 colecciones:

- La primera, que tiene mayor calidad y densidad LIDAR_2x2 y mdt_PNOA+cartografía_de_2x2, e incorpora toda la información altimétrica del terreno y las construcciones. A partir de ahora llamados (LIDAR_2x2 y MDT_2x2).
- La segunda, la de menor calidad y densidad LIDAR_5x5 Y mdt_XPNOA_de_5x5, que sólo incorpora información altimétrica del terreno y no tiene construcciones. A partir de ahora llamados (LIDAR_5x5 y MDT_5x).

La razón de no incorporar las construcciones, en el de paso de malla 5x5, estriba en que considerando que ese es el producto existente que podemos obtener de todo el territorio nacional, se hace imprescindible hacer el cálculo con un producto que sea lo más parecido a los productos existentes. De lo contrario, y considerando lo planteado en el apartado de los datos, aún no existe una cartografía de alta precisión, calidad, gran escala, y a ser posible del mismo datum de todo el territorio nacional. Por lo que generar MDTs detallados de origen fotogramétrico de cualquier sector del territorio nacional aún no es posible.

las cálculos que se van a realizar los son:

Procesado	Datos	Nombre	Matricula
Hec-Ras	LIDAR de 2x2	Hec-Ras_LIDAR_2x2	H_LIDAR_2x2
Hec-Ras	LIDAR de 5x5	Hec-Ras_LIDAR_5x5	H_LIDAR_5x5
Hec-Ras	Mdt de 2x2	Hec-Ras_MDT_2x2	H_MDT_2x2
Hec-Ras	Mdt de 5x5	Hec-Ras_MDT_5x5	H_MDT_5x5
Guad-2D	LIDAR de 2x2	Guad-2D_LIDAR_2x2	G_LIDAR_2x2
Guad-2D	LIDAR de 5x5	Guad-2D_LIDAR_5x5	G_LIDAR_5x5
Guad-2D	Mdt de 2x2	Guad-2D_MDT_2x2	G_MDT_2x2
Guad-2D	Mdt de 5x5	Guad-2D_MDT_5x5	G_MDT_5x5

Tabla 12. Relación de procesados realizado

Se realizaron cálculos de paso de malla 1x1, con Hec-Ras Y Dambreak, que también serán comentados en las conclusiones finales.

6. Comparativas y Resultados

6.1. Comparativas geométricas entre los tipos de datos.

La precisión altimétrica original del MDT, demostrada tras el control de calidad es de 46 cm, expresada en Error Medio Cuadrático., la de la cartografía 5.000 es de 60 cm. y la de la cartografía 1.000 no la tenemos en cuenta, ya que la gran precisión que tiene y el poco área que cubre, nos llevaría a considerar valores de precisión mejores que los que tiene el MDT origen. Por lo tanto, si promediamos ambos valores podemos establecer que la precisión esperada es:

- La precisión del MDT_2x2 es de 50 cm.
- La precisión del MDT_5x5 es de 46 cm.
- La precisión del LIDAR 2x2 y 5x5 es de 10 cm.

Por consiguiente, en el peor de los casos, las diferencias esperadas serían LIDAR respecto MDT_2x2 sería de 60 cm., y LIDAR respecto MDT 5x5 sería de 56 cm.

El procedimiento para calcular las diferencias entre los distintos tipos de datos, ha sido mediante una operación aritmética ráster entre los distintitos conjuntos de datos, por consiguiente los resultados obtenidos en promedio y el E.M.C. en cuanto a la diferencia entre los datos, son los siguientes.

	LIDAR - MDT 5x5	LIDAR - MDT 2x2	LIDAR - MDT 1x1
Número de valores. (Puntos)	2,440,000	15,250,000	61,000,000
Promedio. (m.)	-0.37	-0.38	-0.38
Desviación estándar. (m.)	0.46	0.42	0.42
E.M.C. (m.)	0.59	0.57	0.57

Tabla 13. Estadísticas de comparación geométrica entre el LIDAR y el MDT.

Tal como se puede comprobar, los datos obtenidos no difieren mucho de los que previamente esperábamos, confirma que la variación en media cuadrática entre ambos conjuntos de datos está en torno a los 60cm.

Curiosamente, el promedio es negativo lo que indica que el valor del MDT es superior al del LIDAR; en otras palabras, el MDT se ubica altimétricamente por encima, en torno a los 37 cm.; este valor podría ser una coincidencia o una cifra caprichosa, pero también se puede explicar por alguna de las siguientes consideraciones:

1. La precisión estéreo visual, en z , es de 1,5 veces el valor del g.s.d., en nuestro caso sería de 37 cm.
2. El post-procesado GPS podría introducir un sesgo en una de las colecciones. Es decir, si hubiera algún Offset o desalineamientos entre los distintos sensores que van embarcados en el avión, se puede traducir en una variación de la z .
3. Las diferencias entre las fechas de vuelo de cada una de las colecciones; este aspecto considero que es vital, por lo tanto, será desarrollado más adelante.

En relación a la desviación estándar, se puede apuntar que ronda en torno a los 45 cm., es bastante alta, lo que indica una elevada dispersión en los datos, la cual se puede deber a dos hechos:

1. En las construcciones y edificaciones los puntos del LIDAR tienen una alta precisión en altimetría, mientras que los del MDT son aproximados. Por lo tanto, ello podría inducir una elevada desviación. Este planteamiento sería correcto si los resultados de la desviación con datos de 5x5 fueran mejores que en las de 2x2, pero eso no ocurre así, sino todo lo contrario. En consecuencia hay que buscar otra razón para explicar la desviación.
2. La fecha del vuelo, pero en realidad es el momento agronómico lo que es significativo. En virtud de la fecha de vuelo se podría determinar el estado de los cultivos cerealistas y, en consecuencia, este hecho podría explicar las diferencias.

- El vuelo PNOA, que corresponde a este sector, se realizó entre los días 16 y 28 de Junio del año 2008. En la segunda quincena de Junio, en la comarca de Tierra de Campos, no se han iniciado aún las labores de siega, ya que los cultivos cerealistas están en proceso de secado. Además, si consideramos que la cosecha del año 2008, se obtuvieron producciones entre 6.000 y 8.000 kg./ha., fue una de las mejores del siglo, lo que indica una vegetación muy bien desarrollada y muy densa, podemos determinar sin lugar a duda que el mdt de fotogrametría se encuentra entre 40 cm. y 70 cm., elevado en los sectores de cultivo cerealista, ya que la gran limitación de la fotogrametría es la obtención de MDT de terreno bajo la vegetación.

Se adjunta una imagen digital que corrobora lo comentado en cuando al estado del cereal, se corresponde con una imagen digital de vuelo PNOA_CyL_NW_2008_25cm en torno al casco urbano de Medina de Rioseco.



Grafico 23. Imagen digital PNOA_CyL_NW_25cm área de Medina de Rioseco

- El vuelo LIDAR se realizó el día 18 de mayo de 2009, el estado de la vegetación cerealista en este mes podría ser de un amplio desarrollo. Pero si consideramos que la escasez de lluvias en la primavera de este año fue muy relevante y, además, que en los sectores arcillosos, como tierra de campos, si no hay lluvias

en primavera se obtienen cosechas muy deficientes; cabe señalar que por esa falta de lluvias en la primera parte de la primavera la vegetación cerealista presentaba escasa altura y densidad. Por lo tanto, teniendo en cuenta lo mencionado, junto con que el LIDAR puede obtener datos de terreno cuando la vegetación no es especialmente densa, podemos concluir lo siguiente:

- la diferencia de las medias se debe a las diferencias de altura entre los sectores cultivados de cereal, las cuales oscilarán en torno a los 60 cm., sin embargo las diferencias en los sectores urbanos, barbechos, valdíos, etc, son más pequeñas.

Los métodos para analizar las diferencias son muy variados, van desde los planteamientos estadísticos, que son los realizados hasta ahora, hasta la representación en escala de grises de las diferencias.

En nuestro caso se ha procedido del siguiente modo: se han realizado 2 operaciones aritméticas ráster, que consisten en restar dos imágenes del MDT; es decir, se ha restado el valor de "z" entre los archivos raster LIDAR_2X2 menos MDT_2x2 y entre el LIDAR_5X5 menos MDT_5x5, de tal forma que lo que se obtiene es otro archivo raster, que contabiliza la diferencia entre los archivos previos en cada una de las celdas.

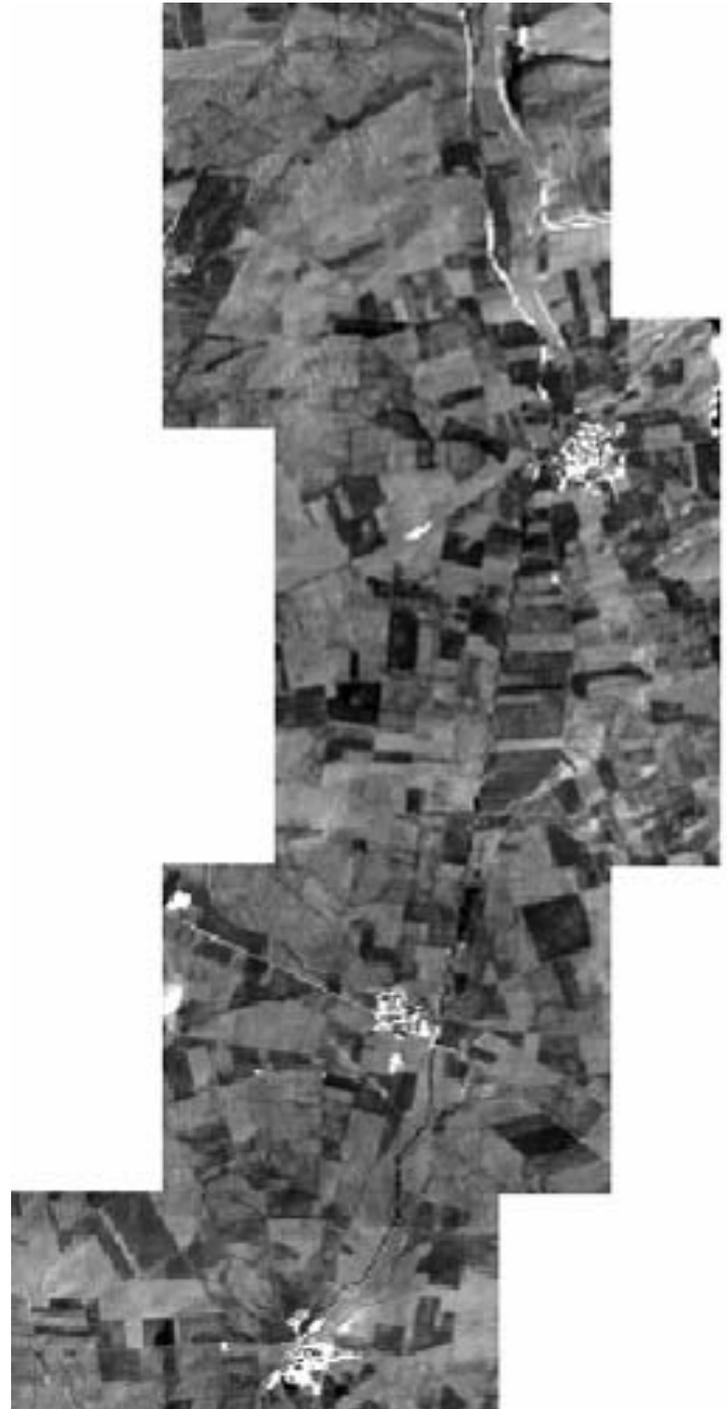


Gráfico 24. Resta del LIDAR respecto del MDT, en escala de grises I.

La imagen adjunta muestra en escala de grises las diferencias antes comentadas; es decir, a los valores más pequeños se les asigna el negro absoluto, mientras que a los más altos, el blanco absoluto, situándose los valores intermedios en la gradación de la escala de grises según corresponda en virtud de los límites establecidos. Se obtienen las siguientes imágenes.



Gráfico 25. Resta del LIDAR respecto del MDT, en escala de grises II.

La imagen de la página anterior es una vista general, y la que aparece a continuación es una vista de detalle, en torno al casco urbano de Herrín de Campos, a una escala de 1:14.000. La gradación de grises está en metros y es la siguiente.

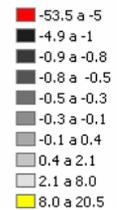


Gráfico 26. Ortofoto.

Si analizamos un sector más pequeño a menor escala, podemos observar lo siguiente:

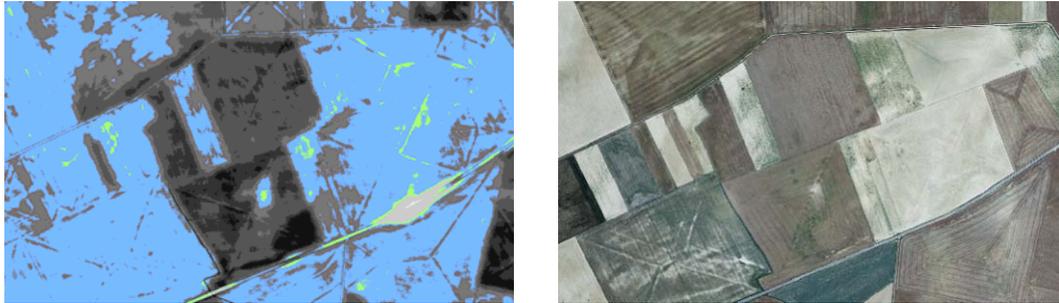


Gráfico 27. Resto del LIDAR respecto del MDT, en color RGB (I) y ortofoto.

■	-53.5 a -5.0
■	-4.9 a -1
■	-0.9 a -0.8
■	-0.8 a -0.5
■	-0.5 a -0.3
■	-0.3 a 0
■	0 a 0.3
■	0.3 a 2.1
■	2.1 a -8
■	8.0 a 20.5

Analizando la escala de grises se puede comentar lo siguiente: los colores grises oscuros se corresponden con los sectores en los que el MDT-PNOA se sitúa por encima del LIDAR, en los áreas azuladas el MDT-PNOA está ligeramente por encima, sin embargo en los sectores verdes se sitúa ligeramente por debajo. Así pues, los grises oscuros se corresponden con los áreas marrones de la orto, es decir, con los sectores de cereal en proceso de secado, motivo que anteriormente se

ha comentado para explicar porque razón se sitúa más elevado el MDT-PNOA. Sin embargo los colores verdes y azules, son sectores sin vegetación o con vegetación muy aislada del tipo del girasol naciente, en consecuencia, la discrepancia entre ambos es muy pequeña debido a que el suelo es un elemento representado en la imagen y en consecuencia la correlación se hace a nivel de suelo.

Los sectores de coloración roja se corresponden con puntos aislados, que representan errores groseros. Los sectores de amarillo, se corresponden con las áreas donde el LIDAR tiene mayor altitud, suelen ser fundamentalmente las construcciones y edificaciones.

Concluyendo, las diferencias entre ambos tipos de archivos son muy pequeñas en la mayoría de las superficies, obsérvese una vista general mediante la imagen adjunta con la misma graduación de colores de la anterior.



Gráfico 28. Resto del LIDAR respecto del MDT, en color RGB (II).

Los sectores que presentan diferencias, se corresponden con los áreas donde la fotogrametría presenta sus grandes limitaciones para obtener datos precisos del terreno, aunque si la toma de las imágenes se hace en un periodo del año en el que no haya vegetación densa, o bien, si estuviésemos considerando un año agronómicamente normal, y no tan especial como el 2008, las diferencias, entre ambos tipos de datos, serían aún menores y la desviación estándar no sería tan elevada.

Un dato bastante curioso es que la imagen de la resta en escala de grises, es similar o muy parecida a una imagen pancromática del mismo sector, de hecho se puede fotointerpretar correctamente; esto indica que la variabilidad de los datos depende fundamentalmente del tipo de superficie. Si consideramos que el LIDAR no es muy vulnerable, geoméricamente, al tipo de superficie, podemos concluir que la fotogrametría sí que lo es; y de hecho, ese es el motivo por el se requiere de una edición.

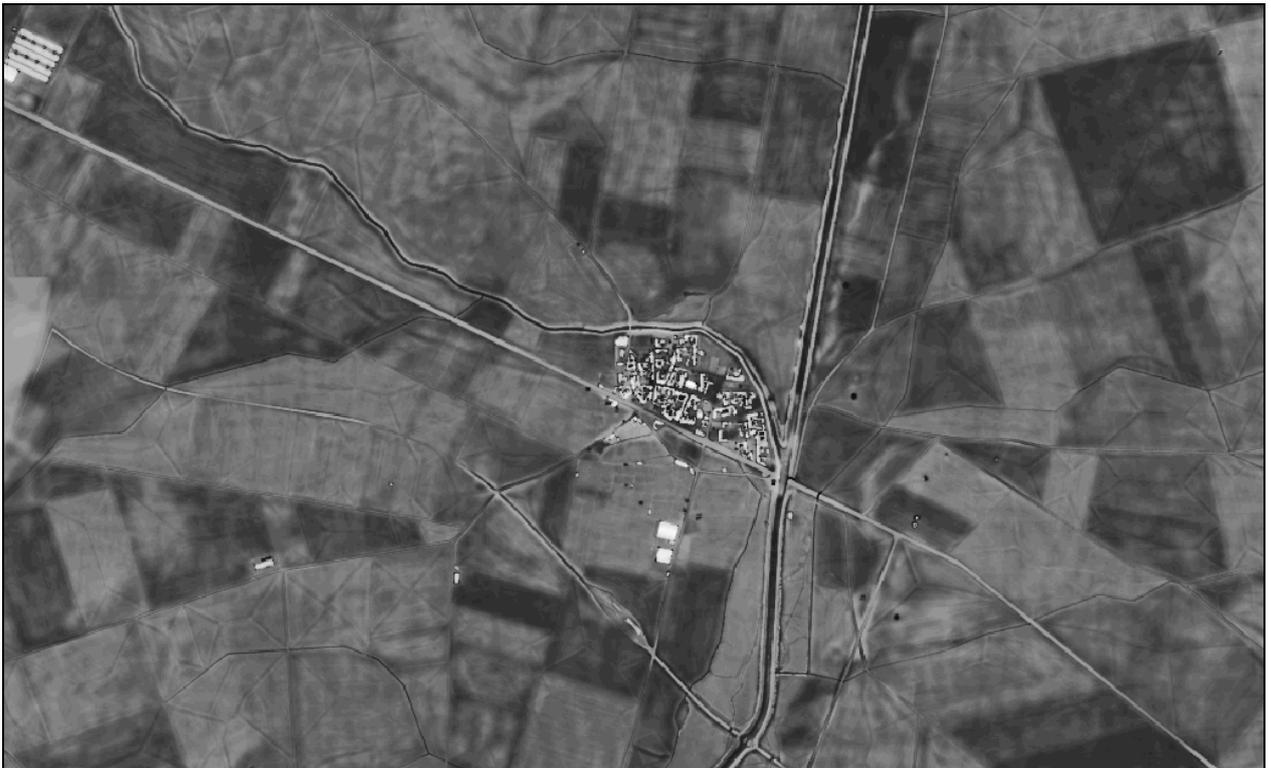


Gráfico 29. Resta del LIDAR respecto del MDT, en escala de grises (III)

6.2. Comparación de la lámina de agua.

Con las diferentes simulaciones realizadas se han podido extraer varios resultados, uno de ellos es el área de las llanuras de inundación o sectores anegados. Por consiguiente, una forma de conocer las diferencias entre los distintos resultados obtenidos, es comparando las diferencias de esa lámina de agua.

6.2.1. Diferencias de área de la lámina de agua.

Superficie total de la Lámina de agua.		
Software	Datos	Área (ha.)
Hec_Ras	LIDAR 2x2	1106.17
Hec_Ras	LIDAR 5x5	1105.28
Hec_Ras	Mdt 2x2	1118.50
Hec_Ras	Mdt 5x5	1157.15
Guad_Creator	LIDAR 2x2	992.29
Guad_Creator	LIDAR 5x5	961.36
Guad_Creator	Mdt 2x2	957.93
Guad_Creator	Mdt 5x5	963.51

Tabla 14. Areas de la Lámina de inundación

Hallando las diferencias entre los valores obtenemos el siguiente cuadro:

Software	Datos	Diferencia de Área (ha.)	Porcentajes
Hec_Ras	LIDAR 2x2 - 5x5	0.89	0.09
Hec_Ras	Mdt 2x2 - 5x5	-38.65	3.70
Guad_Creator	LIDAR 2x2 - 5x5	30.92	2.96
Guad_Creator	Mdt 2x2 - 5x5	-5.59	0.53
Guad_Creator - Hec_Ras	LIDAR 2x2	113.88	10.89
Guad_Creator - Hec_Ras	LIDAR 5x5	143.92	13.77
Guad_Creator - Hec_Ras	Mdt 2x2	160.57	15.36
Guad_Creator - Hec_Ras	Mdt 5x5	193.64	18.53

Tabla 15. Diferencias entre los el calculo de areas de la Lámina de inundación

Los porcentajes se han calculado suponiendo que el valor de la lámina real es el promedio de todos los valores obtenidos 1.045,27 ha., por lo tanto, analizando las diferencias entre las áreas, podemos considerar lo siguiente:

Con el mismo modelo numérico, es decir, el mismo software, cambiando los datos, los resultados varían, lo cual es lógico. Pero esa variación no es igual en ambos casos, lo cual, a priori, también es lógico; pero lo que no tiene tanta lógica es que los resultados varíen de forma inversa. Es decir, la diferencia entre los datos de 2x2, menos los de 5x5 en LIDAR, va de 0 a 30 ha., con Hec_Ras y GUAD respectivamente. Mientras que con datos MDT va de 38 a 1 ha. en la misma distribución de programas. Por lo tanto, cuando cambian los datos, los resultados varían, lo cual es obvio; pero la novedad es que lo hacen en sentido contrario, en función de los modelos de cálculo utilizados. Por lo tanto, el modelo hidráulico que se utilice es determinante ya que sus resultados serán distintos según el modelo usado.

Si consideramos el mismo tipo de datos, pero variamos los modelos numéricos, los resultados que se obtienen tras hallar las diferencias, varían en el mismo sentido en ambos casos. Es decir, las mayores diferencias en valor absoluto se obtienen con los datos del MDT cuando se usan los de mayor tamaño de malla.

Si comparamos datos de la más alta calidad en el MDT de fotogrametría, con datos de la peor calidad en LIDAR. Tenemos que la diferencia entre el MDT_2x2 respecto al LIDAR_5x5 es muy pequeña, sólo de 17 ha., lo que supone una diferencia relativa de 1.6% respecto del total.

Las mayores diferencias se corresponden con datos extremos en relación a su calidad métrica; es decir, el MDT_5x5 respecto del MDT_2x2, la cual equivale a 79.76 ha., lo que supone un 7.63% del total.

Con los datos obtenidos hasta ahora, se podría concluir este proyecto, ya que son suficientemente significativos. Pero también podemos considerar que el valor del área es un dato generalista y, en consecuencia, éste no contempla el agua en cada tramo. Así pues, ahora procederé a analizar la lámina por tramos.

6.2.2. Diferencia de longitud en el perfil transversal de la lámina.

El Hec_Ras como modelo de análisis unidimensional requiere de unos perfiles para realizar los cálculos numéricos de simulación. En consecuencia, estos perfiles son los que vamos a utilizar para hacer las mediciones de anchura de la lámina de agua en ambos modelos.

Se utilizaron 31 perfiles para realizar los cálculos mediante Hec_Ras, pero teniendo en cuenta que ambos modelos de análisis presentan alguna diferencia en el inicio de la simulación, se va a prescindir de los primeros y de los últimos perfiles. En consecuencia, los perfiles a contrastar serán desde el perfil 7 hasta el 29.

La distribución de los perfiles es la que se puede observar en el croquis adjunto; así mismo, también se puede observar el eje del Río Sequillo y las llanuras de inundación, las cuales se corresponden con los sectores que conforman el lecho mayor del río. El croquis representa toda el área de estudio, los 12,9 Km.

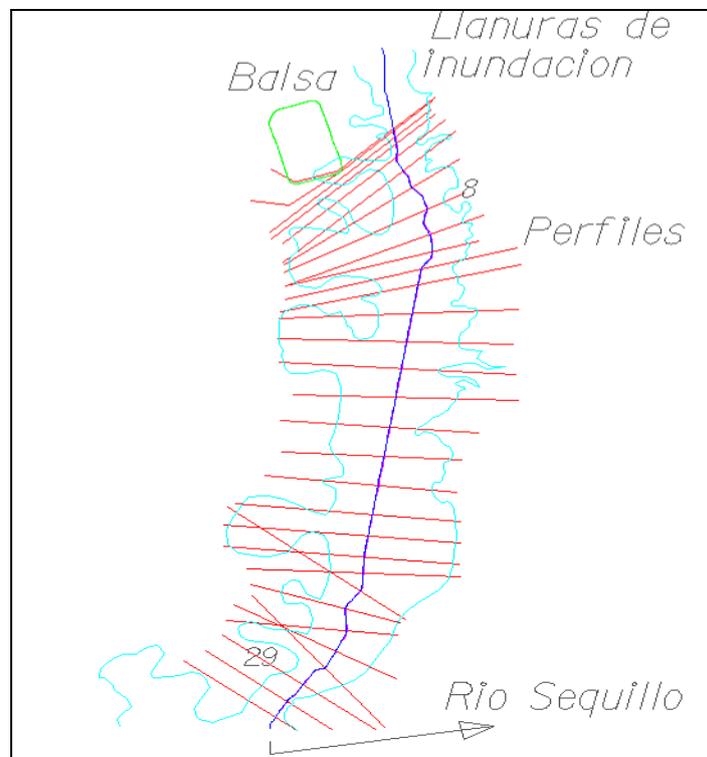


Gráfico 30. Croquis de la distribución de los perfiles.

Relación de diferencias de la longitud de la lámina de agua en los perfiles (m.).				
Perfiles	HecRas		Guad	
	LIDAR 5x5 - 2x2	MDT 5x5 - 2x2	LIDAR 5x5 - 2x2	MDT 5x5 - 2x2
7	-35.98	-6.50	-30.59	-11.21
8	0.00	-18.48	-90.30	60.25
9	-19.94	-43.88	-4.09	10.33
10	0.00	8.84	-65.80	49.40
11	-17.45	65.20	-6.91	3.26
12	0.00	20.50	-3.76	19.79
13	0.00	40.04	-5.31	-34.66
14	-20.03	40.07	-27.49	-19.31
15	0.00	0.00	30.59	-14.93
16	20.05	20.05	18.91	-1.22
17	0.00	60.07	-130.48	11.76
18	-20.10	60.29	-109.66	-126.66
19	-60.23	13.01	-248.97	-12.96
20	66.96	198.78	-36.12	39.39
21	0.00	0.00	-42.90	68.72
22	40.03	0.00	-400.68	108.94
23	-4.61	135.33	57.88	-9.75
24	-25.03	104.19	7.58	126.49
25	-29.99	230.98	164.56	12.29
26	0.00	0.00	89.73	-9.54
27	0.00	50.83	15.68	1.22
28	-24.51	-44.95	44.60	47.40
29	-10.36	54.72	26.25	4.27
Promedio	-6.14	43.00	-32.49	14.05
Desv. estándar	25.50	69.14	114.31	50.93

Tabla 16. Diferencias de logitud en los perfiles de la lámina de inundación (l).

En relación al modelo de análisis, habría que apuntar lo mismo que se comentaba en el caso de las áreas, la variación de los resultados va en sentido contrario respecto al modelo de análisis cuando se usan el mismo tipo de datos. Aunque, aparecen algunas anomalías puntuales que necesitan ser comentadas, concretamente el perfil 22 del Modelo Guad_2D presenta una diferencia de 400 m., ello se debe a que corresponde a un sector de cambio de pendiente muy acusado, además la lámina aumenta en sentido longitudinal respecto al perfil; por ello en el modelo de datos de 2x2, la lámina abarca un área determinada, mientras que en el modelo de datos 5x5, al ser datos más generalizados, la pendiente en este sector se acentúa aún más, y en consecuencia la lámina se queda un poco más corta. Dicho de otra forma si este perfil se analizase 3 metros antes o después respecto del lugar donde ahora esta, las variaciones de la lámina entre ambos modelos sería como en el resto de los casos.

Relación de diferencias entre Modelos de cálculo (m.).				
Perfiles	HecRas – Quad			
	LIDAR 2x2	LIDAR 5x5	Mdt 2x2	Mdt 5x5
8	570.73	661.02	770.88	692.15
9	652.47	636.62	722.00	667.79
10	510.22	576.02	576.79	536.24
11	21.01	10.47	-34.51	27.42
12	108.76	112.52	126.38	127.10
13	-391.05	-385.74	-374.24	-299.55
14	127.20	134.66	108.38	167.76
15	467.64	437.05	431.99	446.93
16	237.58	238.72	276.71	297.98
17	-853.00	-722.53	-654.43	-606.12
18	-326.82	-237.26	7.19	194.14
19	-961.54	-772.81	-1017.29	-991.32
22	-822.98	-382.27	-431.84	-540.78
23	210.57	148.08	208.33	353.41
24	395.85	363.24	344.15	321.85
25	-228.81	-423.35	-215.51	3.18
26	604.54	514.81	548.39	557.94
27	637.03	621.34	637.85	687.45
28	188.27	119.17	181.74	89.39
29	373.30	336.69	279.72	330.17
Promedio	117.61	132.83	171.77	194.42

Tabla 16. Diferencias de logitud en los perfiles de la lámina de inundación (II).

Observando los promedios de las diferencias, cuando se utilizan distintos datos pero el mismo software las diferencias son muy pequeñas, oscilan entre 15 y 23 metros. Sin embargo entre los distintos modelos de análisis, las diferencias oscilan entre 54 y 62 metros.

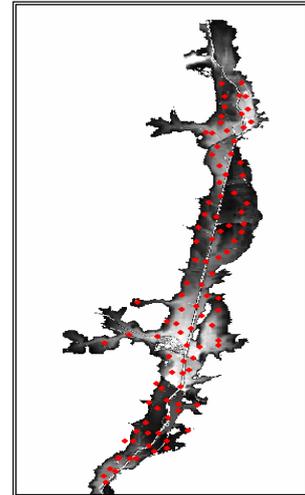
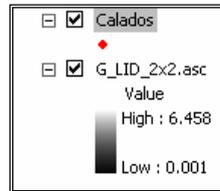
Lo comentado en el párrafo anterior es el mismo que se mencionó en el apartado de las áreas, en consecuencia podríamos apuntar lo mismo en torno a la conclusión del proyecto.

No obstante, en una inundación el calado es una característica de gran importancia, ya que en función de cómo éste se prevea, así habrá que plantear el plan de emergencia. Pues la velocidad y el calado están relacionados. M.M.A. (7)

6.3. Análisis de los calados.

Croquis 5. Distribución de los puntos donde se analiza en calado.

Para analizar los calados se han elegido 100 puntos al azar, de los cuales, para los 31 primeros se ha tomado como referencia el centro del eje del río a la altura de cada uno de los perfiles, y el resto han sido elegidos aleatoria y uniformemente por toda la superficie de la lámina. En el gráfico adjunto se puede observar la lámina de agua coloreada en función del calado, y los puntos rojos representan los sectores donde se ha medido el calado.



	HecRas (m.)			
	LIDAR-MDT (5x5)	LIDAR-MDT 2x2	MDT_5x5-2x2	LIDAR_5x5-2x2
RMS	0.55	0.57	0.87	0.53
Promedio	-0.10	0.15	0.39	0.13
Desviación Estándar	0.55	0.55	0.79	0.51
	Guad_2D (m.)			
RMS	0.57	0.68	0.37	0.36
Promedio	0.12	0.22	0.08	-0.02
Desviación Estándar	0.56	0.65	0.36	0.36

Tabla 18. Relación de las diferencias de calado (l).

El E.C.M. o R.M.S. está considerado como valor estadístico, no como un error, con ello se pretenden analizar las diferencias de calado, dando un mayor valor a las grandes diferencias sobre las pequeñas. Ya que cuanto mayor es el calado, mayores son las consecuencias, pues también es mayor la velocidad durante una inundación.

Con Hec_Ras, la media cuadrática de las diferencias entre LIDAR respecto del MDT y entre el LIDAR entre si, respecto de sus diferentes densidades oscila en torno a los 60 cm. Mientras que con el MDT respecto de sus diferentes densidades, es 90 cm. Los promedios y la desviación estándar se comportan de igual forma.

Con Guad_Ceator se obtienen unos resultados un poco distintos a los anteriores y también distintos respecto de los de anteriores epígrafes. La media cuadrática de las diferencias cuando se compara LIDAR respecto del MDT oscila en torno a los 60 cm. mientras que cuando se comparan MDT ó LIDAR entre si, pero de diferente densidad las diferencias se sitúan en torno a los 35 cm. Lo que indica que las diferencias dependen de la tipología de los datos. Pero si hacemos esa misma comparación con los diferentes softwares, da unos 0.56 cm para Hec_RAS y en torno a los 60 cm para Guad_2D, lo que son diferencias insignificantes.

Por consiguiente, aquí hay dos consideraciones que se deben tener en cuenta:

1. la calidad de los datos del MDT es determinante para el cálculo del calado.
2. Las diferencias de calado más insignificantes aparecen cuando se comparan datos de diferente densidad que han sido calculados con HEC_RAS. No ocurre lo mismo es esa comparación con datos de GUAD_2D.

Todo ello, nos lleva a considerar que la tónica de funcionamiento se está repitiendo, igual que ocurría en las estadísticas de los epígrafes anteriores. Si profundizamos en las diferencias entre los distintos programas, tenemos lo siguiente:

	HecRas - Guad_2D (m.)			
	MDT (5x5)	MDT 2x2	LIDAR_5x5	LIDAR_2x2
RMS	0.98	1.01	0.86	1.23
Promedio	0.69	0.38	0.46	0.31
Desviación Estándar	0.70	0.94	0.73	1.20

Tabla 19. Relación de las diferencias de calado (II).

Las mayores variaciones de la media se observan con los datos de baja densidad. Pero la media cuadrática oscila en torno a 1 metro, llegando hasta 1.20 metros con datos LIDAR de alta densidad. Este último, es un valor muy alto para ser calados. Es decir, con los mismos datos, un software respecto del otro arroja diferencias de 1.20 metros.

La media oscila en torno a los 37 cm., cifra que recuerda el valor de la diferencia entre el LIDAR y el MDT respecto a la comparación geométrica entre ambos. En la desviación estándar, la menor variabilidad corresponde al MDT de baja densidad, aunque la variabilidad es muy alta en todos los casos.

De todas las estadísticas vistas hasta ahora, estos dos últimos resultados son determinantes:

1. la media cuadrática de las diferencias de calado es de 1.20 m., valor que es muy alto, considerando que en la simulación el calado máximo es de 6 metros.
2. La desviación estándar de las diferencias de resultados entre los 2 modelos de cálculo es muy alta, lo que indica que la variabilidad depende en gran medida del modelo de cálculo y no del tipo de dato.

6.4. Otros análisis, no sistemáticos.

6.4.1. Análisis con datos de alta densidad

Con el software DamBreak se realizó una simulación con los datos LIDAR de densidad 1x1. Dado que el modelo de análisis que utiliza este software es el mismo del Hec_Ras, y considerando que su procesado es manual en todas sus fases, se puede plantear que este software es muy vulnerable a los posibles errores por factor humano, por todo ello se consideró innecesario realizar toda la serie de cálculos. No obstante los resultados que se obtuvieron en torno al área de la lámina son:

Superficie Total de la Lámina de agua.		
Software	Datos	Área (ha.)
Dambreak	LIDAR 1x1	1.270

Tabla 20. Relación de área con DamBreak.

Con Hec_RAS se realizaron cálculos con datos de densidad 1x1, sin embargo con Quad_2D no se pudo, pues la muestra superaba los 12 millones de puntos.

Los resultados que se obtuvieron con los datos de 1x1 con el Software Hec_Ras son:

Datos	Área (ha.)
LIDAR 1x1	1095.25
Mdt 1x1	1155.98

Tabla 21. Áreas con Hec_RAS en datos de 1x1.

La diferencia de área entre el modelo Dambreak y el modelo Hec_RAS, cuando se utiliza la misma información, es muy alta. En consecuencia, habría que profundar en el análisis de esa diferencia, ya que equivalen a 180 ha. lo que supone un 10% del total; pero si consideramos que la demarcación de la llanura de inundación se realiza manualmente a partir de los resultados que se obtienen de los perfiles, es preferible no usar este dato, para así evitar hacer conclusiones con poco rigor.

Además si consideramos lo que "Canadian Dam Association" apuntaba en torno a las diferencias entre DamBreak y Hec_RAS, dijo que utilizaban el mismo modelo numérico de cálculo, por lo sus resultados siempre eran similares, por lo tanto, podemos concluir que las diferencias que ahora se obtienen dependen exclusivamente de las operaciones manuales para dibujar la llanura de inundación, por consiguiente no son significativas.

Diferencias de área (ha.)		
Colecciones	Diferencia (ha.)	%
LIDAR 1x1 – 2x2	-10.92	1.04 %
LIDAR 1x1 – 5x5	-10.03	0.96 %
LIDAR 2x2 – 5x5	0.89	0.09 %
MDT 1x1 - 2x2	37.48	3.59 %
MDT 1x1 - 5x5	-1.17	0.11 %
MDT 2x2 – 5x5	-38.65	3.70 %
LIDAR –MDT (1x1)	-60,73	5.81 %
LIDAR –MDT (2x2)	-12,33	1.18 %
LIDAR –MDT (5x5)	-51,87	4.96 %

En relación a las diferencias de superficie de la lámina de inundación entre los distintos tipos de datos (1x1, 2x2 y 5x5 de LIDAR y de MDT), se observa que las variaciones son muy pequeñas dentro del mismo tipo de dato y un poco mayores cuando se combinan distintos tipos de datos, pero solamente varían en torno al 5,8%, es decir, nada relevante.

En relación a las diferencias de calados cuando se utilizan datos de 1x1 de densidad, obtenemos lo siguiente:

	HecRas		
	LIDAR-MDT 1x1	LIDAR 1x1 -2x2	LIDAR 1x1 -5x5
Desviación Estándar	0.54	0.17	1.13

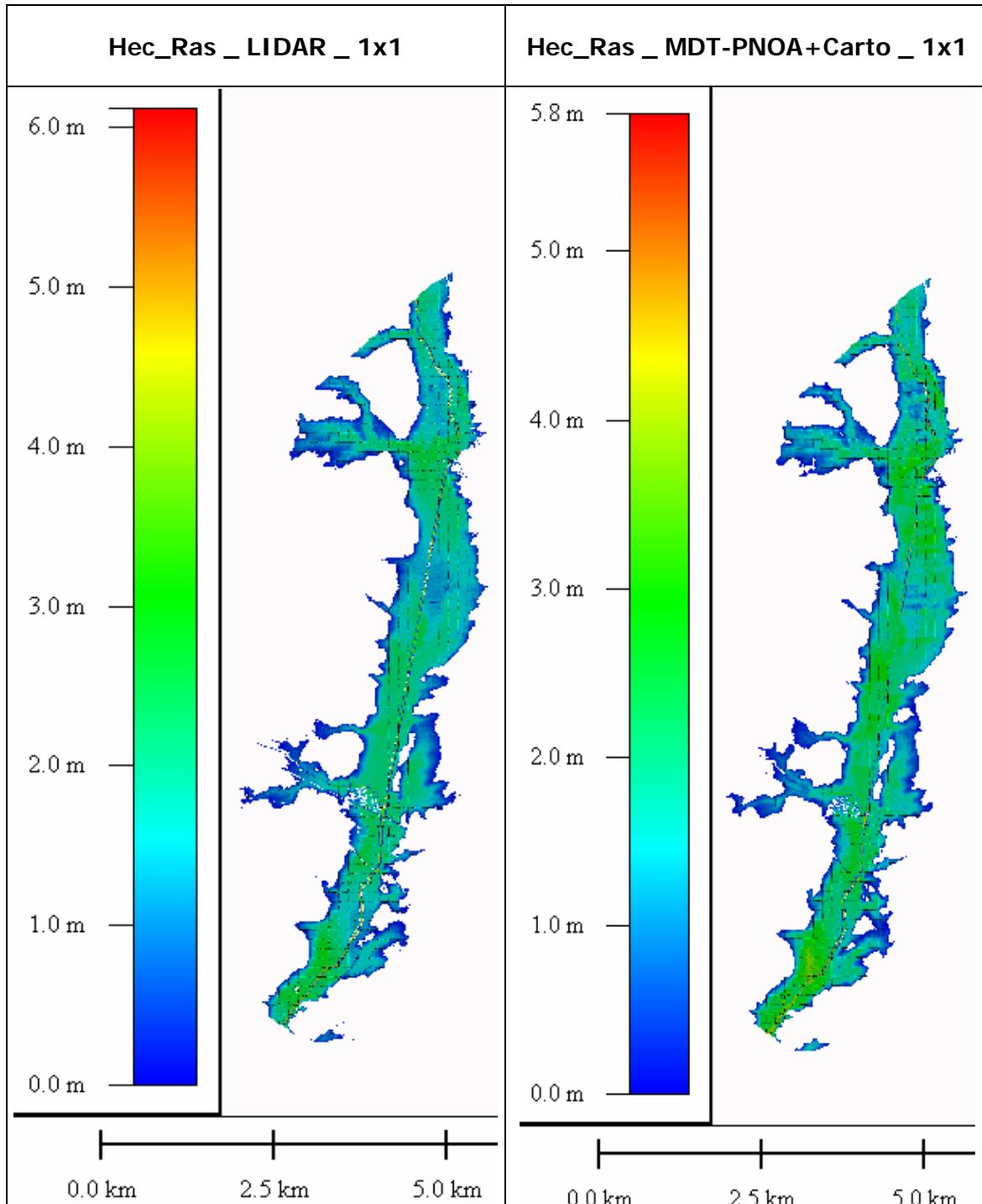
Los resultados que se obtienen son los esperados, considerando todo lo que se viene apuntando a lo largo de este proyecto, las diferencia entre datos LIDAR y MDT para la máxima densidad son muy pequeñas, del orden de 10 cm de media.

Las diferencias entre datos LIDAR de 1x1 y 2x2 son muy pequeñas y, como era de esperar, las mayores diferencias deben situarse entre datos que presentan mayores discrepancias, entre datos de densidad 1x1 y los de 5x5.

Como prólogo de las conclusiones finales voy a adjuntar gráficamente las distintas láminas de inundación calculadas.

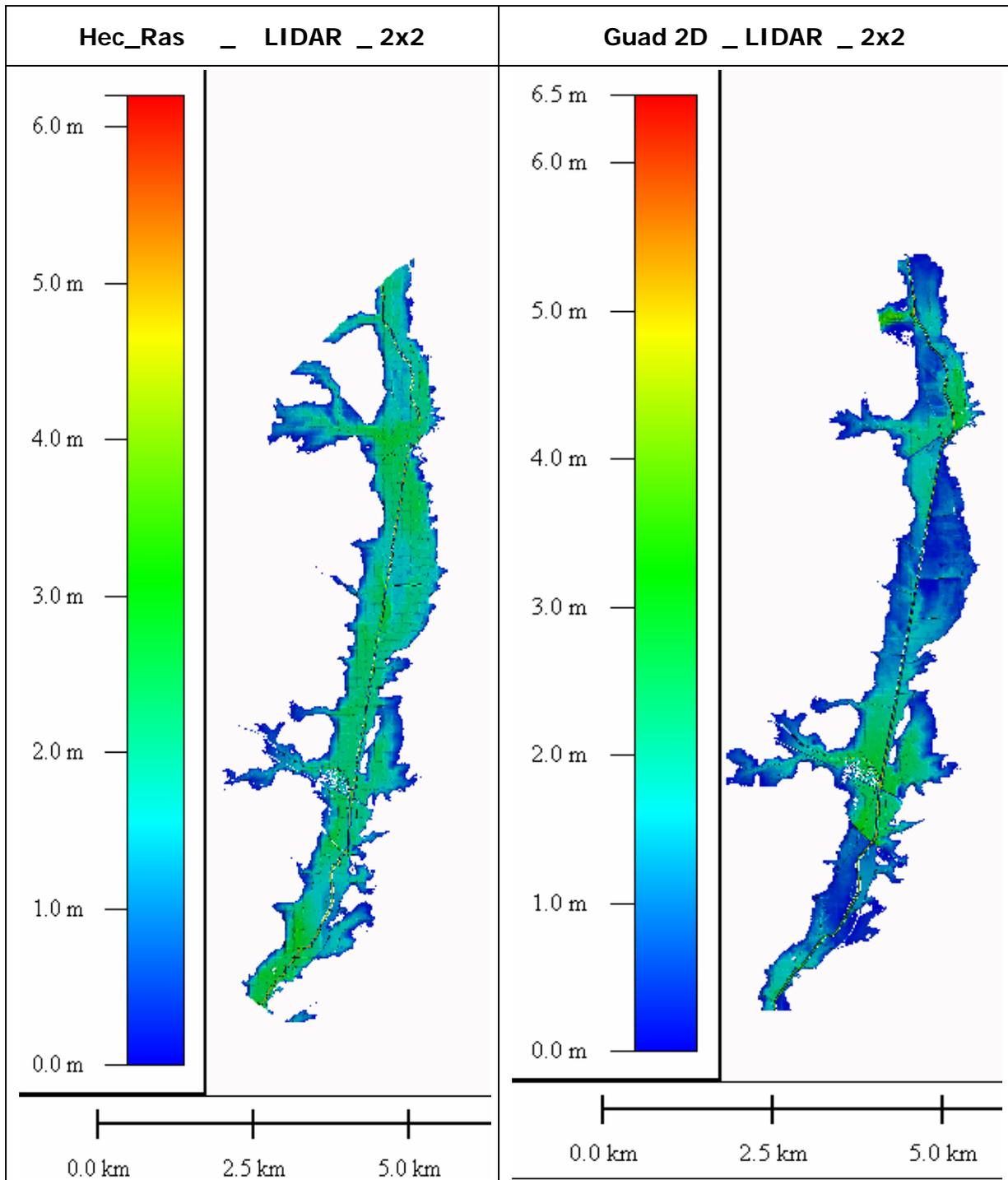
7. Las láminas de inundación.

Gráfico 31. Láminas obtenidas con Hec_Ras y datos de densidad 1x1 en LIDAR y MDT.



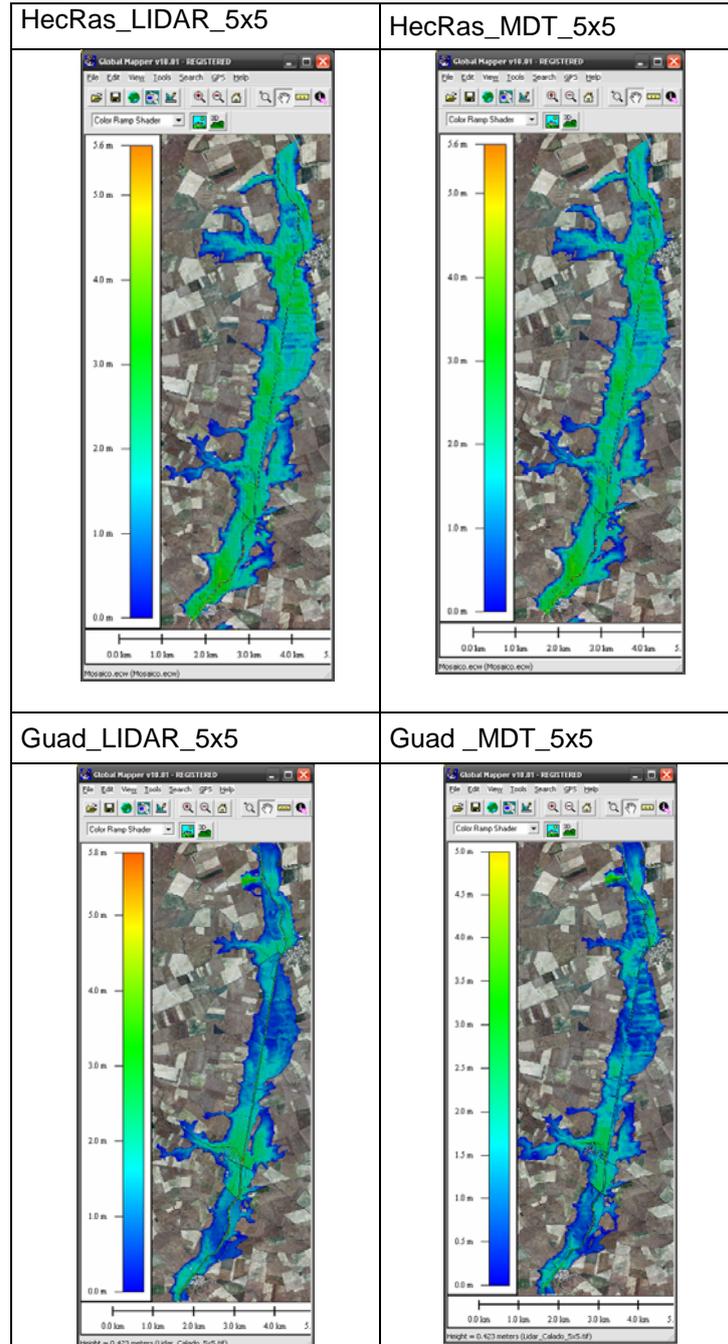
En estos dos gráficos se puede observar que la diferencia de calado máximo son 20cm., las láminas son similares y las variaciones se centran en la periferia de cada lámina por lo que se corresponden a sectores de calados en torno a los 20 cm.

Gráfico 32. Láminas obtenidas con Hec_Ras y Guad_2d con datos LIDAR de 2x2.



En estos dos gráficos son muy evidentes las variaciones de calado dentro de las propias láminas. Aquí se puede observar gráficamente lo que se comentaba en las comparativas, hay mayores diferencias por el modelo de cálculo que por el modelo de datos.

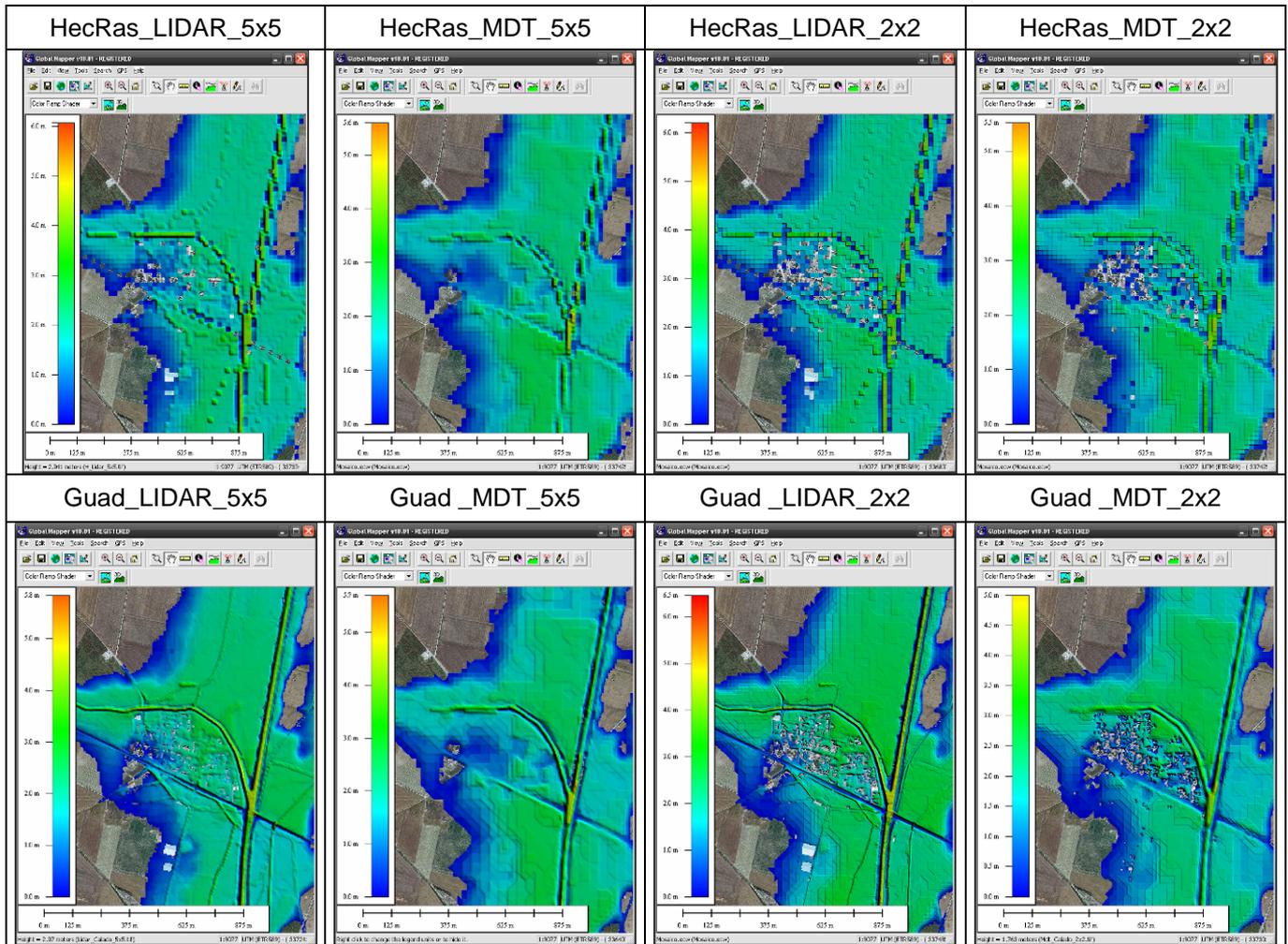
Gráfico 33. Láminas obtenidas con Hec_Ras y Guad_2d con datos 5x5.



En relación a este conjunto de gráficos donde se muestran las láminas calculadas con los dos programas y con las 2 colecciones de datos en baja densidad, se puede constatar lo mismo que en el caso anterior: las mayores diferencias son entre modelos de cálculo y no entre tipos de datos.

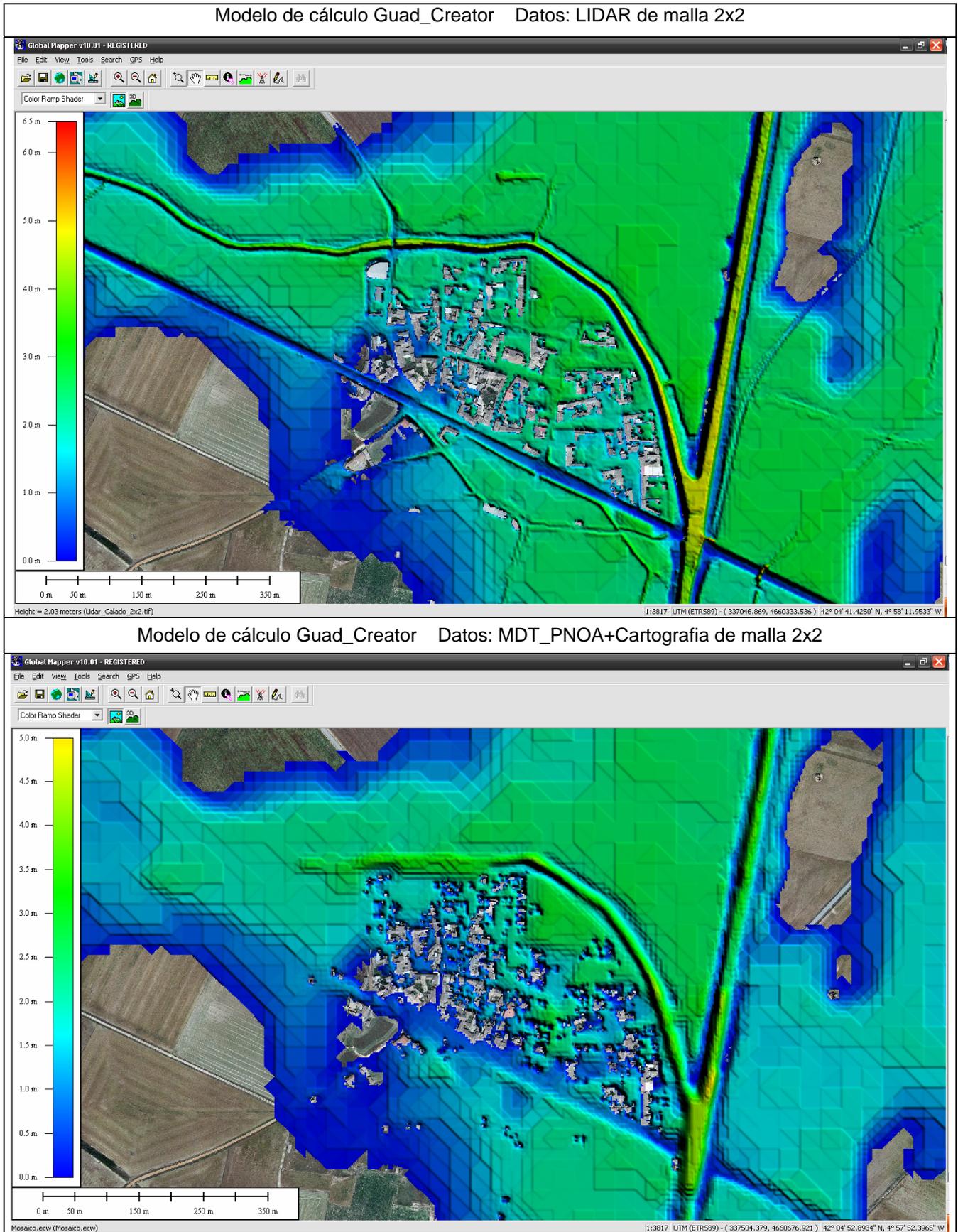
El núcleo urbano de Villabrágima en todas las simulaciones aparece dentro de la llanura de inundación, la diferencia estriba en el calado en función de tipo de datos con los que se realice la simulación.

Gráfico 34. Laminas obtenidas con Hec_Ras y Guad_2d con datos 5x5 y 2X2 en casco urbano de Villabrágima.



Cuando se utilizan datos de baja densidad, malla de 5x5, tanto en LIDAR como en el MDT, el casco urbano se muestra prácticamente inundado en su totalidad. Sin embargo, con datos de mayor precisión, donde las edificaciones no son generalizadas, se observa que se inundan las calles y no las construcciones. En cualquier caso, el LIDAR 2x2 no aporta ninguna información relevante frente al MDT_2x2, ya que hay algunos sectores del casco urbano que se inundarán hasta un calado de 4 metros. La gran diferencia entre datos MDT respecto a datos LIDAR, es que en los últimos se observa nítidamente como se inundan las calles, quedando al margen las manzanas del casco urbano, aspecto que no se observa tan nítido con los otros datos.

Gráfico 35. Laminas obtenidas con Guad_2d con datos 2X2 en casco urbano de Villabrágima.



8. Conclusiones finales.

Una vez realizados todos los cálculos y analizadas las estadísticas podemos determinar lo siguiente:

8.1. Conclusión 1

- Los resultados que se obtienen cuando se utilizan datos de partida distintos o modelos de cálculos distintos son diferentes, lo que es lógico y normal; pero el matiz más importante es que las variaciones que se obtienen cuando se utilizan distintos modelos de calculo son bastante importantes, concretamente:
 - en relación a las variaciones del área inundada, son del orden de más de 100 ha. mientras que cuando se utiliza el mismo modelo de cálculo y se cambia el tipo de datos las variaciones que se obtienen son del orden de 30 ha. en el peor de los casos.
 - En relación a los perfiles, la media cuadrática de las diferencias cuando se utilizan distintos modelos de cálculos oscilan en torno a los 400 m., mientras que cuando se utilizan distintos tipo de datos oscilan en torno a los 80 m. en el peor de los casos.
 - En relación a los calados, las diferencias en la media cuadrática cuando se utilizan distintos modelos de cálculos oscilan en torno al metro, mientras que cuando se utilizan distinto tipo de datos oscilan en torno a los 60 cm. en el peor de los casos.

Es decir, la mayor variabilidad depende en gran medida del modelo de cálculo y no del tipo de datos, cuando éstos cumplen unos mínimos de calidad.

8.2. Conclusión 2

- En relación a las diferencias entre datos de origen LIDAR o datos de origen fotogramétrico se puede apuntar lo siguiente:
 - Las diferencias de área oscilan en torno a las 50 ha.
 - La diferencias en calado, en media cuadrática, oscilan en todos los casos en torno a los 0.5 metro mientras que el promedio oscila en torno a los 10 cm.

En consecuencia se puede apuntar que las diferencias en torno al tipo de datos son muy pequeñas, por consiguiente no aporta ninguna diferencia significativa la utilización del LIDAR, frente a la utilización de un Modelo digital del terreno obtenido por fotogrametría.

8.3. Conclusión 3

- En relación a la densidad de la malla se puede apuntar lo siguiente:
 - Las variaciones de área cuando se utilizan datos de diferente densidad pero dentro del mismo modelo de cálculo oscilan en torno a las 30 ha.
 - Respecto al calado, las variaciones con el modelo Hec_RAS oscilan entre los 0.50 y 0.90 cm, mientras que con el modelo de Guad_Creator oscilan entorno a 40 cm.

En los modelos de cálculo bidimensionales la densidad de la malla no es crítica para obtener resultados con poca variabilidad, sin embargo en los modelos unidimensionales o cuasi-bidimensionales, cuanto menor es la densidad de malla en el MDT, mayor es variabilidad en los resultados obtenidos.

Este hecho me permite plantear otra conclusión.

8.4. Conclusión 4

Los modelos bidimensionales precisan de modelos de terreno de alta calidad, pero no es tan crítica la densidad de la malla como algunos autores apuntan.

8.5. Conclusión 5

- El análisis de calados en sectores urbanos es muy importante para poder determinar los impactos y catástrofes, no se trata de determinar con mayor o menor exactitud cuantas edificaciones van ser cubiertas totalmente o en parte por la inundación, pero sí consideramos el hecho de que el calado con la presencia de obstáculos es superior que sin ellos y que existe una relación entre los calados, las velocidades y los caudales, se puede concluir que:

la utilización de las construcciones y edificaciones es determinante para esclarecer las llanuras de inundación y evaluar los posibles planes de emergencia.

8.6. Conclusión 6

- Con los Modelos digitales del terreno, obtenidos por fotogrametría para el PNOA, sería conveniente revisar algunos de los planteamientos en torno a los conceptos topográficos.

La Guía Técnica para la Elaboración de los Planes de Emergencia de Presas, del Ministerio de Medio Ambiente, debería ser revisada, respecto a los temas cartográficos y topográficos.

8.7. Conclusión 7.

- Si recordamos que las diferencias geométricas entre el MDT y el LIDAR oscilan en torno a los 37 cm de promedio y 50 cm. de media cuadrática; si estas diferencias se eliminaran, realizando las consideraciones antes mencionadas en torno a las fechas de vuelo, y en torno al control de calidad, estaríamos obteniendo prácticamente los mismo resultados con ambos tipos de datos, ya que los valores de las diferencias en calados oscilaban en torno a esos mismos valores.

La utilización de los datos MDT del PNOA es perfectamente válida y cumple unos criterios de calidad.

8.8. Conclusión 8.

El Instituto Geográfico Nacional ha proyectado la realización de un LIDAR de todo el territorio nacional, junto con el vuelo fotogramétrico del PNOA. Dadas las características técnicas, por ser un vuelo combinado, la precisión geométrica en z de del MDT_LIDAR será de 30 cm.

El I.G.N. justifica la necesidad de abordar este proyecto por la obligatoriedad de elaborar estudios de inundaciones en todas las cuencas hidrográficas, y teniendo en cuenta que con un vuelo combinado se pueden reducir los costes, se podría obtener un LIDAR "gratis" de toda España. En torno al último comentario, las empresas de vuelo han planteado que la adquisición de datos no es gratuita, tiene un costo de procesado que se debe contabilizar.

No se puede justificar la ejecución de un LIDAR de estas características, para obtener un MDT de similar precisión al MDT que ya se tiene, cuando los resultados obtenidos dependen más del modelo de cálculo que del tipo de dato. Es decir, ese MDT LIDAR no va a aportar ninguna mejora sustancial.

Otro escenario muy distinto, sería obtener un LIDAR con una precisión de 5 cm. y alta densidad, con edificaciones, ya que se ha podido determinar que la calidad de MDT es determinante en el análisis de calados para modelos bidimensionales en las áreas urbanas.

9. Bibliografía.

1. Parlamento Europeo. Directiva del parlamento y del Consejo, del 23 de octubre de 2000. Establece el marco comunitario de actuación en el ámbito de la política del agua. Bruselas 2000.
2. Palancar Penella, M. La directiva Marco del Agua. Comentario Crítico. Madrid 2002.
3. Ministerio de Medio ambiente. RD 9/2008, del 11 de enero. Modificación del Reglamento de Dominio Publico Hidráulico. BOE Madrid 2008.
4. Ministerio de Medio ambiente. Orden 12/1996. Reglamento técnico sobre seguridad de Presas y Embalse. Madrid BOE 1996.
5. C.H.D. Memoria 2007 de la Confederación Hidrográfica del Duero. Valladolid 2008.
6. Ministerio de Medio Ambiente, Dirección de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Guía Técnica de Clasificación de presas en función del riesgo potencial. http://www.mma.es/secciones/acm/aguas_continent_zonas_asoc/seguridad_presas/gest_seguridad/pdf/clasificacion_presas.pdf
7. Ministerio de Medio Ambiente, Secretaria General de Aguas y Costas, Dirección de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Guía Técnica para la elaboración de los planes de Emergencia. http://www.inforiesgos.es/ficheros_comunes/documentos/GUIA_TECNICA_PEP.pdf
8. Instituto Tecnológico Agrario. Proyecto de transformación en regadío del sector IV del Transvase Esla-Carrión http://www.itacyl.es/opencms_wf/opencms/proyectos/regadios/infr_regadios/index.html
9. Murillo J., Brufau U., García-Navarro P., Rodríguez M., Andres A., Aplicación del modelo bidimensional Guad_2D para la determinación de zonas inundables en el T.M. de Fraga Huesca) Zaragoza 2008.
10. Fundamentos y bases del Hec_RAS. <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/hecras-document.html>
11. Flumen, Grupo de Investigación en Dinámica Fluvial e Hidrológica. Modelización matemática en régimen variable y dos dimensiones.
12. <http://bibliotecnica.upc.es/FenixDoc/tesis.asp?ifclinia=00000046&ifcsublinia=00&Idm=cas>
13. Canadian Dam Association Dam, Estudio que compara HEC-RAS con FLDWAV y DAMBRK. <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3273/6/53815-6.pdf>

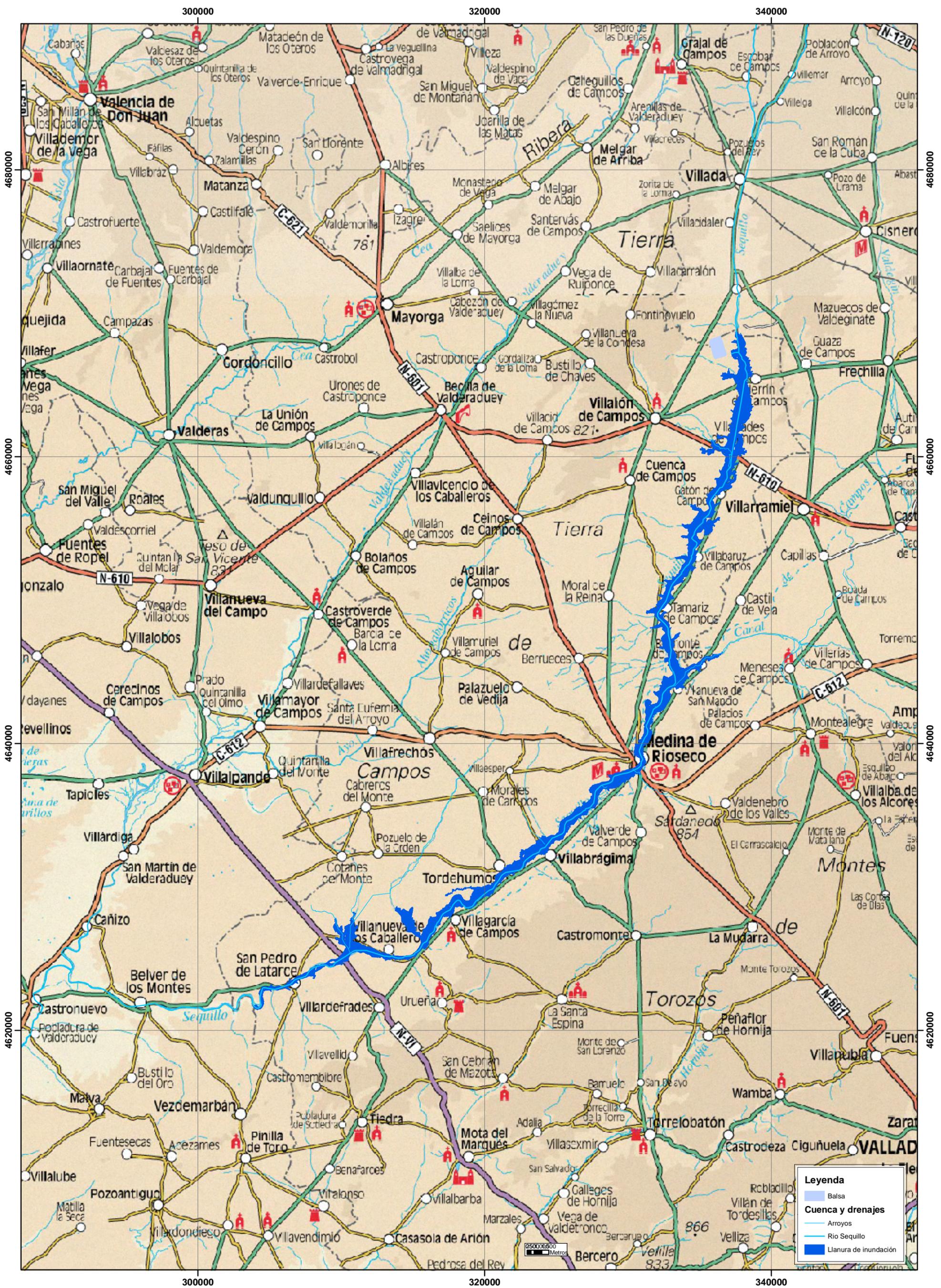
14. Gomez Lahoz J. Apuntes de Fotogrametría del Master en Geotecnologías cartográficas. Ávila 2009.
15. Aguilera D. Apuntes sobre LIDAR del Master en Geotecnologías cartográficas. Master en Geotecnologías cartográficas. Ávila 2009.
16. Brenner C. Aereal laser Scanning. Institute of Cartografy and geoinformatics. University of Hannover, Alemania. 2006
17. ISM, 1997: Fundamentals of Digital Photogrammetry v. 2.0. [Cuadernillo no publicado].
18. Lerma, J. L., 2002: Fotogrametría Moderna: Analítica y Digital. Ed. Universidad Politécnica de Valencia. ISBN 84-9705-210-2.
19. Manuales: Guad_2D, Hec_Ras, y TerraSolid.
20. Ackermann, F., 1996: Experimental Tests on Fast Ambiguity Solutions for Airborne Kinematic GPS Positioning. En: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 1996, Vol. XXXI.

10. Mapas de las llanuras inundación.

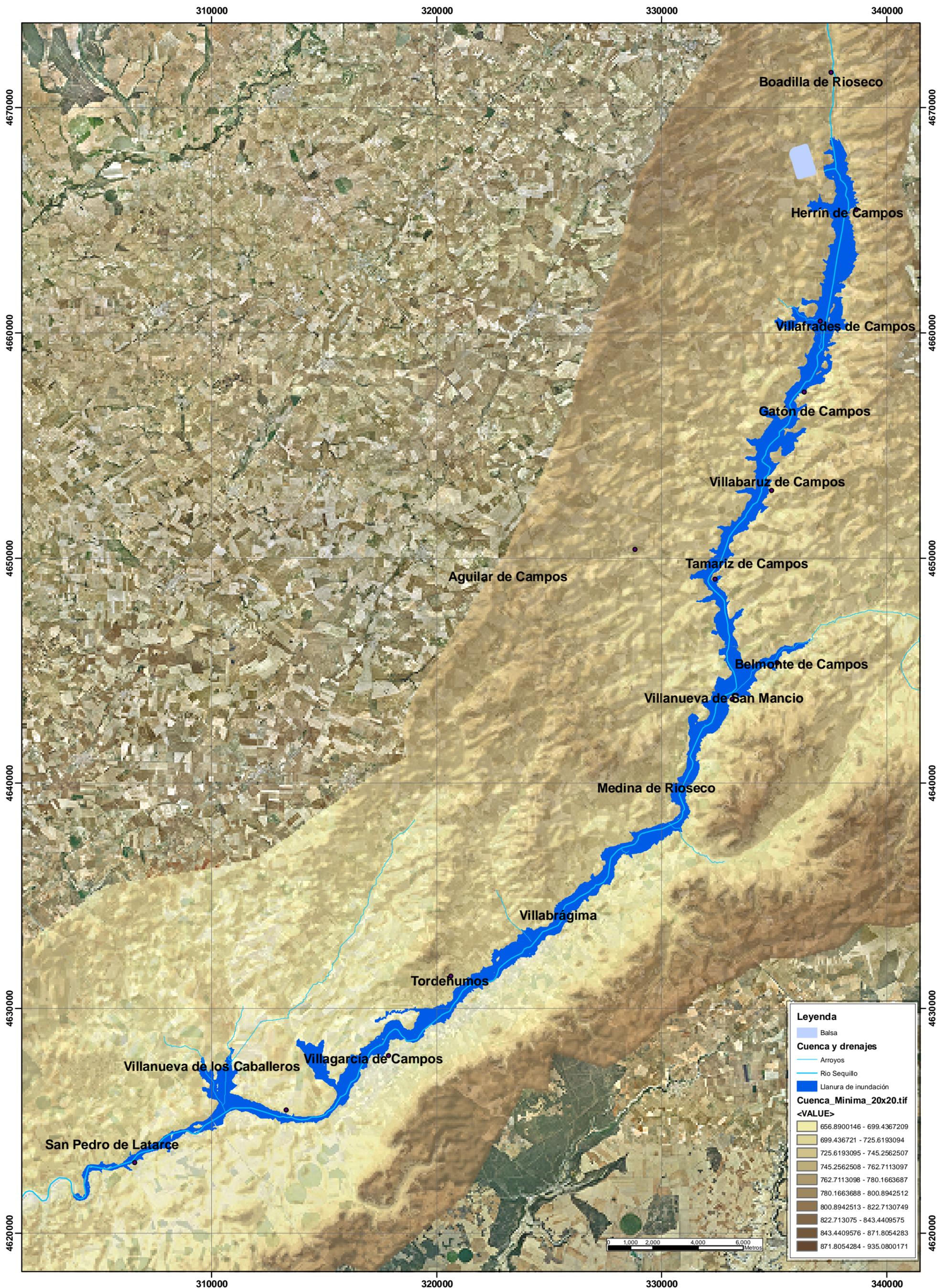
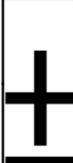
Con las llanuras de inundación calculadas, he procedido a realizar unos mapas que ilustran la situación en torno al estudio realizado.

- Mapa de detalle de las llanuras de inundación.
- Mapa generalista de las llanuras de inundación en los 70 primeros Km. a partir de la balsa.
- Mapa de localización
- Mapa de la cuenca hidrográfica del Río Sequillo.

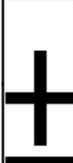
Rio Sequillo

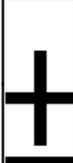


Llanuras de Inudación de la Balsa Esla-Carrión. Cuenca Hidrográfica del Rio Sequillo

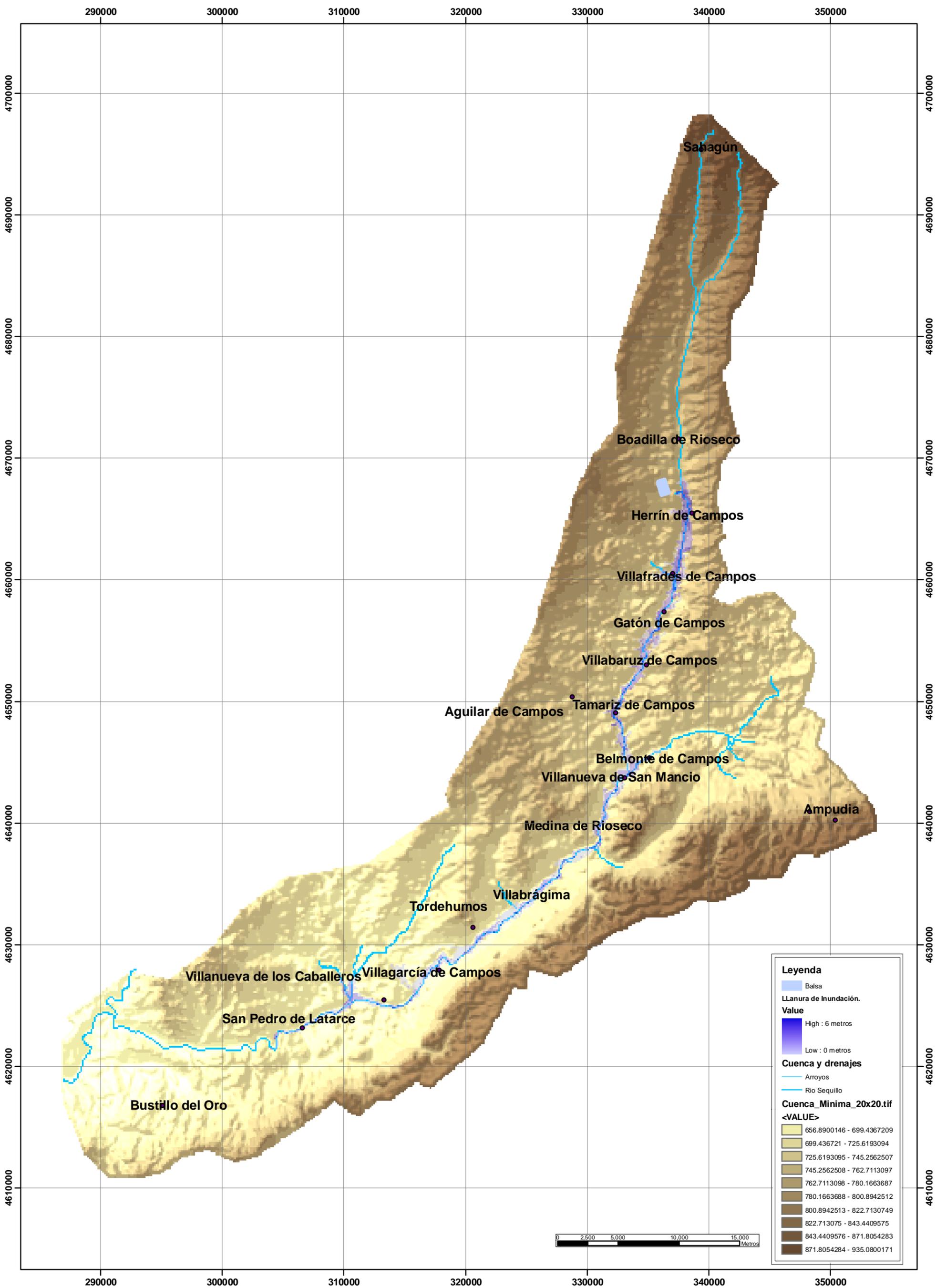


Llanuras de Inudación de la Balsa Eslla-Carrión. Cuenca Hidrográfica del Rio Sequillo





Cuenca Hidrográfica del Rio Sequillo



290000 300000 310000 320000 330000 340000 350000

4700000
4690000
4680000
4670000
4660000
4650000
4640000
4630000
4620000
4610000

4700000
4690000
4680000
4670000
4660000
4650000
4640000
4630000
4620000
4610000

Leyenda

- Balsa
- Llanura de Inundación.**
- Value**
- High : 6 metros
- Low : 0 metros
- Cuenca y drenajes**
- Arroyos
- Rio Sequillo
- Cuenca_Minima_20x20.tif**
- <VALUE>**
- 656.8900146 - 699.4367209
- 699.436721 - 725.6193094
- 725.6193095 - 745.2562507
- 745.2562508 - 762.7113097
- 762.7113098 - 780.1663687
- 780.1663688 - 800.8942512
- 800.8942513 - 822.7130749
- 822.713075 - 843.4409575
- 843.4409576 - 871.8054283
- 871.8054284 - 935.0800171



290000 300000 310000 320000 330000 340000 350000

Llanuras de Inundación de la Balsa Esla-Carrión. Cuenca Hidrográfica del Río Sequillo

336000

338000

340000

4668000

4668000

4666000

4666000

4664000

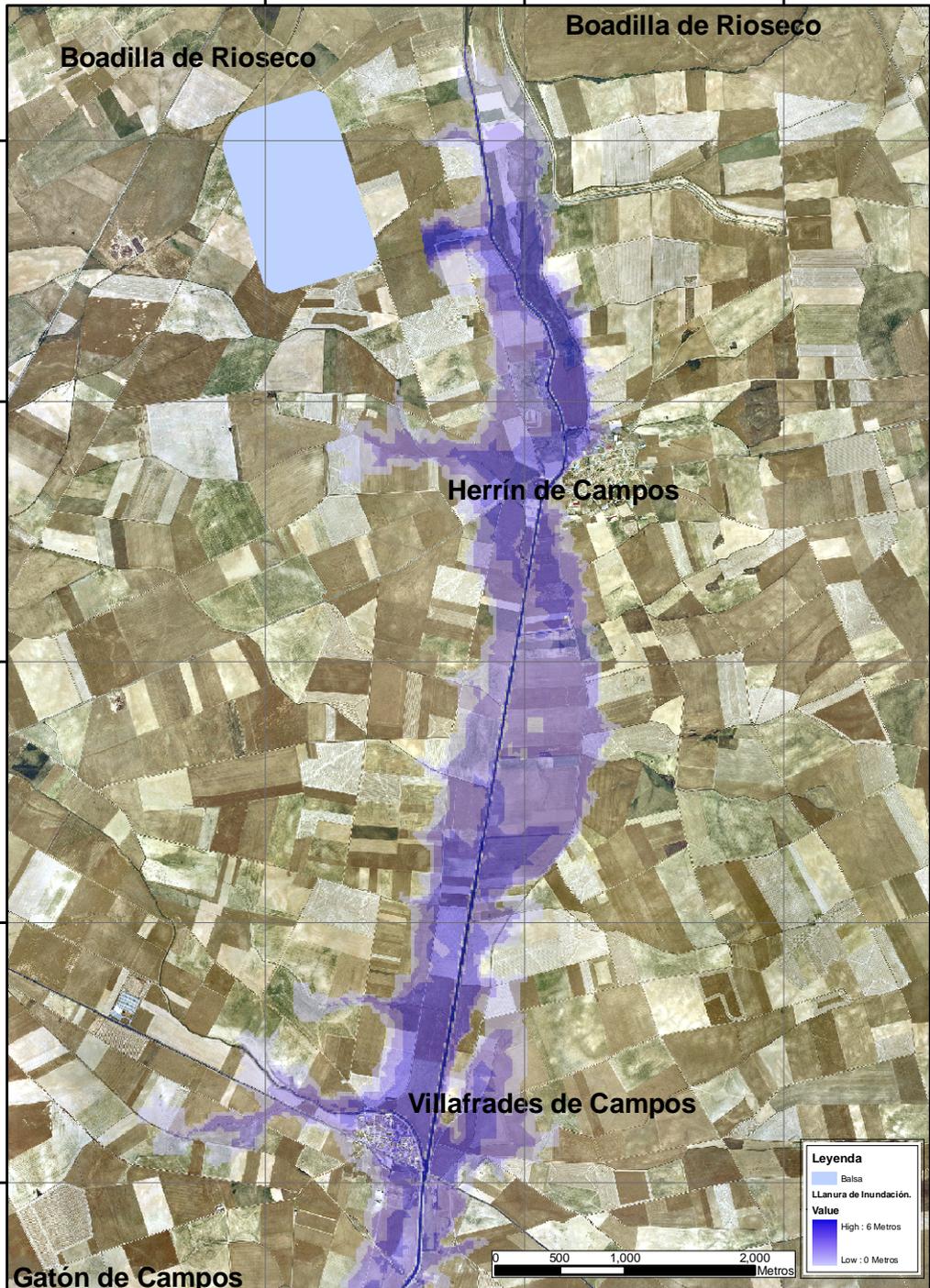
4664000

4662000

4662000

4660000

4660000



Gatón de Campos

336000

338000

340000

0 500 1,000 2,000 Metros

Legenda

- Balsa
- Llanuras de Inundación.

Value

- High : 6 Metros
- Low : 0 Metros