

Anejo 1

Generación de cartografía a partir de los datos LiDAR del PNOA 2014

Índice de contenidos

1. INTRODUCCIÓN	1
2. METODOLOGÍA PARA EL PROCESADO DE LOS DATOS LiDAR.....	2
2.1. Software para la gestión de la información.....	2
2.2. Descripción del procedimiento de procesado de los datos.....	6
2.2.1. Descripción del formato de los datos LiDAR en bruto.....	6
2.2.2. Generación de una primera versión automática del MDT, MDS e imágenes de intensidades.....	7
2.2.3. Procesado realizado con DIELMO 3D.....	7
2.3. Descripción del método de interpolación exclusivo de DIELMO.....	8
2.4. Control de calidad del MDS.....	11
2.5. Generación de las imágenes de intensidades.....	11
2.6. Análisis visual del MDT automático, localización de puentes y errores.....	12
2.7. Edición manual de la clasificación de suelo.....	12
2.8. Definición manual de las líneas de ruptura de los puentes.....	12
2.9. Vectorización manual del 100% de los edificios	12
2.10. Corrección del MDT en los cauces	12
2.11. Generación del MDT definitivo	13
3. PRODUCTOS ENTREGABLES	14

Índice de figuras

<i>Figura 1.- Gestor de proyectos y contenido del documento LiDAR</i>	<i>2</i>
<i>Figura 2.- Ventana de introducción de parámetros</i>	<i>3</i>
<i>Figura 3.- Ventana para la definición de la tabla de clasificaciones.....</i>	<i>3</i>
<i>Figura 4.- Barra de herramientas del gestor de proyectos</i>	<i>3</i>
<i>Figura 5.- Cuadro de diálogo del botón de búsqueda automática.</i>	<i>3</i>
<i>Figura 6.- Ventana de selección del documento LiDAR activo</i>	<i>4</i>
<i>Figura 7.- Ventana de selección por clasificación</i>	<i>4</i>
<i>Figura 8.- Ejemplo de perfil longitudinal de los datos LiDAR</i>	<i>4</i>
<i>Figura 9.-Ejemplo de gráfica longitudinal sobre una línea eléctrica.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 10.- Algoritmos LiDAR disponibles</i>	<i>5</i>
<i>Figura 11.- Pasos automáticos para el procesado de datos LiDAR por bloques</i>	<i>5</i>
<i>Figura 12.- Ventana de recopilación de información</i>	<i>6</i>
<i>Figura 13.- Comparativa entre el software comercial TerraScan y el desarrollado por DIELMO</i>	<i>8</i>
<i>Figura 14.- Diferencias entre los MDS generados con TerraScan y con DIELMO.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 15.- Diferencias con los datos LiDAR originales en TerraScan y en DIELMO.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 16.- Comparativa del MDS en una zona urbana</i>	<i>9</i>
<i>Figura 17.- Diferencias en bordes de edificios.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 18.- Diferencias en la generación del MDT</i>	<i>10</i>
<i>Figura 19.- Diferencias en la generación de muros.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 20.- Ejemplo del típico error de confusión entre puntos de agua y huecos sin datos.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 21.- MDT antes (izquierda) y después (derecha) de la corrección del cauce</i>	<i>12</i>

Figura 21.- Eliminación de puentes.....13

Figura 23.- Imagen de Intensidades del primer pulso.....15

Figura 24.- Imagen de Intensidades del último pulso.....15

Figura 25.- Modelo Digital del Terreno.....15

Figura 26.- Modelo Digital del de Superficies15

Índice de tablas

Tabla 1.- Superficies de tratamiento LiDAR realizadas 1

Tabla 2.- Formato de los datos LiDAR en bruto del primer pulso..... 6

Tabla 3.- Formato de los datos LiDAR en bruto del último pulso..... 6

1. INTRODUCCIÓN

La información de partida para la elaboración de los mapas de zonas inundables es fundamentalmente la cartografía de los tramos de estudio, es decir, el Modelo Digital del Terreno (MDT) de cada tramo fluvial a estudiar con la mejor resolución disponible.

Para la realización de los estudios hidráulicos es necesario disponer de una cartografía de precisión que represente fielmente la realidad del terreno en el tramo de estudio. Para ello, se propone utilizar un modelo digital del terreno generado mediante la tecnología LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging), el cual debe ser tratado para eliminar los valores correspondientes a elementos diferenciados del terreno: vegetación, puentes, etc.

Recientemente, se ha realizado en la isla un vuelo LiDAR (2014) por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) en el marco del proyecto PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) cofinanciado entre el Ministerio de Fomento (por medio del IGN y el CNIG), el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (por medio de la Dirección General del Agua, las Confederaciones Hidrográficas y el FEGA) y el Ministerio de Hacienda y Administraciones Públicas (por medio de la Dirección General del Catastro), además de las Comunidades Autónomas.

Las principales características del producto facilitado anterior facilitado por SITIBSA para las zonas de interés se describen a continuación:

- Los datos se facilitan en ficheros digitales (formato LAS) con información altimétrica de la nube de puntos LiDAR, distribuidos en ficheros de 2x2 km de extensión.
- Las nubes de puntos han sido capturadas mediante vuelos con sensor LiDAR con una densidad de 0,5 puntos/m², y posteriormente clasificadas de manera automática y coloreadas mediante RGB obtenido a partir de ortofotos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) con tamaño de pixel de 25 ó 50 cm.
- Alturas ortométricas con precisión altimétrica mejor de 20 cm RMSE Z.
- Sistema geodésico de referencia ETRS89 y proyección UTM en el huso correspondiente a cada fichero.

Los datos brutos anteriores están ya ajustados por lo que no se ha aplicado ningún ajuste de pasadas adicional.

Las superficies de tratamiento realizadas en cada una de las zonas se corresponden con las siguientes cifras:

Zona de tratamiento LiDAR	Superficie LiDAR (km ²)
Cala Antena	0,39
Cala Antena	0,41
Cala Domingos	1,06

Zona de tratamiento LiDAR	Superficie LiDAR (km ²)
Cala Mencia	0,86
Cala Murada	1,68
Estany d'en Mas	1,04
Manacor	14,25
Porto Cristo	1,53
TOTAL	21,22

Tabla 1.- Superficies de tratamiento LiDAR realizadas

Para cada una de las zonas se han generado las diferentes versiones de los Modelos Digitales de Elevaciones que se detallan en los apartados siguientes, donde también se describe la metodología empleada para su obtención.

En el caso de S'Illot, los datos proceden del estudio realizado por la dirección General de Recursos Hídricos en el ámbito de los trabajos de *Elaboración de Cartografía De Mapas De Peligrosidad y de Riesgo de Inundación de Acuerdo con el Real Decreto 903/2010 Para La Demarcación Hidrográfica De Les Illes Balears* que emplea el mismo procedimiento que se propone en este anejo.

2. METODOLOGÍA PARA EL PROCESADO DE LOS DATOS LiDAR

En los siguientes apartados se realiza una breve descripción del software empleado para la gestión de los datos LiDAR y se detalla la metodología empleada en el procesado de los datos haciendo especial hincapié en el exclusivo método de interpolación aplicado para la generación de los diferentes modelos digitales del terreno.

2.1. Software para la gestión de la información

Las herramientas de procesado de datos LiDAR empleadas han sido desarrolladas por DIELMO en un entorno GIS opensource ampliamente empleado en diversos ámbitos de la ingeniería, especialmente en el campo de la hidráulica y la hidrología: gvSIG.

Algunas de las herramientas son públicas y están dentro de DielmoOpenLiDAR y otras están disponibles solamente para uso interno en producción. Todas las herramientas nuevas se desarrollan directamente en este entorno de software libre partiendo de DielmoOpenLiDAR, pero algunas de ellas como el exclusivo algoritmo de interpolación todavía está disponible por separado en otra aplicación interna.

Lo anterior permite controlar todos los pasos necesarios para la generación de los modelos, desde los algoritmos de clasificación automática, hasta el método de interpolación, herramientas de control de calidad, gestión de datos y recopilación de información para crear los entregables, con la capacidad de ajustarlos en función de las necesidades de cada proyecto.

Para poder gestionar de forma más rápida y sencilla grandes volúmenes de datos LiDAR junto con otros datos GIS como ortofotos o cartografía vectorial, se ha creado un nuevo tipo de documento en gvSIG a parte de las vistas, tablas y mapas al que se denomina como documento LiDAR.

Dentro de este nuevo tipo de documento, se definen todos los datos relacionados con el proyecto LiDAR, de forma que ésto se hace una sola vez al principio y posteriormente desde la vista a la hora de cargar los datos o a la hora de lanzar los algoritmos de cálculo ya no será necesario indicar dónde están los datos ni donde se deben de guardar los resultados, porque todo eso ya estará indicado en el documento LiDAR. A continuación vemos cada una de las ventanas que componen el documento LiDAR y su modo de uso.

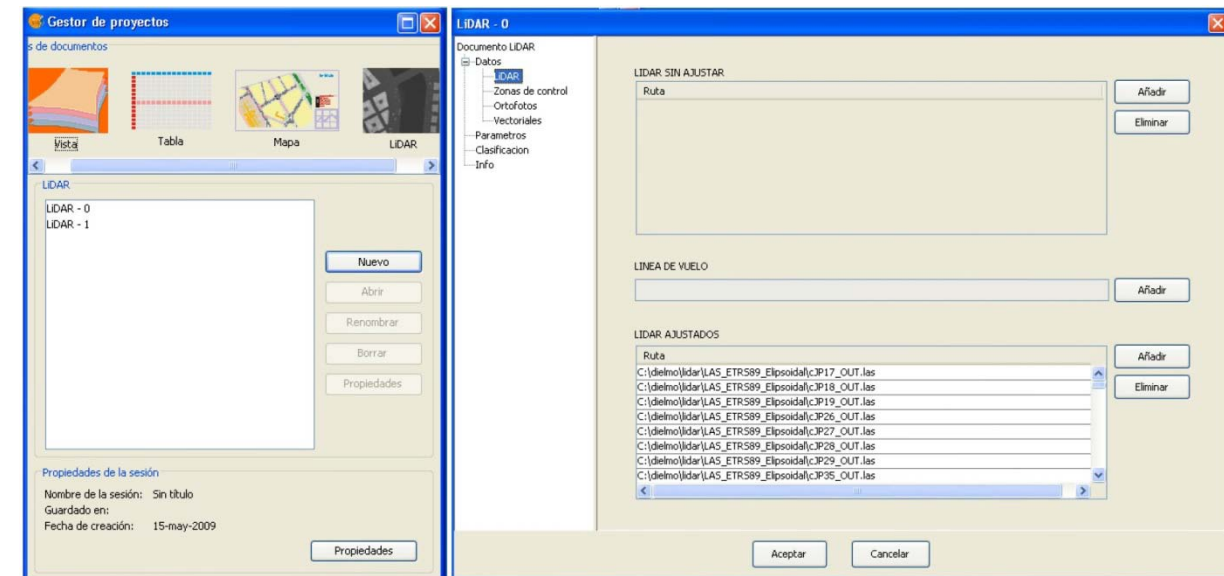


Figura 1.- Gestor de proyectos y contenido del documento LiDAR

Dentro del documento LiDAR, a la izquierda tenemos un árbol que nos permite seleccionar entre varias ventanas para ir indicando todos los datos relacionados con un proyecto LiDAR. A continuación hacemos una descripción de la información que se introduce en cada una de las ventanas:

- **Datos LiDAR:** Corresponde con la figura anterior. Aquí indicaremos la ruta de todos los ficheros LiDAR de los que dispongamos para el proyecto en cuestión. Si a los datos LiDAR ya se les ha aplicado un ajuste de las variaciones de altura entre pasadas, los añadiremos dentro del apartado LiDAR ajustados.
- **Zonas de control:** Aquí se definen las rutas de los ficheros que contienen los levantamientos GPS que se tomaron como zonas de control.
- **Ortofotos:** Aquí se definen las rutas de las ortofotos de la zona, que podremos cargar de forma automática desde la vista.
- **Vectoriales:** Aquí se definen las capas vectoriales (en cualquiera de los formatos soportados por gvSIG) asociados a la zona de estudio. También se puede definir una leyenda por defecto para cada una de las capas vectoriales, de forma que cuando se carguen automáticamente desde la vista lo hagan con dicha simbología.
- **Parámetros:** Corresponde con la imagen siguiente. Aquí se definen las rutas del área de interés (fichero *shape* de polígonos) que define la zona a procesar, los bloques (fichero *shape* de polígonos) en los que vamos a cortar los datos para poder procesarlos de una forma más ágil (por ejemplo en bloques de 2x2 km), la ruta de salida donde se guardan los resultados, la resolución con la que vamos a generar los productos de salida y el solape que se dará a cada uno de los bloques a la hora de procesar los datos para conseguir una correcta unión entre bloques después de hacer el mosaicado de los productos finales y, finalmente, los productos finales que queremos calcular: MDT, MDS, intensidades, etc.

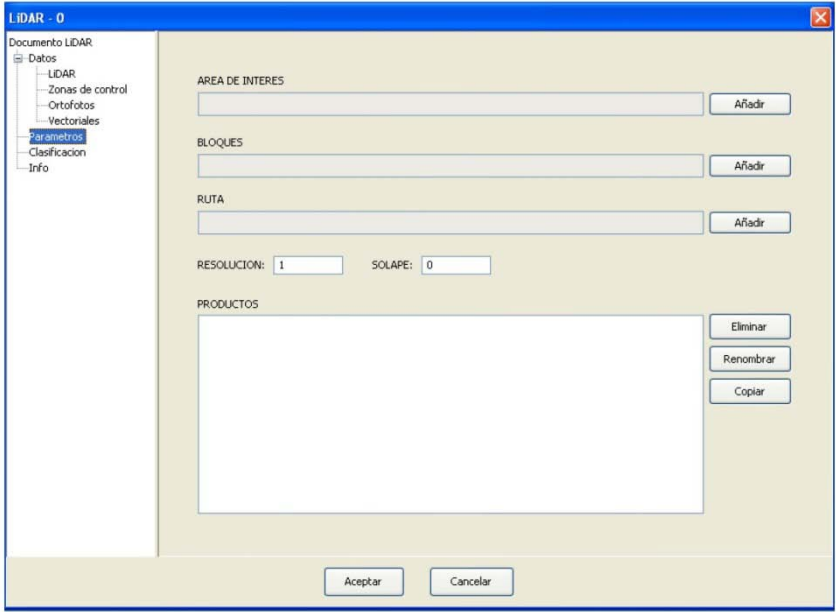


Figura 2.- Ventana de introducción de parámetros

- **Clasificación:** Corresponde a la imagen de la figura siguiente. Aquí definiremos la tabla de clasificaciones que tendremos en cuenta a la hora de visualizar los datos clasificados y a la hora de interpretar los valores del campo *Classification* en la tabla correspondiente a cada uno de los puntos. Este panel nos permite cambiar el color con el que se pinta cada una de las clases, cambiar el valor con el que se clasifica cada una de las 12 clases por defecto (definidas en el formato estándar LAS), añadir nuevas clases y activar las que serán visibles o invisibles en la vista.

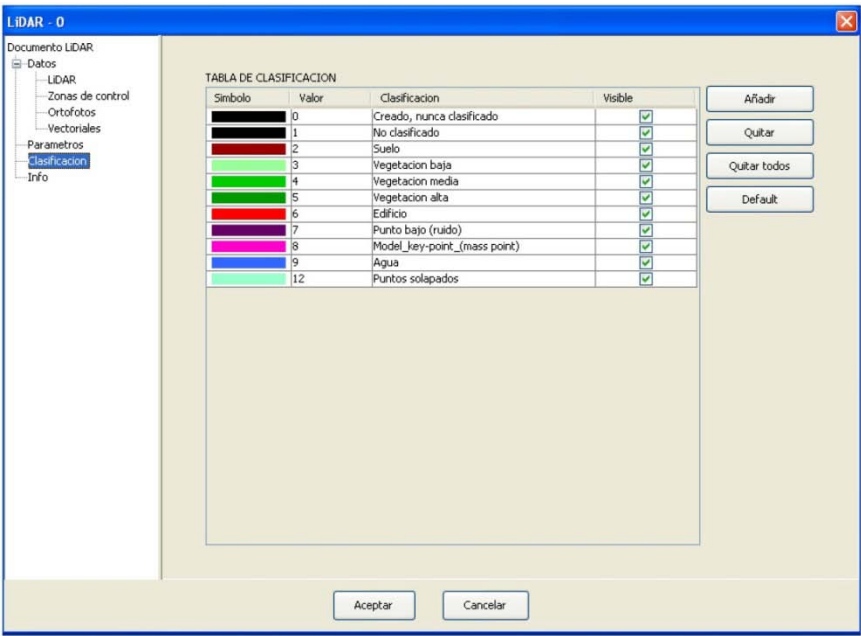


Figura 3.- Ventana para la definición de la tabla de clasificaciones

- **INFO:** Este panel se reserva para definir información adicional como el operador que está trabajando con los datos o la ruta del fichero log donde se irán guardando información de los procesos que se ejecuten.

Al pulsar el botón de *Aceptar*, se recopila la información de las rutas de los ficheros en diferentes formatos (LiDAR, vectoriales y raster) y la extensión geográfica que ocupa cada fichero de forma que esta información se pueda utilizar desde la vista cuando usemos la herramienta que carga capas de forma automática.

Una vez definidos los datos disponibles relacionados con el proyecto LiDAR, podemos volver a la vista y trabajar con los datos de una forma mucho más ágil. La barra de herramientas LiDAR disponibles en la vista del proyecto es la siguiente:



Figura 4.- Barra de herramientas del gestor de proyectos

A continuación pasamos a describir estas herramientas:

- **Cargador de capas automático:** para encontrar entre todos esos ficheros el que cae dentro de la zona que queremos visualizar o aunque lo supiéramos, solamente el buscar el nombre del fichero entre los que tendremos en la misma carpeta sería un proceso muy lento. Al pulsar este botón, se nos permite dibujar un rectángulo dentro de la vista y posteriormente se hace una búsqueda automática entre todos los datos geográficos definidos previamente en el documento LiDAR, mostrando esta ventana para elegir el tipo de dato que queremos cargar:

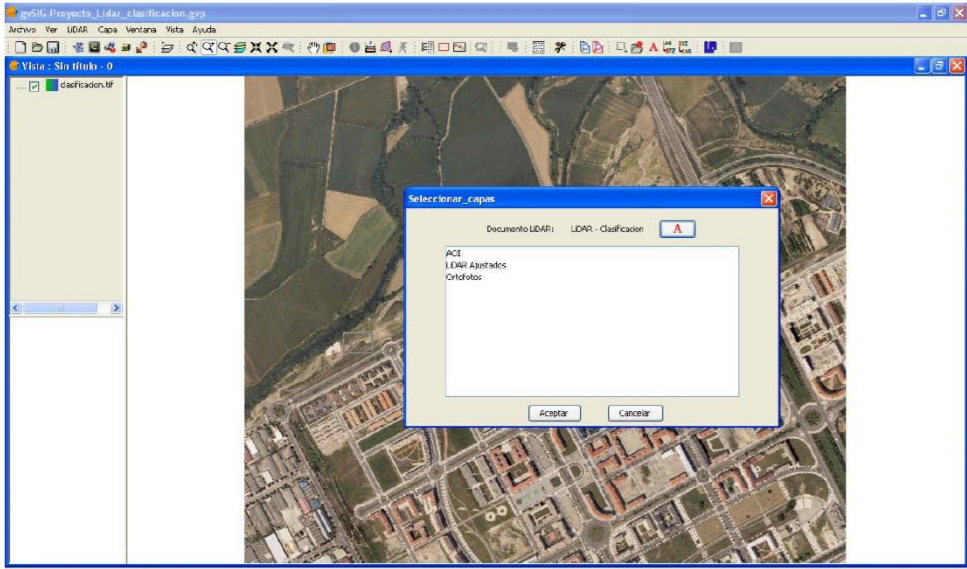


Figura 5.- Cuadro de diálogo del botón de búsqueda automática.

En la parte superior de la venta se indica el nombre del documento LiDAR activo, a partir del cual se cogerán los datos geográficos. Si quisiéramos cambiar el documento LiDAR activo, podemos pulsar el botón "A" que se describirá en el siguiente punto.

La ventana de selección de capas automática nos muestra un listado de todos los datos geográficos definidos en el documento LiDAR activo y que caen dentro del rectángulo que previamente dibujado en la vista. Podemos seleccionar uno o varios elementos, y al pulsar el botón Aceptar estos datos se añaden a la tabla de contenidos de la vista activa y se visualizan superpuestos al resto de información que hubiera disponible.

- **A Selección del documento LiDAR activo:** del cual se cogen los datos de entrada/salida para cargar capas de forma automática o para lanzar los algoritmos de cálculo. Este modo de trabajar permite definir diferentes documentos LiDAR a la vez en un mismo proyecto de gvSIG y es muy útil en el caso de trabajar con una serie temporal de datos de la misma zona. El documento LiDAR activo por defecto es el primero de la lista o el último que se ha utilizado. A continuación vemos la ventana que aparece al pulsar este botón para seleccionar el documento que queremos activar:

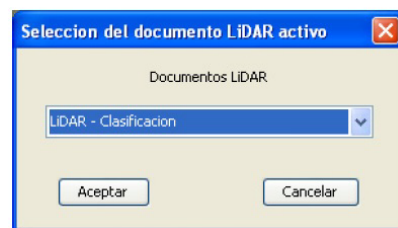


Figura 6.- Ventana de selección del documento LiDAR activo

- **Selección por clasificación:** Esta herramienta nos muestra una ventana con el listado de clases definido en el documento LiDAR activo y posteriormente parte de los puntos LiDAR que están seleccionados entre una o varias capas de la vista activa y realiza un filtro que restringe la selección solamente a los puntos que pertenecen a las clases seleccionadas.



Figura 7.- Ventana de selección por clasificación

- **EST Establecer clasificación:** Esta herramienta nos muestra la misma ventana que en el caso anterior con el listado de clases definido el documento LiDAR activo y posteriormente asigna la clasificación deseada a los puntos seleccionados entre una o varias capas de la vista activa. Esta herramienta solamente está activa cuando las capas LiDAR están en edición y cuando el nivel de zoom es lo suficientemente alto como para pintar todos los puntos en la vista.
- **Perfil longitudinal:** Esta herramienta permite un análisis más profundo de los datos así como hacer clasificaciones manuales o corregir las clasificaciones automáticas de los datos LiDAR, permitiendo realizar un adecuado control de calidad de los datos.

La herramienta se activa cuando hay alguna capa LiDAR en la vista y al pinchar este botón se nos permite definir la región de datos LiDAR para los cuales queremos visualizar el perfil longitudinal. Para ello en primer lugar definiremos una línea pinchando sobre dos puntos en la vista, y posteriormente alejando el ratón de la línea y volviendo a pinchar sobre la vista, podremos definir la profundidad del perfil. Una vez definida la zona, aparece esta ventana con el perfil longitudinal de los puntos que hemos seleccionado. Por ejemplo, en la figura siguiente vemos un perfil longitudinal sobre dos edificios, y podemos identificar perfectamente los puntos que han caído en el tejado de los edificios, así como los puntos que son suelo y también observamos unos puntos que son vegetación en medio de los dos edificios.

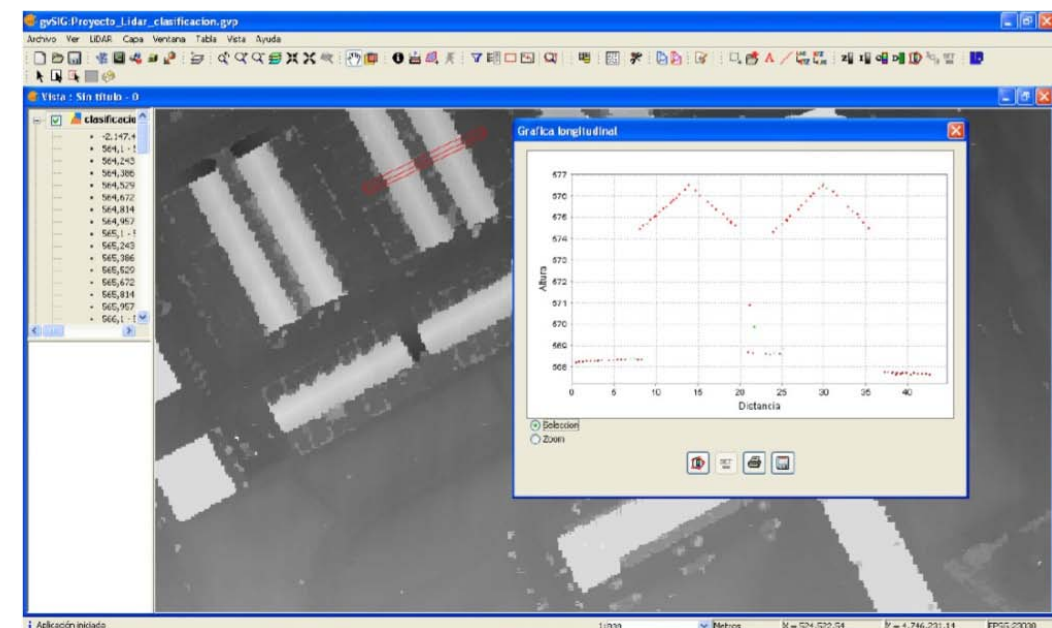


Figura 8.- Ejemplo de perfil longitudinal de los datos LiDAR

Dentro de la gráfica, los puntos se pintan en función de su clasificación según la tabla de clasificaciones definida en el documento LiDAR activo. Si los puntos no estuvieran clasificados, estos se pintan en el color que se haya definido para la clase creado, nunca clasificado. En la figura siguiente vemos otro ejemplo de gráfica longitudinal sobre una línea

eléctrica. En este caso todos los puntos salen del mismo color porque el fichero las no está clasificado.

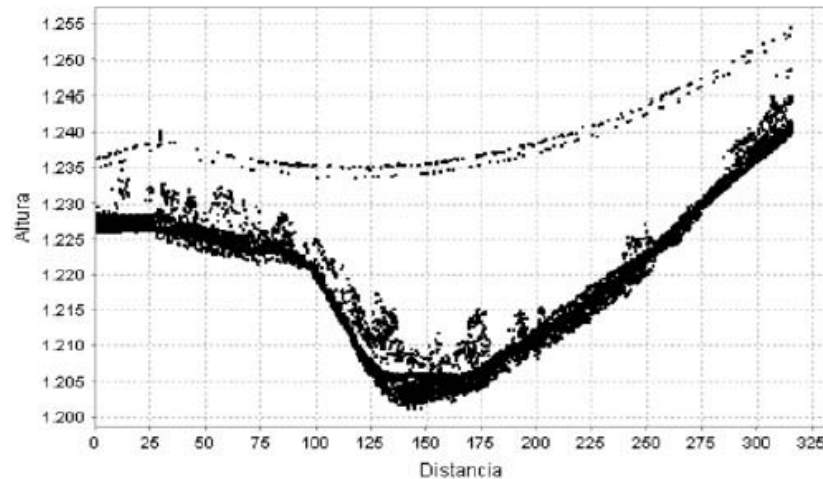


Figura 9.-Ejemplo de gráfica longitudinal sobre una línea eléctrica

Dentro de la gráfica longitudinal tenemos una serie de herramientas que nos permiten analizar los datos de una forma más ágil. A continuación pasamos a describir cada una de estas herramientas:

- **Selección:** Permite definir sobre la gráfica longitudinal un polígono para seleccionar los puntos deseados. Una vez definido el polígono, los puntos seleccionados se pintan en color naranja dentro del gráfico longitudinal y los mismos puntos también quedan seleccionados en la vista.
- **Zoom:** Permite hacer un zoom dentro de la gráfica longitudinal para ver con más detalle los puntos deseados o seleccionar con más precisión. Si pulsamos sobre la gráfica con el botón derecho del ratón volvemos al zoom original.
- **Selección por clasificación:** Después de hacer una selección en la gráfica, podemos usar esta herramienta para que partiendo de los puntos seleccionados, se restrinja solamente a las clases seleccionadas. Este botón es equivalente al de la vista que hemos descrito previamente.
- **Establecer clasificación:** Después de hacer una selección en la gráfica, podemos usar esta herramienta para asignar la clasificación deseada a los puntos seleccionados. Esta herramienta solamente está activa cuando la capa LiDAR está en edición y cuando el nivel de zoom es lo suficientemente alto como para pintar todos los puntos en la vista. Este botón es equivalente al de la vista que hemos descrito previamente.
- **Imprimir:** Imprime la gráfica longitudinal en la impresora seleccionada.

- **Guardar:** Guarda la gráfica longitudinal en una imagen en formato png.
- **Algoritmos LiDAR:** Aquí tenemos un recopilatorio donde vamos añadiendo todos los algoritmos de análisis necesarios para realizar el procesado de datos LiDAR y crear productos finales. En la figura siguiente vemos los disponibles hasta el momento y a continuación hacemos una breve descripción de alguno de ellos.

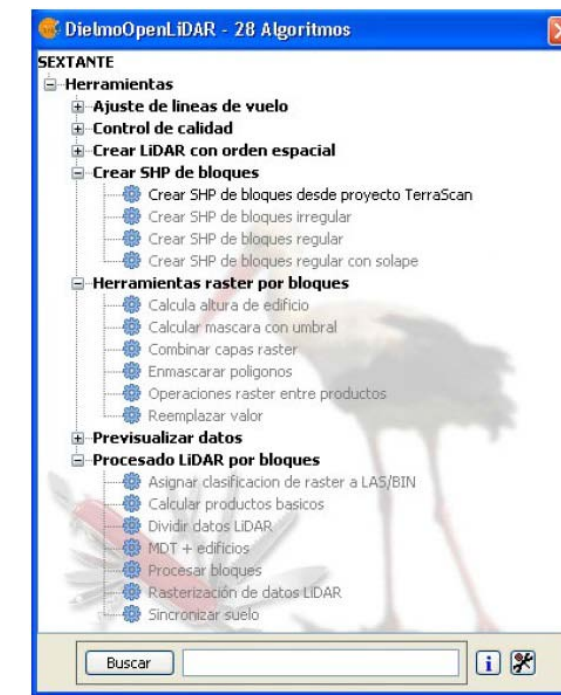


Figura 10.- Algoritmos LiDAR disponibles

Para que llamar a todos estos algoritmos sea lo más rápido y sencillo, dentro del menú LiDAR que aparece en la vista (lo vemos en la figura siguiente), hemos definido una serie de pasos automáticos para el procesado de los datos LiDAR por bloques.

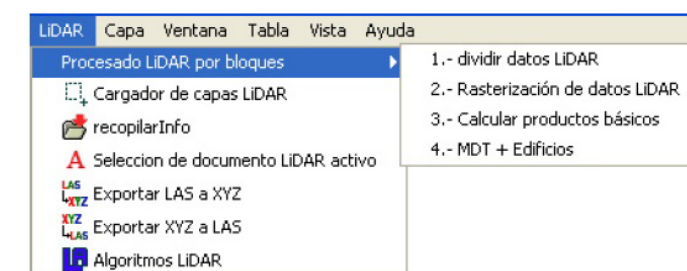


Figura 11.- Pasos automáticos para el procesado de datos LiDAR por bloques

Al pulsar cada una de estas opciones, se cogen los datos de entrada y salida desde el documento LiDAR y se llama a los algoritmos descritos en el punto anterior de forma

automática.

 **Recopilar información:** Esta herramienta permite recopilar la información que está dentro de cada bloque, para poner todos los ficheros equivalentes en una misma carpeta de salida. Como entradas tenemos la carpeta que almacena todos los bloques, el fichero *shape* de bloques que contiene aquellos bloques de los cuales queremos recopilar la información (podemos editar el fichero de bloques para que solamente se recopile información de algunos de los bloques), la ruta de salida donde vamos a almacenar la recopilación de información y los productos que queremos recopilar. En la figura siguiente vemos esta ventana.

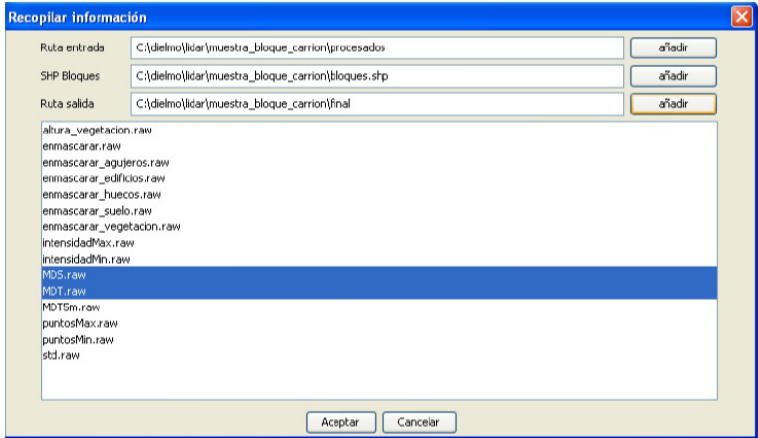


Figura 12.- Ventana de recopilación de información

El listado de productos aparece cuando definimos la ruta de entrada y el *shape* de bloques, y se crea a partir de los nombres de los ficheros disponibles dentro de la carpeta del primer bloque. Como se supone que en todas las carpetas de bloques hay los mismos ficheros, si por ejemplo seleccionamos MDS.raw y MDT.raw, en la ruta de salida se creará una carpeta MDS y otra carpeta MDT, dentro de los cuales se copian todos los MDS y MDT respectivamente.

A la hora de copiar los datos, se borra el solape en el caso de que exista y los nombres de los ficheros se crean a partir del nombre del producto y del nombre del bloque (por ejemplo MDS_7503908.raw).

2.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE PROCESADO DE LOS DATOS

2.2.1. Descripción del formato de los datos LiDAR en bruto

Los puntos totales obtenidos son utilizados en bloques de 1x1 kilómetros, y son entregados en mosaicos divididos por partes y áreas de acuerdo con las delimitaciones definidas por el cliente.

Los datos se entregan georeferenciados en coordenadas locales ETRS89 UTM zona 31 y alturas ortométricas.

Los datos LIDAR brutos del PNOA 2014 cedidos por SITIBSA para este proyecto, son transformados al siguiente formato para poder ser utilizados con el Software Lidar propio de DIELMO 3D:

TGPS	UTM X (pp)	UTM Y (pp)	Z (pp)	Int (pp)
571583.92	724520.22	4374864.60	45.45	27
571583.92	724519.19	4374863.78	45.38	26

Tabla 2.- Formato de los datos LiDAR en bruto del primer pulso

TGPS	UTM X (up)	UTM Y (up)	Z (up)	Int (up)
571583.92	724520.24	4374864.63	45.32	27
571583.92	724519.20	4374863.79	45.33	26

Tabla 3.- Formato de los datos LiDAR en bruto del último pulso

En las tablas anteriores los encabezados se refieren a los siguientes términos:

- **TGPS** es el tiempo GPS.
- **UTM X (up)** es la coordenada X del último pulso que ha vuelto al sensor.
- **UTM Y (up)** es la coordenada Y del último pulso que ha vuelto al sensor.
- **Z (up)** es la altura medida para el último pulso que ha vuelto al sensor.
- **UTM X (pp)** es la coordenada X del primer pulso que ha vuelto al sensor.
- **UTM Y (pp)** es la coordenada Y del primer pulso que ha vuelto al sensor.
- **Z (pp)** es la altura medida para el primer pulso que ha vuelto al sensor.
- **Int (up)** es la intensidad del último pulso.
- **Int (pp)** es la intensidad del primer pulso.

2.2.2. Generación de una primera versión automática del MDT, MDS e imágenes de intensidades

Llegados a este punto, consideramos que los ficheros LAS ya están preparados para comenzar a generar los productos finales. Para ello lo primero que hacemos es partir del polígono de entrada que delimita la zona de interés a procesar y creamos un fichero vectorial de polígonos con los bloques en los que vamos a cortar los datos para procesarlos. Este es el fichero de bloques es importante porque se debe de definir dentro del apartado parámetros del documento LiDAR y es de donde los algoritmos de cálculo automático obtienen la información de por donde tienen que cortar los datos y con qué nombre crearán cada una de las carpetas en el directorio de salida.

En el documento LiDAR descrito anteriormente, definimos los ficheros LAS de entrada, el fichero con la zona de interés a procesar, del fichero de bloques, la ruta de salida, la resolución de los modelos de salida (en este caso 1m) y el solape a utilizar a la hora de interpolar los bloques (en este caso se usaron 200m a cada lado) para evitar fallos de interpolación en el cambio de un bloque al siguiente. Una vez definidos los parámetros de entrada, los pasos a seguir para comenzar el procesado de los datos son:

1. **Dividir datos LiDAR:** Este algoritmo coge como entradas una serie de ficheros LiDAR, el fichero de bloques, y el directorio de salida donde se guardan los datos. Como resultado, en el directorio de salida se crea una carpeta con el nombre de cada uno de los bloques donde dentro se habrá creado un fichero LAS con los puntos LiDAR que caían dentro de dicho bloque. De esta forma hacemos una segmentación de los datos para poder trabajar con ellos de una forma más rápida y eficiente.
2. **Rasterización de datos LiDAR:** A continuación aplicamos un algoritmo que rasteriza los datos LiDAR que hemos creado dentro de cada bloque en el punto anterior, creando diferentes ficheros raster dentro de cada bloque, como por ejemplo:
 - Una máscara de la zona a procesar.
 - Un fichero con las alturas máximas para cada píxel, dejando un valor igual a 0 en los píxeles donde no hay dato LiDAR, a partir del cual se creará posteriormente el MDS.
 - Un fichero con las alturas mínimas para cada píxel, dejando un valor igual a 0 en los píxeles donde no hay dato LiDAR, a partir del cual se creará posteriormente el MDT.
 - Un fichero con las intensidades máximas para cada píxel, dejando un valor igual a 0 en los píxeles donde no hay dato LiDAR, a partir del cual se creará posteriormente la imagen de intensidades.
 - Una máscara con la clasificación de suelo proveniente de la clasificación automática que tendremos en los ficheros LAS. Esta máscara tiene un valor igual a 1 en el caso de que dicho píxel corresponda a suelo en la imagen de alturas mínimas y un valor igual a 0 en el resto de los casos.
3. **Detección de las zonas de agua:** Una vez rasterizados los datos LiDAR, vamos a seguir trabajando en raster para la creación de los productos finales. El siguiente paso antes de

interpolar los datos es hacer una detección de las zonas de agua. Para ello buscamos agrupaciones de varios píxeles donde no haya datos LiDAR en la máscara de alturas mínimas, y a partir de ahí creamos una nueva máscara dentro de cada bloque donde se almacenan las zonas de agua. Esta máscara se usará posteriormente para interpolar de forma diferente las zonas de agua del resto de los datos, de forma que la cota del MDT sea constante e igual a la de la orilla.

4. **Interpolación:** A continuación pasamos a interpolar los diferentes productos creados dentro de cada bloque en los pasos anteriores para crear una primera versión del MDS, MDT e imagen de intensidades:
 - MDS: Para crear el Modelo Digital de Superficies interpolamos la imagen de alturas máximas usando nuestro exclusivo método de interpolación (descrito a continuación), de forma que se mantiene la cota exacta que había en la imagen de alturas máximas para todos aquellos píxeles que tuvieran valor, y solamente se le asigna un valor interpolado a aquellos píxeles donde no había ningún dato procedente del vuelo LiDAR. Como hemos comentado anteriormente, las zonas clasificadas como agua se interpolan de forma diferente, buscando el valor de altura mínimo alrededor de la orilla y asignando esa cota constante a toda la superficie de agua.
 - MDT: Para crear el Modelo Digital del Terreno en primer lugar multiplicamos la imagen de alturas mínimas por la máscara que contiene la clasificación de suelo, de forma que obtenemos un producto intermedio que contiene solamente las alturas del terreno, el cual se interpola usando el exclusivo método de interpolación, de forma que se mantiene la cota exacta que había en la imagen de alturas mínimas para todos aquellos píxeles que tuvieran valor y se hubieran clasificado como suelo, y solamente se le asigna un valor interpolado al resto de los píxeles del modelo. En este caso también, las zonas clasificadas como agua se interpolan de forma diferente, buscando el valor de altura mínimo alrededor de la orilla y asignando esa cota constante a toda la superficie de agua.
 - Imagen de intensidades: Para crear la imagen de intensidades interpolamos la rasterización previa de las intensidades usando nuestro exclusivo método de interpolación. En este caso, las zonas clasificadas como agua también se interpolan de forma diferente, dejando un valor igual a cero, dado que en las zonas de agua no vuelve ninguna intensidad al sensor.

2.2.3. Procesado realizado con DIELMO 3D

A continuación se describe la metodología seguida para el procesado de los datos LiDAR:

1. Paso de los datos LiDAR brutos en formato ASCII (descrito en el apartado anterior) a formato raster, en bloques de 1400 x 1400 m (1 km² con solape de 200 m por cada lado) con una resolución espacial de 1 m por píxel.
2. Usando el método de interpolación desarrollado por DIELMO 3D, se genera el modelo digital

de superficie a partir de las alturas medidas por el primer pulso medido por el LIDAR.

- Usando el método de interpolación desarrollado por DIELMO 3D, se generan las imágenes de intensidad correspondientes al primer y último pulso medido por el LIDAR.
- Utilizando técnicas de clasificación automática basadas en la pendiente del terreno y la morfología de los objetos, se realiza una primera clasificación de la vegetación y los edificios presentes en la zona de estudio.
- Posteriormente se ha realizado una supervisión de toda la zona de estudio, validando la clasificación de edificios, y haciendo las modificaciones pertinentes de forma manual. Para todo el proceso de validación se ha utilizado software DIELMO 3D, que permite aumentar la productividad.
- Partiendo del último pulso medido por el LIDAR, se han eliminado los puntos clasificados como vegetación, edificios y puentes para obtener el modelo digital del terreno por interpolación.
- Se han realizado mejoras de cauces en los lugares considerados para mejorar su continuidad, contrastando con los datos recopilados en campo.
- Finalmente se han guardado los datos de salida en los formatos y divisiones indicados en el apartado 3 de este documento.

2.3. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE INTERPOLACIÓN EXCLUSIVO DE DIELMO

Siempre se hace hincapié en las precisiones de los datos originales, pero no se presta atención a la precisión de los productos finales en formato raster que es con los que realmente van a trabajar los usuarios finales a la hora de realizar para aplicaciones hidrológicas, estudios de erosión, etc.

Los algoritmos basados en triangulación hacen una selección de puntos para que aparezcan menos errores en la interpolación y para reducir el coste computacional. El método de interpolación utilizado por DIELMO rasteriza los puntos originales medidos por el LiDAR, usando toda la información que se encuentra en ellos. Al rasterizar los puntos originales, de los puntos medidos dentro de cada cuadrícula de 1x1 m, se coge el valor del punto más alto (en el caso del MDS) y del punto más bajo (en el caso del MDT). Para estos puntos originales que hemos rasterizado se conserva siempre la altura exacta, mientras que otros softwares comerciales cuya interpolación está basada en triangulación, modifican estos valores haciendo que se reduzca la precisión de forma significativa. A continuación presentamos una comparativa entre el software comercial TerraScan y el desarrollado por DIELMO a la hora de generar los productos finales: MDS, y MDT a partir de los datos LiDAR del mismo vuelo. Veremos las principales diferencias entre las dos metodologías en diferentes áreas como forestales, urbanas y zonas de agua.

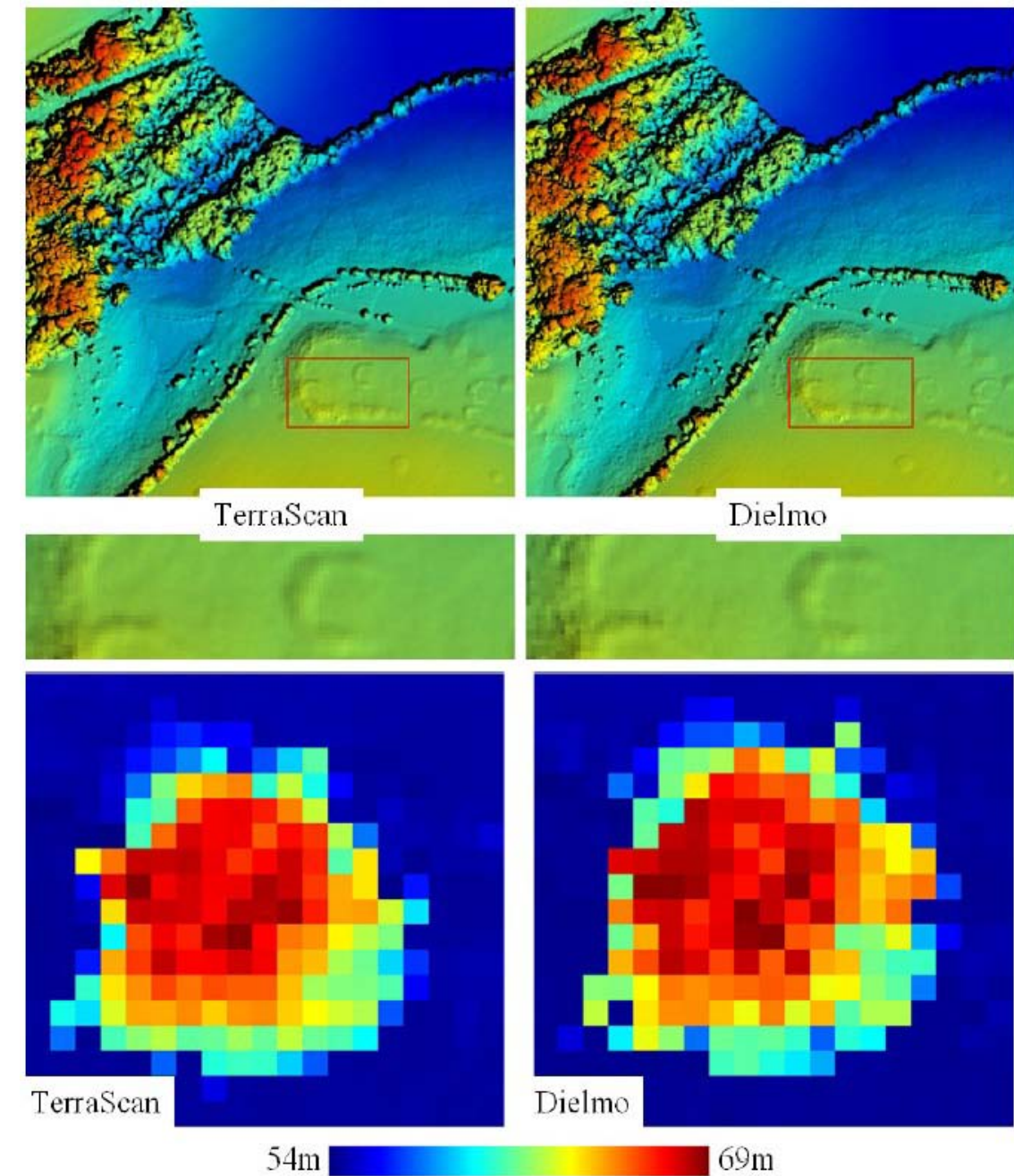


Figura 13.- Comparativa entre el software comercial TerraScan y el desarrollado por DIELMO

En la comparativa de la figura anterior, con un primer vistazo al MDS podemos apreciar muy pocas diferencias, y en ambos casos tenemos una buena calidad visual, pero si hacemos un zoom hasta el nivel de un árbol, podemos ver variaciones importantes en la forma y la altura de los árboles. Para ver las variaciones exactas entre estos dos modelos, hemos hecho la diferencia entre ambos:

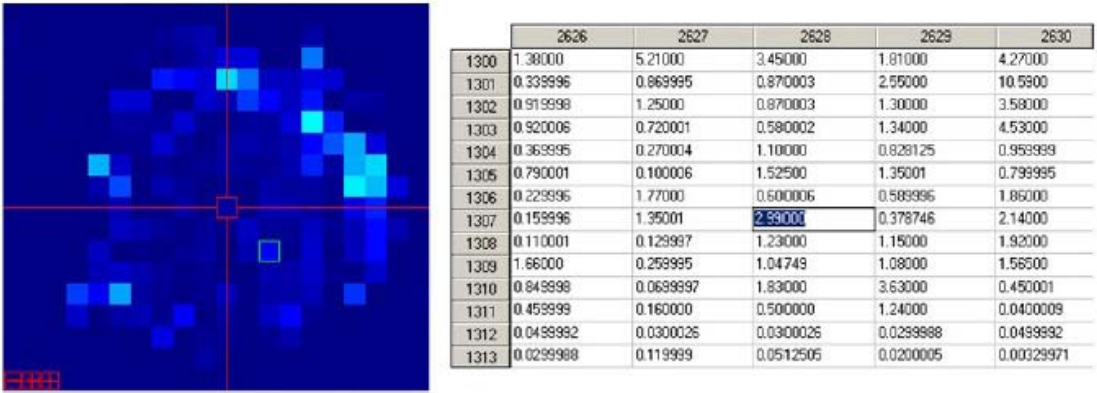


Figura 14.- Diferencias entre los MDS generados con TerraScan y con DIELMO

Los datos originales medidos por el LiDAR tienen una precisión en alturas típica de +/- 15 cm (1 sigma), sin embargo la resta de estos MDS hay diferencias importantes en todos los píxeles, con errores de hasta 10,59 metros en altura. Es decir, utilizando los mismos datos LiDAR originales en dos softwares de procesamiento diferentes, los resultados finales tienen importantes discrepancias. Esto significa que uno o los dos softwares de procesamiento provocan una reducción en la precisión de los datos LiDAR originales. Para comprobar a qué se deben estos errores, hemos realizado la diferencia entre los MDS obtenidos con ambos softwares y los datos LiDAR originales (XYZ) medidos en la adquisición de datos LiDAR.

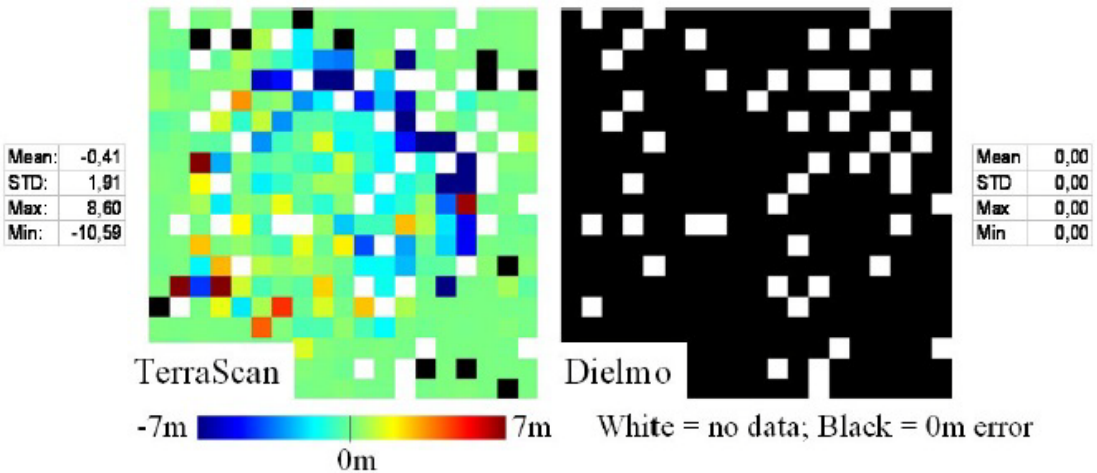


Figura 15.- Diferencias con los datos LiDAR originales en TerraScan y en DIELMO

En la figura anterior hemos pintado en color blanco los píxeles donde no había un dato XYZ original para poder comparar, y en color negro aquellos puntos que tienen 0m de error. En el MDS de TerraScan encontramos diferencias de +/- 1.91 metros (1 sigma). Esto significa que este software modifica los valores de los datos originales, incrementando el error del MDS en esta pequeña zona de +/- 15 centímetros (1 sigma) que tenían los datos originales a +/- 1.91 metros (1 sigma). Por otro lado, el software de DIELMO tiene un error de 0 m con los valores originales medidos por el sistema

LiDAR por definición.

A continuación vamos a ver una comparativa del MDS en una zona urbana. En un primer vistazo a los MDS, también podemos ver que hay muy pocas diferencias entre ambos, y que ambos tienen buena calidad visual, pero al hacer un zoom al nivel de un edificio, también observamos diferencias importantes.

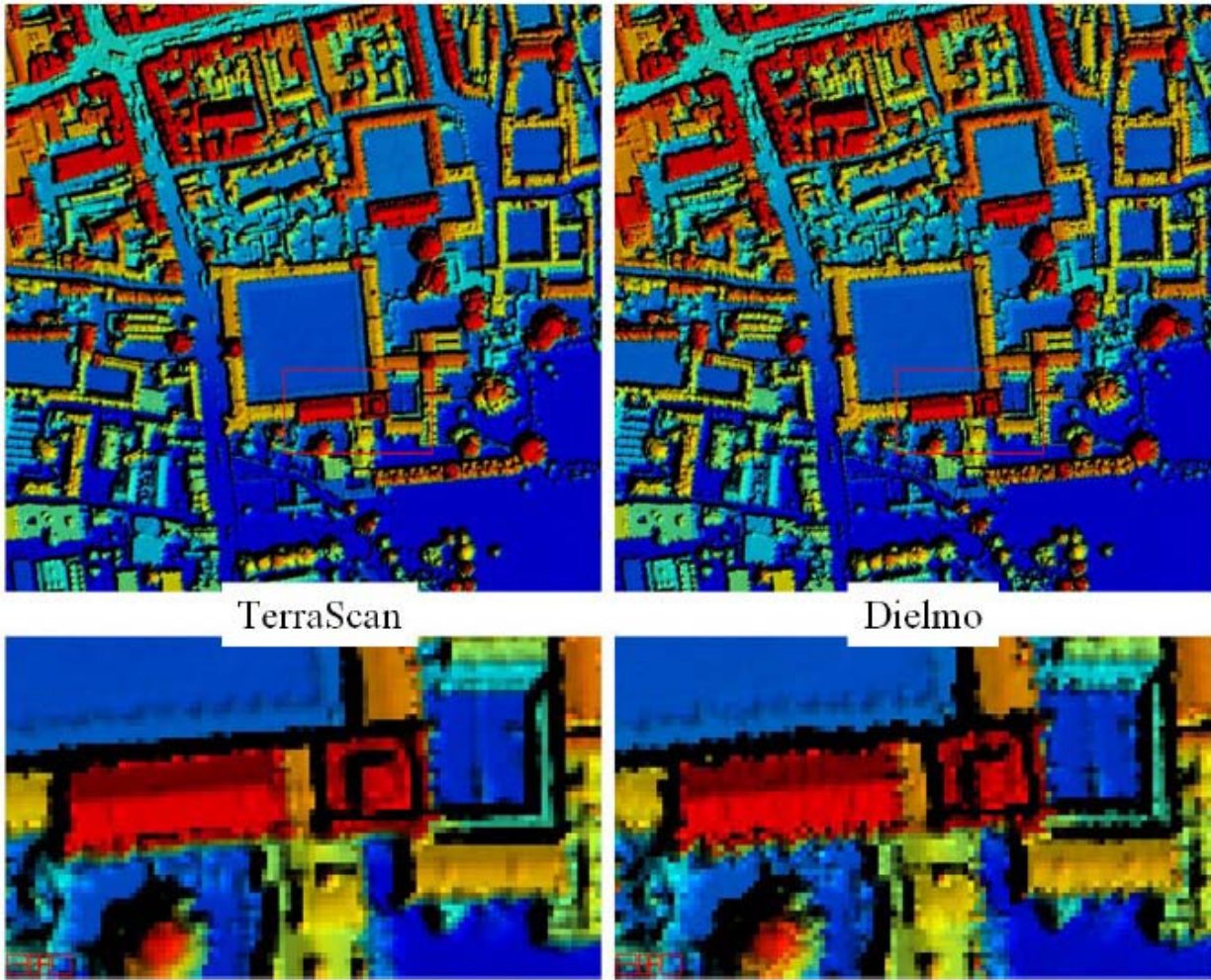


Figura 16.- Comparativa del MDS en una zona urbana

En la parte inferior de la figura anterior vemos los puntos originales medidos por el LiDAR, donde los píxeles pintados en blanco corresponden a aquellos donde no hay medida original. A partir de estos puntos originales vemos que el MDS generado con el software de DIELMO mantiene exactamente las alturas medidas por el LiDAR, interpolando solamente aquellos puntos que estaban en blanco y que no tenían dato original. En este caso, los píxeles en color azul claro que aparecen en los puntos que no tenían dato a lo largo del borde del edificio se les ha asignado una altura entre la parte alta del edificio y el suelo. Sin embargo, en el MDS generado con el software TerraScan (por ejemplo en el píxel seleccionado) observamos cómo a pesar de que tenemos una medida original, TerraScan ha modificado significativamente el valor de altura de este píxel, pasando de 65.07 metros a 60.81

metros, lo que supone un error en altura de 4,26 metros. Por otro lado, nótese como este píxel está a una distancia de 3 metros en X y 4 metros en Y al borde real del edificio medido por el LiDAR, lo que supone que no se cumplen las especificaciones ni en altura ni en planimetría, a pesar de que los puntos LiDAR originales sí que tienen la precisión requerida. Este tipo de problemas con los bordes de los edificios y la vegetación aparecen a lo largo de todo el MDS de TerraScan, como podemos ver en esta resta entre los dos MDS. Se aprecian los errores que hemos comentado anteriormente tanto en la vegetación como en los bordes de los edificios, con un error de 2,05 metros de desviación estándar con máximos de hasta 46 metros.

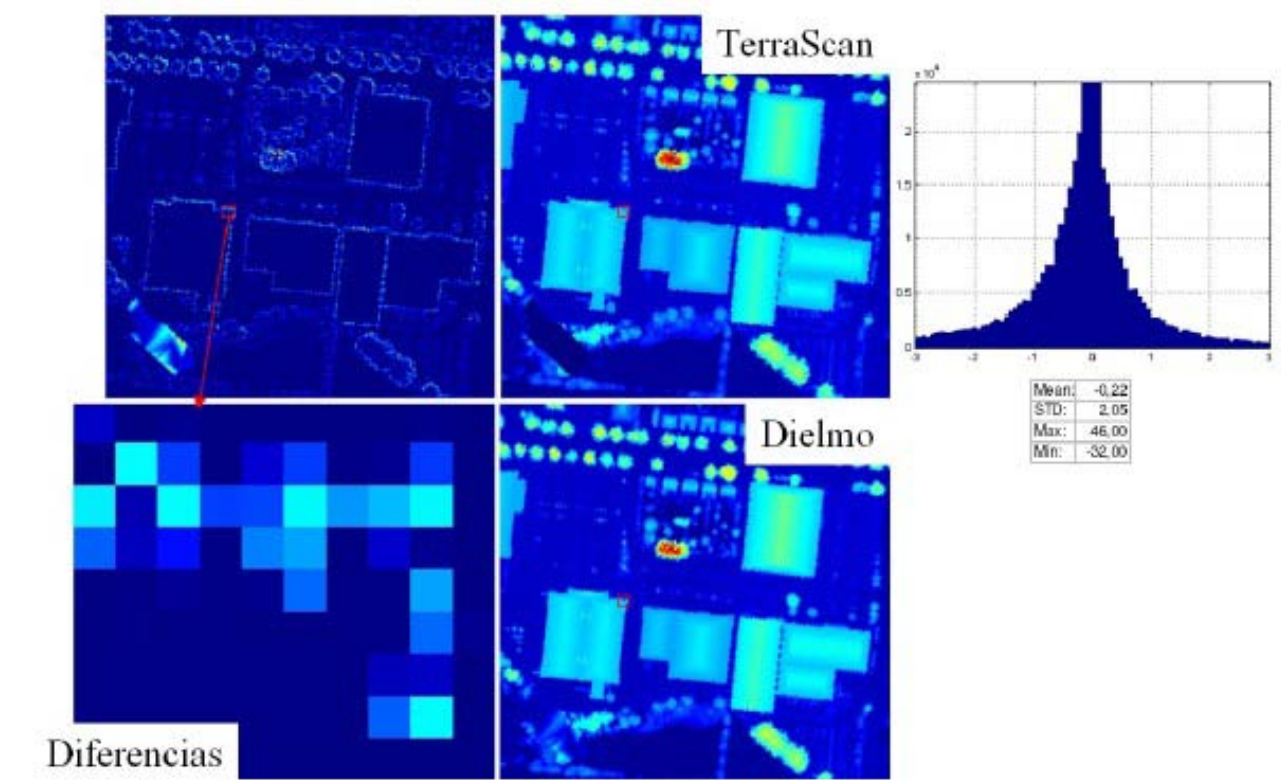


Figura 17.- Diferencias en bordes de edificios

Por último, veamos las diferencias en la generación del MDT:

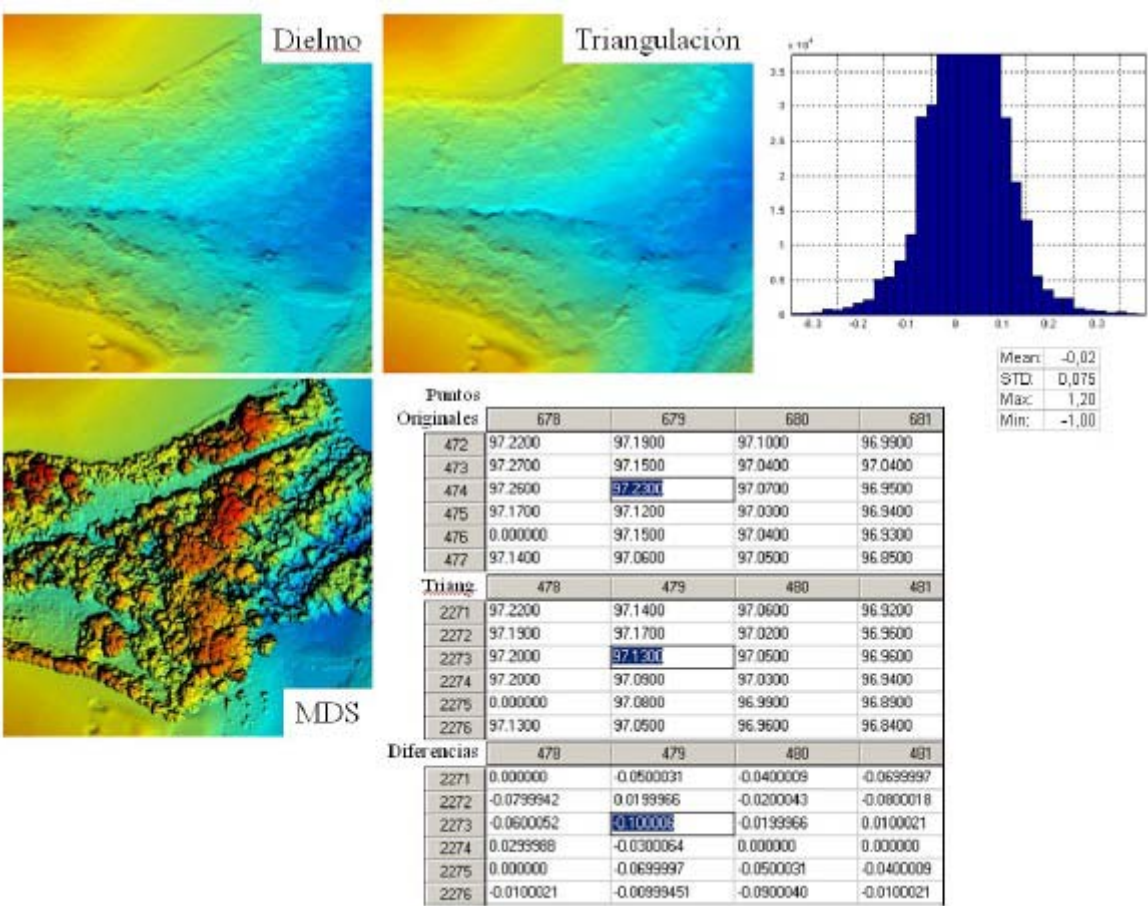


Figura 18.- Diferencias en la generación del MDT

En esta conflictiva zona forestal, vemos como en ambos casos se han eliminado los árboles y se aprecian las características topográficas del terreno debajo de la vegetación. A simple vista vemos pequeñas variaciones en el MDT pero no podemos decir que uno está mejor que el otro. Pero si comparamos los MDT generados por triangulación con los valores originales del último pulso (solamente para aquellos puntos clasificados como suelo), se aprecian diferencias importantes que llegan hasta 1 metro en altura, con una desviación estándar de 7,5 centímetros que aumentará en función de la topografía del terreno (si el MDT es muy plano como en este caso los errores son menores, pero cuando hay topografía más abrupta los errores aumentan). Estos errores se deben al método de interpolación basado en triangulación utilizado por TerraScan, y como ya hemos comentado antes, el software de DIELMO fija los valores originales de forma que el error en dichos puntos sea 0m por definición.

Antes hemos visto como al generar el MDS TerraScan tenía problemas a la hora de mantener los bordes de los edificios, apareciendo errores importantes (del orden de 3 y 4 metros) en horizontal. Este error se agrava a la hora de generar un MDT que se aplicará en un estudio hidráulico, cuando aparecen muros cercanos al río que interesa mantener en el MDT. Si los métodos de interpolación basados en triangulación no son capaces de mantener los bordes de los edificios, mucho menos lo son de mantener un muro de 30 – 50 centímetros de anchura. Sin embargo, DIELMO ha desarrollado una metodología para mantener de una forma adecuada los muros en el MDT sin necesidad de

realizar trabajo de campo, solamente a partir de los datos LiDAR. En la figura siguiente vemos un ejemplo del río Guadalfeo:

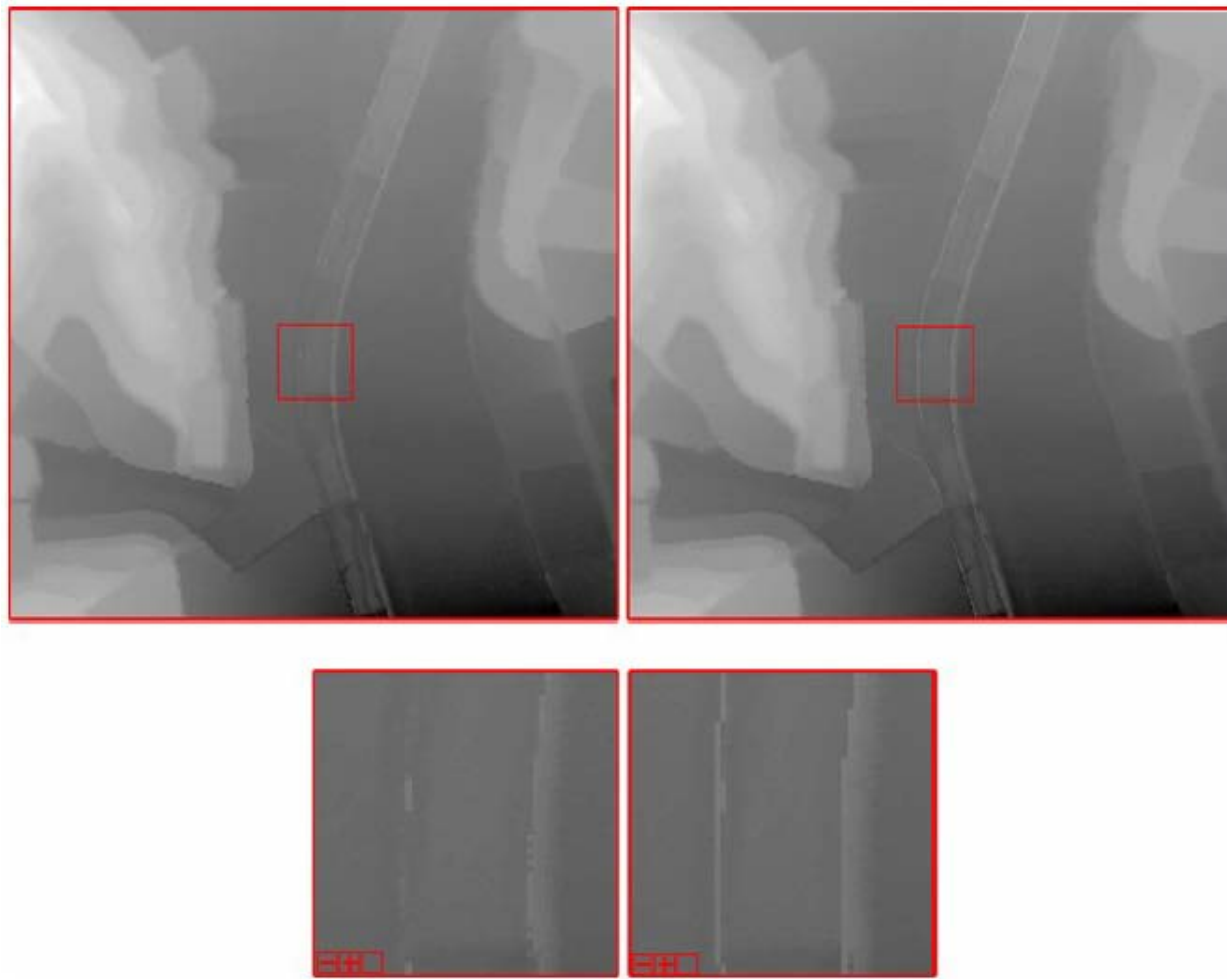


Figura 19.- Diferencias en la generación de muros

Por lo tanto, hay que destacar que no es importante solamente la precisión original del vuelo, sino que también lo es el cómo se procesen los datos para obtener la mayor precisión posible en los productos finales (MDS y MDT). DIELMO asegura que en los productos finales se almacena la altura exacta medida por el sensor, manteniendo la precisión para todos aquellos puntos para los que se dispone de una medida original, interpolando solamente aquellos puntos para los que no existen datos.

2.4. CONTROL DE CALIDAD DEL MDS

La generación del MDS está tan automatizada que en la gran mayoría de los casos el producto obtenido de forma automática siguiendo los pasos descritos anteriormente es perfectamente válido y no se hace necesaria ninguna edición.

Para asegurar la calidad del MDS, creamos un mosaico de toda la zona y se hace una inspección visual. Por otro lado, también se hace un mosaico de las máscaras que contienen la clasificación

automática de agua y se analizan para ver si hay alguna zona que se haya considerado como agua pero en realidad sea un hueco sin datos. En la figura siguiente vemos un ejemplo de este error:

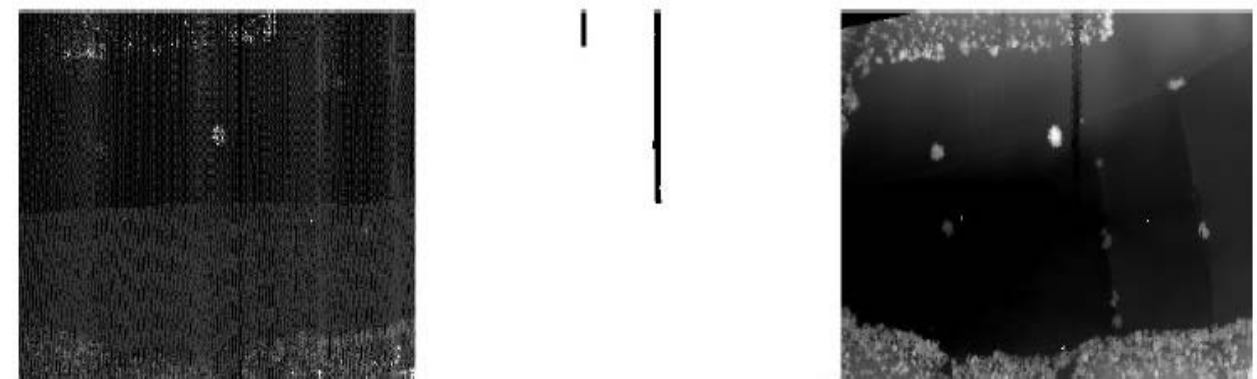


Figura 20.- Ejemplo del típico error de confusión entre puntos de agua y huecos sin datos

En el ejemplo anterior, la imagen de la izquierda contiene las alturas máximas, la imagen central la clasificación automática del agua y la imagen de la derecha el MDS resultante. Como vemos a la izquierda, debido seguramente a una turbulencia del avión, hay unas cuantas líneas del barrido donde no se han obtenido datos LiDAR, y esto se ha clasificado como un hueco sin datos, de forma que en el MDS aparece una zona plana donde no debería estar.

Esto ocurre en ocasiones cuando la densidad de puntos por metro cuadrado es muy baja (menos de 0.5 puntos/m^2), y no ha sido el caso de este proyecto LiDAR. En cualquier caso, se analiza el mosaico con la clasificación de zonas de agua en busca de estos posibles patrones. El problema se soluciona borrando de la clasificación de agua aquellas zonas que no lo son y volviendo a interpolar, de forma que en este caso los datos se interpolan de forma normal y no se asigna una cota constante a toda la superficie. Posteriormente, se cortaron en formato GeoTIFF divididas en seis partes.

2.5. GENERACIÓN DE LAS IMÁGENES DE INTENSIDADES

Al igual que en el caso del MDS, la generación de las imágenes de intensidades la tenemos tan automatizada que en la gran mayoría de los casos el producto obtenido de forma automática siguiendo los pasos descritos anteriormente es perfectamente válido y no se hace necesaria ninguna edición.

A la hora de interpolar estas imágenes también se utiliza la clasificación automática de agua, por lo que es posible que se vean afectadas por los mismos errores descritos en el punto anterior. En cualquier caso, la edición de las zonas de agua realizada para la depuración del MDS corrige de forma automática a las imágenes de intensidades, por lo que no se hace necesaria ningún control de calidad adicional a parte de la inspección visual del mosaico de las mismas.

Una vez validadas, las imágenes de intensidades se deben de convertir al formato GeoTIFF (8 bits). Para que todo el mosaico de las imágenes de intensidades tenga un aspecto homogéneo y no se noten cortes debido al ajuste del histograma, haremos un mosaico virtual de todas las imágenes de

intensidades, aplicando un ajuste del histograma que permita la correcta visualización de las intensidades en los ríos a estudiar. Posteriormente, se cortarán en formato GeoTIFF divididas en seis partes.

2.6. ANÁLISIS VISUAL DEL MDT AUTOMÁTICO, LOCALIZACIÓN DE PUENTES Y ERRORES

Siguiendo los pasos descritos anteriormente se ha generado un MDT automático con la altura de los puentes (dado que en las clasificaciones automáticas los puentes se clasifican como suelo). Para asegurar la calidad del MDT, en primer lugar crearemos un mosaico para toda la zona de estos productos: MDS, MDT, clasificación de suelo, imagen de alturas mínimas y resta de MDS-MDT.

Con todos estos productos enlazados en la misma pantalla (en un ordenador con doble monitor) y con el nivel de zoom adecuado para ver cualquier fallo en el MDT, un técnico especializado hace una inspección visual pormenorizada del 100% de la zona de estudio, marcando una capa vectorial de puntos las ubicaciones de los errores en el MDT encontrados, así como una descripción del error en la tabla asociada al fichero vectorial.

Al estar haciendo esta revisión del MDT directamente sobre los datos mosaicados, podemos apreciar la aparición de errores de interpolación en el cambio de un bloque al siguiente que pueden ser debidos a que la misma zona se ha clasificado de forma diferente en cada uno de los bloques. Estos fallos no se podrían detectar si la inspección visual se hiciera bloque a bloque en lugar de sobre el mosaico final.

Al mismo tiempo que se revisa la zona, también se marca en otra capa de puntos la ubicación de todos los puentes y viaductos para posteriormente definir las líneas de ruptura pertinentes.

Como vemos, la metodología de DIELMO es distinta a la del resto de proveedores de datos LiDAR: en lugar de realizar una supervisión manual de los ficheros LAS para corregir los fallos detectados y finalmente generar los productos finales, rasterizamos los datos, generamos los productos finales al principio, analizamos el 100% de los mismos y en las zonas donde encontramos algún error cambiamos la clasificación del LAS y en ese momento comprobamos que el fallo se ha corregido en el MDT.

2.7. EDICIÓN MANUAL DE LA CLASIFICACIÓN DE SUELO

Una vez sacado en el punto anterior un listado de errores en el MDT, el siguiente paso consiste en ir a cada una de las coordenadas marcadas y hacer una edición manual de la clasificación de suelo para corregir el fallo.

Además, cada vez que cambiamos la clasificación de suelo en el fichero LAS, volvemos a interpolar el MDT para comprobar que efectivamente se ha corregido el error, de forma que nos aseguramos de la calidad del producto final.

Una vez corregidos todos los fallos del MDT, el producto queda listo a falta de aplicar la edición de los puentes (después de editar las líneas de ruptura).

2.8. DEFINICIÓN MANUAL DE LAS LÍNEAS DE RUPTURA DE LOS PUENTES

Una vez sacado el listado de puentes y viaductos que faltan por definir, el siguiente paso consiste en ir a cada una de las coordenadas marcadas como puente y definir las líneas de ruptura pertinentes para posteriormente aplicar los algoritmos descritos en apartados posteriores para la generación de los modelos finales con o sin puentes.

2.9. VECTORIZACIÓN MANUAL DEL 100% DE LOS EDIFICIOS

Para hacer una buena clasificación de edificios a partir de los datos LiDAR, tardamos menos sectorizando de forma manual todos los edificios (partiendo de una capa vectorial de edificios preexistente) que intentando corregir las clasificaciones automáticas de edificios.

Para llevar a cabo este trabajo, apoyándonos en las ortofotos disponibles y sobre todo en los ficheros LAS, se vectorizan de forma manual los edificios.

Posteriormente, al mismo tiempo que se hace la revisión de los edificios presentes en la zona de estudio. El resultado final es una capa de polígonos con las delimitaciones de los edificios.

2.10. CORRECCIÓN DEL MDT EN LOS CAUCES

En ocasiones, debido a la presencia de agua o vegetación en el cauce del río, a pesar de que la adquisición de los datos sea correcta y de que se haya hecho un buen control de calidad en el procesado de los datos, el modelo digital del terreno generado con tecnología LiDAR presenta algunos errores en el cauce del río que cortan el camino del agua y dan problemas a la hora de realizar un estudio hidráulico.

Esto es un problema generalizado independientemente del software de procesado que se utilice que nosotros tratábamos de minimizar con un buen control de calidad dentro del cauce, pero todavía seguían apareciendo zonas donde se cerraba el cauce que no se podían corregir.

Para solucionar este problema, desarrollamos una nueva metodología que permite solucionar el problema de una forma adecuada, lo que permite realizar los estudios hidráulicos de una forma más rápida y precisa. A continuación vemos un ejemplo de este problema antes y después de corregirlo con nuestra nueva metodología.

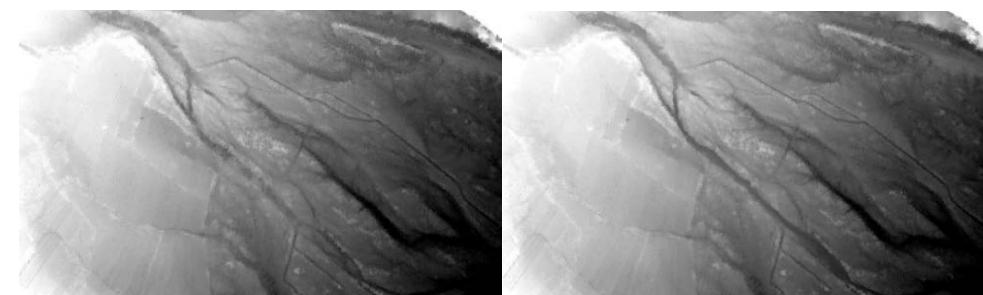


Figura 21.- MDT antes (izquierda) y después (derecha) de la corrección del cauce

En las figuras se aprecia claramente como antes de la corrección, el cauce se cerraba debido a un problema de interpolación de los puntos que quedan como suelo después de eliminar la vegetación, y como posteriormente conseguimos abrir el cauce asignando las cotas adecuadas en función de la información que nos aportan los perfiles transversales.

Esta metodología consiste en vectorizar un polígono con la anchura de los ríos a corregir de forma manual (para ello utilizamos los datos LiDAR y ortofotos). Posteriormente, utilizamos nuestro software para calcular de forma automática secciones transversales del río cada 1 metro. A continuación, debido a la existencia de puntos donde se cierra el cauce natural del río, por la presencia de agua o vegetación, a partir de la obtención de puntos mínimos en la zona del cauce y la interpolación de estos, se consigue generar un cauce limpio, de forma que al realizar el estudio hidráulico el agua siempre corra aguas abajo. Se utilizan tantos puntos (o secciones longitudinales) como ancho es el río. El MDT corregido es más realista y no dará problemas de que se cierre el cauce o se salga el agua.

2.11. GENERACIÓN DEL MDT DEFINITIVO

Para la generación de la versión definitiva del MDT, partimos de las correcciones de la clasificación de suelo realizadas, pero recordemos que este MDT tenía la altura de los puentes porque éstos aparecen clasificados como suelo en las clasificaciones automáticas. Por tanto, tendremos que usar las líneas de ruptura de los puentes y viaductos obtenidas y validadas para eliminarlos del MDT.

En primer lugar, tenemos un algoritmo automático que a partir del MDT con puentes disponible en cada bloque y de la capa de polígonos con las líneas de ruptura de los puentes que se han marcado para eliminar, se genera de forma automática una nueva versión del MDT con los puentes eliminados, que se corresponde con el producto MDT.

Este algoritmo automático de eliminación de puentes del MDT no se trata solamente de eliminar los puntos que caen dentro del puente, sino que hace una búsqueda de los posibles puntos con la cota del puente pero que puedan estar en las cercanías del polígono dibujado y que también se deben de eliminar. Por otro lado, si interpolamos directamente los puntos que hemos borrado, tendremos problemas con la calidad del MDT obtenido porque también se expandirán las alturas de la parte alta del puente hacia la zona que hemos borrado. Para evitar este problema, a partir de los polígonos de las líneas de ruptura definidos previamente, definimos en formato raster una especie de líneas de ruptura, que van desde los puntos rojos hasta los azules (como podemos ver en la imagen de arriba). Estos puntos se seleccionan de forma inteligente, asegurándonos que pertenecen al punto más bajo de su entorno y que están colocados en un punto clasificado como suelo. Finalmente generamos el MDT final con nuestro exclusivo método de interpolación, evitando que las alturas de la parte alta del puente se introduzcan en la zona que hemos eliminado.

Está claro que de forma automática es imposible que todos los puentes queden bien interpolados, por lo que se hace una supervisión del 100% de los puntos marcados como puentes y se editan de forma manual en el caso de que no se hayan eliminado correctamente.

Por último, a este MDT también le integraremos la corrección de los cauces descrita anteriormente.



Figura 22.- Eliminación de puentes

3. PRODUCTOS ENTREGABLES

Para cada una de las zonas de estudio, en su correspondiente carpeta se incluyen los siguientes productos:

- Imágenes de intensidades (8 bits) en formato GeoTIFF con 1 m de resolución.
- Todos los productos descritos anteriormente (MDT sin puentes, MDS, MDT sin puentes y con edificios, MDT con puentes y MDT con puentes y con edificios) en formato de texto ASCII con paso de malla de 1m x 1m. Se trata de un fichero de texto que lo importan casi todos los software SIG. La estructura del fichero consiste en una cabecera donde se indica el tamaño del fichero, las coordenadas de la esquina inferior izquierda y el valor considerado como no dato, y a continuación los datos ordenados por filas y separados por un espacio. A continuación se muestra un ejemplo de este tipo de fichero.

```
NCOLS      1000
NROWS      1000
XLLCENTER  720000.000
YLLCENTER  4379001.000
CELLSIZE   1.000
NODATA_VALUE -9999.000
85.300 85.092 85.088 85.099 85.177...
```

- Curvas de nivel a 0.5 metros.
- Fichero vectorial con la delimitación de las clasificaciones de edificios y de puentes en formato shape de Esri.
- Fichero vectorial con las carreteras y toponimia de la zona en formato shape de Esri.
- Informe procesado de datos Lidar

Toda la información se entrega en formato digital en el siguiente DVD:



Por último, para terminar este anejo, se muestran las siguientes páginas se muestran algunos ejemplos de los principales productos obtenidos y entregados.



Figura 23.- Imagen de Intensidades del primer pulso

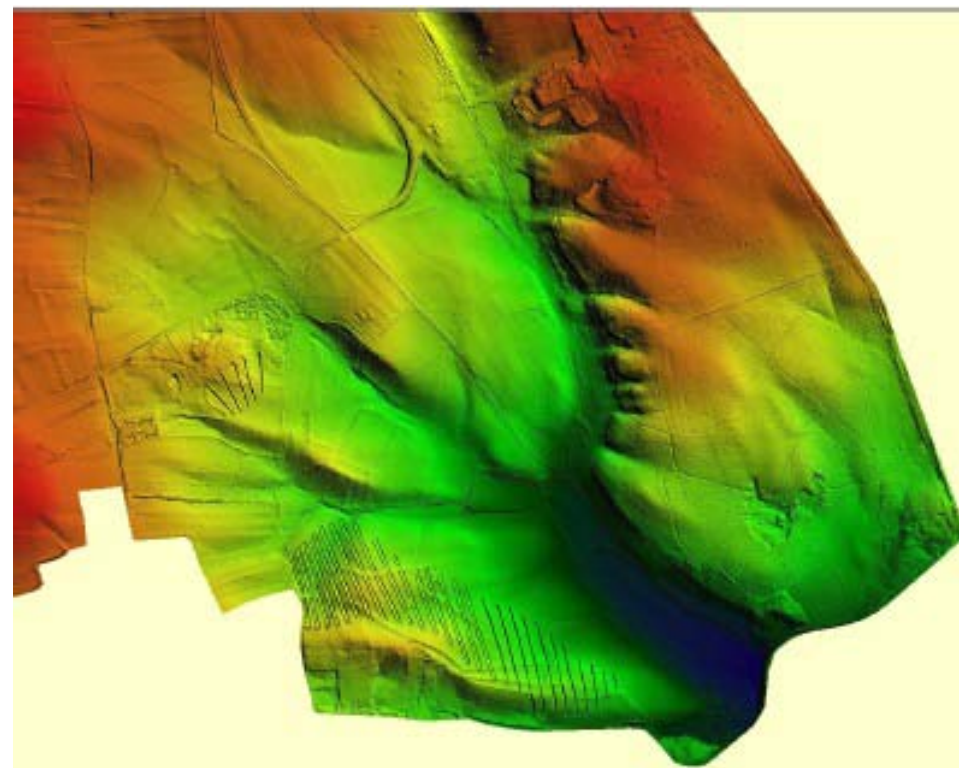


Figura 25.- Modelo Digital del Terreno



Figura 24.- Imagen de Intensidades del último pulso

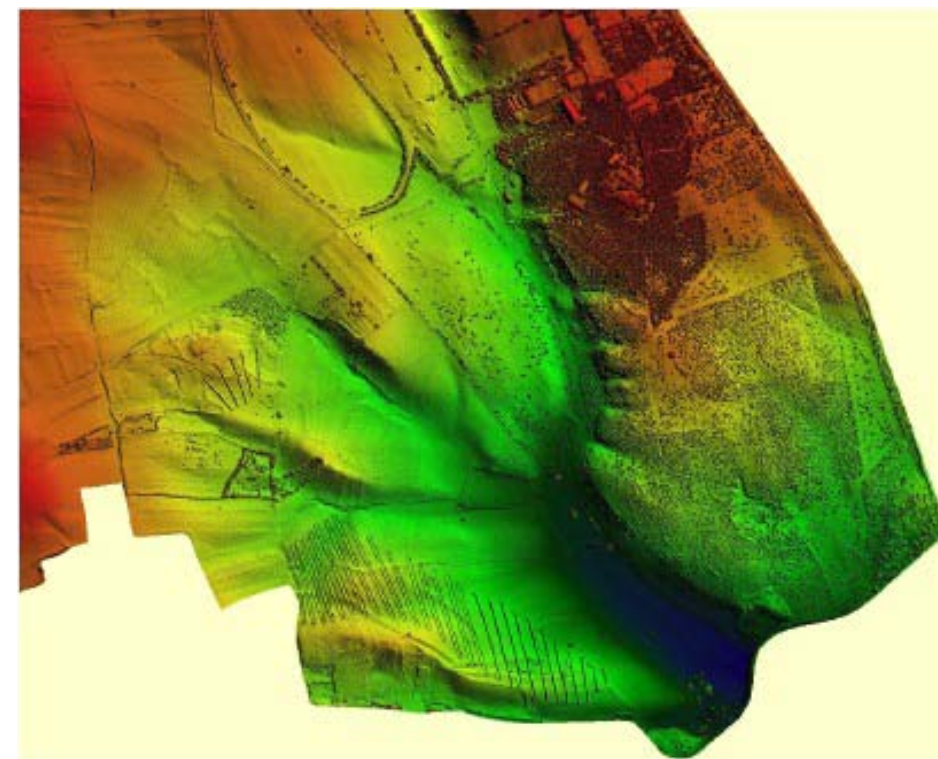


Figura 26.- Modelo Digital del de Superficies