

PROPUESTA DE METODOLOGÍA DE TRABAJO PARA LA OBTENCIÓN DE CARTOGRAFÍA A PARTIR DE DATOS LIDAR REGISTRADOS EN UNA ZONA RÚSTICA

JOSÉ JUAN ARRANZ JUSTEL

Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S.I. en Topografía, Geodesia y Cartografía

Email: josejuan.arranz@upm.es

ANA BELÉN VIGARA JEREZ

Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S.I. en Topografía, Geodesia y Cartografía

Email: ab.vj@hotmail.com

Resumen: Tras la llegada de la medición mediante LiDAR, la obtención de cartografía se ha visto facilitada, obteniendo modelos digitales con gran rapidez y precisión. No obstante, para poder tratar la gran cantidad de información registrada, se necesita emplear un conjunto de algoritmos que permita extraer los detalles importantes y necesarios de la zona registrada. Por ello, se presenta este trabajo donde se expondrá una metodología de actuación para obtener cartografía a escala 1/1000 de una zona rústica, basada en el cálculo de mapas de curvas de nivel y ortofotografías, generadas a partir de los MDT y MDS de la zona. Todas las pruebas se han realizado mediante el software MDTopX.

Palabras claves: LiDAR, MDT, MDS, metodología, cartografía.

Abstract: After the arrival of the LiDAR measurement, mapping has been facilitated, obtaining digital models very quickly and accurately. However, in order to manage the great amount of recorded information, a set of algorithms is required which allows the extracting of important and necessary details of the recorded area. Therefore, a methodology is presented for mapping at 1/1000 scale of a rural area, based on contour maps and orthophotos, generated from the DTM and DSM of the area. All tests were performed using MDTopX software.

Key words: LiDAR, MDT, MDS, methodology, cartography.

necesario disponer de las herramientas adecuadas que permitan tratar cantidades ingentes de información. Estas herramientas deberán estar basadas en algoritmos que permitan extraer las características del terreno utilizando las medidas realizadas por el LiDAR (posición, intensidad, eco e incluso color registrado), así como poder visualizar los datos para la toma de decisiones y control de resultados. Entre las operaciones más habituales se encuentra el filtrado de información redundante, eliminación de posibles errores en la medida, tratamiento de zonas con solape o la clasificación de puntos según el objeto medido (suelo, vegetación, edificación, agua, etc.).

Debido a la componente de novedad y la diversidad en los algoritmos disponibles en el mercado, no se ha definido una metodología clara y concisa que permita tratar un conjunto de datos y obtener unos resultados satisfactorios.

Por ello, se presenta este artículo donde se han realizado múltiples pruebas sobre un conjunto de datos LiDAR de una zona rústica para obtener cartografía a escala 1/1000. Tras las pruebas realizadas, se ha establecido una metodología de trabajo que permite extraer la información adecuada para realizar mapas de curvas de nivel con equidistancia de un metro y calcular las ortofotografías de la zona, a partir del modelo digital del terreno (MDT) y el modelo digital de superficies (MDS) previamente calculados. Para ello, se han utilizado las herramientas disponibles en el software MDTopX [MDT12], específico para el tratamiento de datos de esta naturaleza.

Por último, se presentarán los parámetros idóneos a utilizar así como las precisiones alcanzadas, comparando con los resultados obtenidos mediante restitución fotogramétrica y control dimensional en campo mediante GPS en tiempo real.

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología LiDAR, de reciente llegada, permite recoger información geométrica utilizando medidas realizadas con un láser de barrido, pudiendo ser éste aerotransportado. Con ella, se ha facilitado la obtención de cartografía, pudiendo disponer de modelos digitales con gran rapidez y precisión. A partir de estos modelos, se podrán obtener mapas derivados como curvados u ortofotografías, de forma objetiva y prácticamente automática.

Sin embargo, para la obtención de un conjunto de datos preciso y exento de errores es

2. ESTADO DEL ARTE

En nuestra sociedad, cada vez existe una mayor necesidad de obtención de cartografía con precisión. Se exige alta calidad a un precio económico cada vez más reducido. Hasta ahora se disponían de varias opciones para la obtención de cartografía, como técnicas GPS, técnicas topográficas tradicionales, técnicas fotogramétricas o técnicas satelitarias. A día de hoy, se puede contar con una técnica nueva más, la tecnología LiDAR (*Light Detection And Ranging*), con la que se consigue alta calidad con costes menores. Según Ibañez [IBA08], los sensores LiDAR pueden ser terrestres o aerotransportados, y se basan en la obtención de las distancias existentes entre un sensor láser y un objeto, empleando para ello ondas electromagnéticas. Conociendo la posición del láser en el momento de la toma de datos, se podrán calcular las coordenadas precisas de miles de puntos en poco tiempo. La densidad de puntos que se obtiene con esta tecnología es increíblemente alta. Por ejemplo, para obtener cartografía a escala 1/1000 la densidad de puntos puede ser de 0,8 puntos/m².

2.1. Ámbito de utilización

La tecnología LiDAR es válida para muchos proyectos distintos y de diferentes índoles. Ha sido muy bien acogida en el ámbito forestal, ya que ayuda en el cálculo de biomasa, el cálculo de altura de árboles o la identificación de especies. En urbanismo es de gran ayuda para la actualización catastral, por ejemplo, ya que permite obtener información sobre nuevas edificaciones, piscinas, construcciones no registradas o cambios volumétricos en muy poco tiempo. Gracias a que los cables de tendidos eléctricos son buenos reflectores del láser, a pesar de ser tan finos, el LiDAR es fundamental a la hora de la definición de líneas eléctricas, como muestra la Figura 1. En el ámbito de la Topografía es destacable el papel que juega en la cartografía de túneles, generando modelos digitales muy completos, prácticamente in situ. Nunca antes se habían conseguido unos modelos digitales tan completos y en tan poco tiempo como se consiguen con esta metodología.

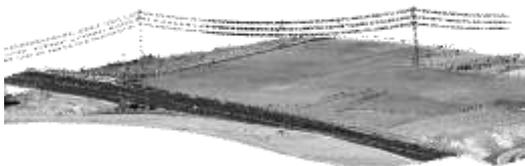


Figura 1: Puntos obtenidos con información LiDAR de una línea eléctrica. Procedencia propia.

También es importante destacar su aportación a la cartografía batimétrica, ya que permite obtener datos sin que exista un cambio de metodología entre la costa y el agua. La cartografía batimétrica se venía haciendo con la técnica SONAR, con el equipo transportado en un barco, lo que hace que sea imposible obtener datos en zonas de escasa profundidad a las que el barco no tenga acceso. Sin embargo, con LiDAR se recoge toda esta información, ya sea por debajo del mar o terrestre.

En el ámbito de la arquitectura, también se muestra interés por esta tecnología. Se consiguen unos modelos digitales de edificios muy completos, como muestra la Figura 2. En edificios con gran ornamentación es difícil generar estos modelos digitales con técnicas tradicionales, y la técnica LiDAR presenta una solución a este problema.



Figura 2: Puntos medidos sobre fachada arquitectónica. Procedencia propia.

La metodología LiDAR también supone un avance para la obtención de cartografía de grandes extensiones, que hasta ahora se venía obteniendo con fotogrametría clásica. Se pueden conseguir modelos digitales más completos en menos tiempo que con la fotogrametría clásica, e incluso con valores más precisos. En zonas totalmente heterogéneas, como en la nieve o en desiertos, siempre ha sido complicado obtener cartografía; sin embargo, con LiDAR no se tiene mayor complejidad que en cualquier otra zona.

Existe diversa bibliografía para profundizar en las generalidades de la técnica láser de barrido y sus utilidades. Alguna de ella podría ser la publicada en [SHA09] y [VOS10].

2.2. Descripción de la técnica

El sistema de recogida LiDAR consiste en que el láser realiza medidas mediante un movimiento de barrido, registrando todos los objetos que se encuentra, obteniendo así una nube de puntos precisos. En el caso de LiDAR aerotransportado el láser recoge, además del

suelo, cualquier otro elemento que se encuentre en la superficie, como árboles, edificios, cables, etc. Para poder generar cartografía mediante este sistema, se necesitará realizar un filtrado, consistente en diferenciar los puntos de la nube según al objeto que pertenezcan. Además de las coordenadas de los puntos, en la recogida de datos se grabarán los ecos o retornos del rayo, los valores de intensidad de los puntos y los ángulos con los que fueron recogidos.

Según Fowler [FOW01], el eco es el nombre que reciben los distintos retornos del láser. El láser es capaz de obtener varios retornos; esto se consigue cuando parte de un rayo que ha chocado con un objeto sigue viajando hasta encontrarse con el siguiente objeto, obteniéndose así, a partir de un solo impulso láser, varios retornos, como se muestra en la Figura 3.

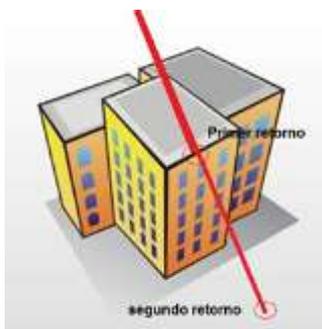


Figura 3: Ecos en LiDAR: El rayo no impacta completamente en la azotea del edificio, por lo que parte rebota y otra parte sigue viajando hasta encontrar el siguiente objeto, en este caso, el suelo. Procedencia propia.

La intensidad es la cantidad de energía reflejada por la superficie de los objetos. Cada objeto que se encuentra en la superficie reflejará distintos valores de intensidad. Así los objetos con alta reflectancia, como un techo de metal, mostrarán una energía superior que otros, como una carretera recién asfaltada o la vegetación. En la Figura 4, se puede apreciar una carretera de dos calzadas representada por puntos con un valor de intensidad muy bajo. Alrededor se puede apreciar terreno sin cultivar con valores de intensidad altos y ciertas manchas de intensidad menor que provienen de la vegetación de la zona. En la parte superior izquierda aparecen dos finas líneas correspondientes a líneas eléctricas.



Figura 4: Fichero de datos LiDAR representado utilizando la Intensidad registrada. Procedencia propia.

La gran cantidad de puntos registrados hace que su almacenamiento sea complicado. El formato que se utiliza para estos datos es el LAS, que se trata de un archivo binario que permite ahorrar espacio de almacenamiento. Este formato es capaz de almacenar, además de la posición geométrica de la nube de puntos, otras características registradas, como ecos, ángulos, intensidades o color. Los programas que manejan datos LiDAR soportan este formato para operaciones de entrada y salida de datos.

3. PROPUESTA DE METODOLOGÍA

Como se ha comentado anteriormente, para explotar la información LiDAR es preciso realizar una edición consistente en clasificar los puntos en función de la naturaleza del objeto sobre el que fue medido. Este proceso de clasificación o segmentación de la información se realiza mediante algoritmos en forma de filtros.

Existe una amplia variedad de tipos de filtros diferentes para la clasificación de puntos LiDAR, que según el orden en que sean empleados obtendrán mejores o peores resultados. No existe aún un algoritmo que consiga clasificar todos los puntos de la nube de datos LiDAR, pero utilizando varios de ellos se consigue clasificar los puntos de una forma bastante rápida y eficaz. Después de realizar varias pruebas con diferentes filtros y la aplicación de los mismos en distintos órdenes, se consiguió una metodología de trabajo para el filtrado de puntos de una zona rústica para obtener los modelos digitales a escala 1/1000, utilizando para ello el software MDTopX. Puede que utilizar esta misma metodología para zonas que no sean rústicas o con diferente escala, no tenga la misma eficacia.

Lo primero que se encuentra al abrir un archivo con datos LiDAR son millones de puntos. Según la calidad que se quiera para el trabajo, puede que no sean necesarios tantos

puntos, de manera que se debe valorar la opción de poder reducir la cantidad de puntos. La disminución de puntos se haría de una forma regular, definiendo la cantidad de puntos que se quiere por metro cuadrado. Hay que tener en cuenta que al reducir esa cantidad de puntos, los modelos digitales obtenidos serán menos precisos. Por tanto, esta reducción de información dependerá del uso que se dé posteriormente al modelo digital y de las características de terreno cartografiado.

Una vez que se tienen los puntos que se desean clasificar, se puede empezar el proceso de filtrado. Independientemente del tipo de terreno registrado, el primer filtro podría ser según eco. Los primeros ecos de aquellos rayos que hayan seguido viajando por el espacio, corresponderá con las copas de los árboles, los tejados de los edificios, cables y posibles puntos erróneos. De esta manera, se pueden clasificar o eliminar fácilmente. Este filtrado es rápido, pero no filtra muchos puntos, ya que normalmente no se producen tantos “primeros ecos”.

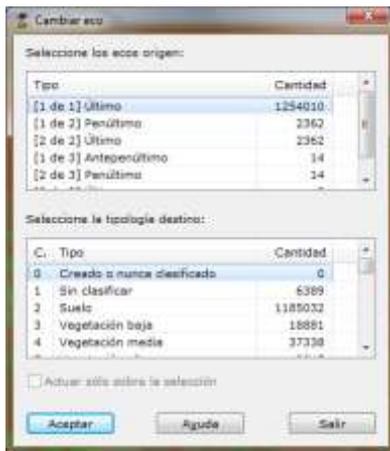


Figura 5: Selección de puntos en función del eco en MDTopX.

El siguiente paso sería filtrar según valores de intensidad. Este tipo de filtrado es muy útil cuando se están clasificando puntos en zonas rústicas ya que, básicamente, contienen vegetación y suelo, y ambos tienen valores de intensidad muy diferentes. MDTopX crea un histograma de frecuencias de los valores de intensidad que encuentra en la nube de puntos. Por lo tanto, para clasificar, por ejemplo, la vegetación, sólo se tiene que indicar el intervalo de valores de intensidad de la vegetación para clasificarla como tal. Este filtrado por intensidad es muy eficaz, ya que en muy poco tiempo (segundos) se clasifica una gran cantidad de puntos en una zona rústica.

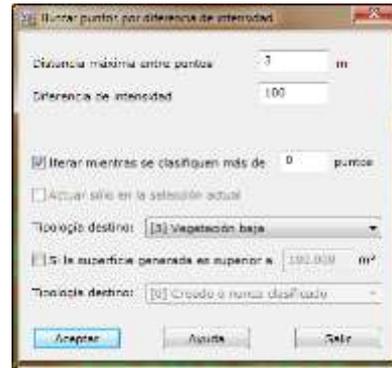


Figura 6: Selección de puntos en función de la diferencia de intensidad en MDTopX.

Existe otra herramienta en este programa que clasifica los puntos uniendo dos variables, la intensidad y la geometría de los puntos. Con el valor de la intensidad de un punto y su posición respecto de otros puntos cercanos a él, se clasifica según lo que el usuario indique.

Por otro lado, se debe conocer si el archivo recoge una sola pasada de datos LiDAR del avión o, en cambio, recoge varias. En el caso de que existieran varias pasadas, este programa propone una opción que consiste en el promedio de las mismas, creando una rejilla con la media ponderada de las cotas encontradas. La Figura 7 muestra datos LiDAR pertenecientes a dos pasadas con un determinado solape.

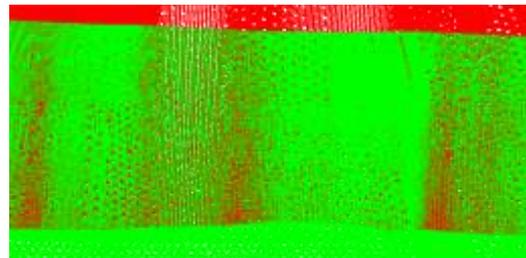


Figura 7: Solape entre pasadas LiDAR. Una pasada de color verde y otra de color rojo. Procedencia propia.

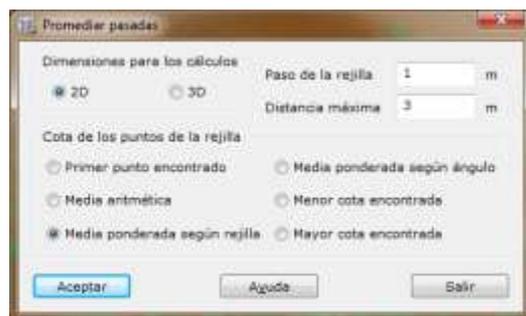


Figura 8: Promedio de pasadas LiDAR en MDTopX.

Este proceso de promediado entre pasadas es importante ya que, de no hacerse, podría provocar errores en la determinación de objetos registrados. No hay que olvidar que los puntos tienen una determinada precisión en su posición geométrica, por lo que puntos de la misma zona registrados desde pasadas diferentes no tendrán exactamente las mismas coordenadas produciendo un ruido en el MDT no deseado, como se muestra en la Figura 9. Este ruido del MDT, se reflejará en los datos extraídos de él, como puede ser el curvado de la Figura 10.



Figura 9: Modelo digital calculado con puntos de dos pasadas diferentes. En la parte inferior, sólo hay puntos de una pasada y los triángulos tienen aproximadamente la misma inclinación. En la parte superior, concurren puntos de dos pasadas diferentes y los triángulos generados tienen pendientes muy diferentes. Procedencia propia.



Figura 10: Curvado de una zona entre dos pasadas. En la parte superior se puede observar el ruido introducido por los puntos con pequeñas diferencias. La parte sur corresponde a puntos de una sola pasada. Procedencia propia.

La siguiente herramienta a utilizar en MDTopX sería “buscar puntos según línea de vuelo”, que clasifica los puntos según sus propiedades geométricas comparadas con los puntos registrados antes y después en el momento de la toma. Habrá que definir la distancia máxima entre puntos a analizar como un valor no muy elevado, porque ello provocaría que se consideraran puntos muy alejados del punto a evaluar; pero si se indica un valor demasiado escaso no podrá relacionar el punto con ningún otro. Esto tendrá mucho que

ver con la orografía de la zona, que debe ser analizada en cada caso.



Figura 11: Selección de puntos en MDTopX según su posición en el momento del registro.

Una herramienta más en el proceso es “buscar puntos elevados”, que buscará y clasificará los puntos LiDAR también en función de las propiedades geométricas que tiene el punto en cuestión con respecto a un entorno definido. Para establecer ese entorno, utiliza la generación de un TIN (*Triangulated Irregular Network*) mediante el algoritmo de la triangulación de Delaunay.

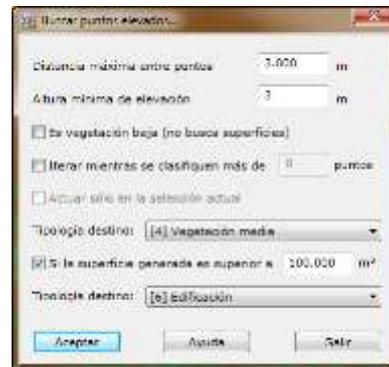


Figura 12: Selección de puntos en MDTopX según se relación geométrica con el entorno.

La siguiente herramienta es “buscar puntos aéreos”. En principio, esta herramienta estaba pensada para buscar y clasificar los puntos que tienen una cota mucho más elevada que los puntos de su entorno. Busca aquellos puntos cuya cota sea superior a la media del conjunto de los puntos que haya encontrado en un cierto entorno que se haya definido. Para buscarlos utiliza la desviación típica, seleccionando aquellos puntos que sobrepasen las veces que se haya definido la desviación típica. Pero si se amplía el radio de búsqueda y se reducen las veces que debe sobrepasar la desviación típica, esta herramienta es muy eficaz para clasificar

puntos de vegetación baja difícil de filtrar con otras herramientas.

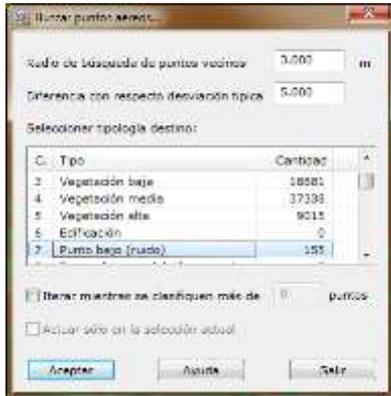


Figura 13: Selección de los puntos aéreos en MDTOPX.

Finalmente se pueden filtrar los puntos manualmente, seleccionando sólo parte de la nube, de manera que se pueda visualizar desde distintas perspectivas para detectar el punto sin clasificar. Para detectar dónde se encuentran estos puntos aún sin clasificar, se puede obtener un modelo digital del terreno o un curvado del terreno, en los que se detectan fácilmente.

En el proceso de edición manual, también se podría seleccionar el modo por perfiles, de tal manera que se muestre un perfil de una determinada zona del terreno y se vaya moviendo ese perfil hacia adelante o hacia atrás, mostrando los puntos que atraviesa y cambiando su clasificación de manera sencilla.

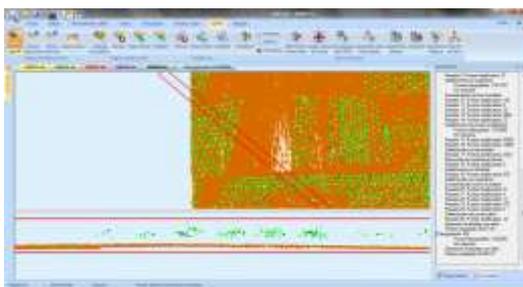


Figura 14: Vista de la edición de la nube de puntos mediante perfiles en MDTOPX.

Después de utilizar todos estos filtros, se tendrá una nube de puntos LiDAR de coordenadas precisas ya clasificada. Con ella se podrán realizar distintos modelos digitales, curvados, ortoimágenes o extracción de líneas de cambios de pendiente. En cuanto a los modelos digitales, podrán ser modelos digitales del terreno (MDT) seleccionando sólo puntos

con clasificación “suelo” o modelos digitales de superficie (MDS) incluyendo además puntos con clasificación “edificación” o “vegetación”.

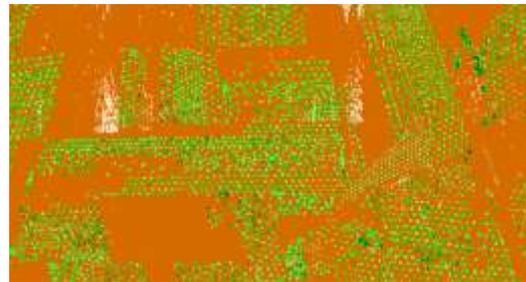


Figura 15: Resultado de uno de los archivos después de aplicarle el procedimiento de clasificación. Se puede observar en color verde la vegetación clasificada. El resto de puntos es clasificado como suelo.

Las coordenadas de los puntos LiDAR están referidas al elipsoide WSG84; por lo tanto, si se quiere tener en otro sistema habrá que cambiarlas mediante una transformación. Esta transformación podrá ser mediante el conocimiento de los parámetros y el tipo de transformación (tridimensional o bidimensional, con centro de masas o sin él, etc.) o mediante los valores extraídos de la rejilla NTV2 proporcionada por el IGN para transformaciones entre ETRS-89 y ED-50.



Figura 16: Transformación de las coordenadas de los puntos LiDAR entre sistemas de referencia.

Por otro lado, las altitudes registradas por el sensor serán elipsoidales por lo que habrá que transformarlas a ortométricas, restándoles la ondulación del geode en cada punto. Este proceso puede ser llevado a cabo utilizando un modelo del geode sobre la nube de puntos.

Como resultado del empleo de todas estas herramientas, en la Figura 17 se muestra el organigrama de trabajo con la metodología propuesta.

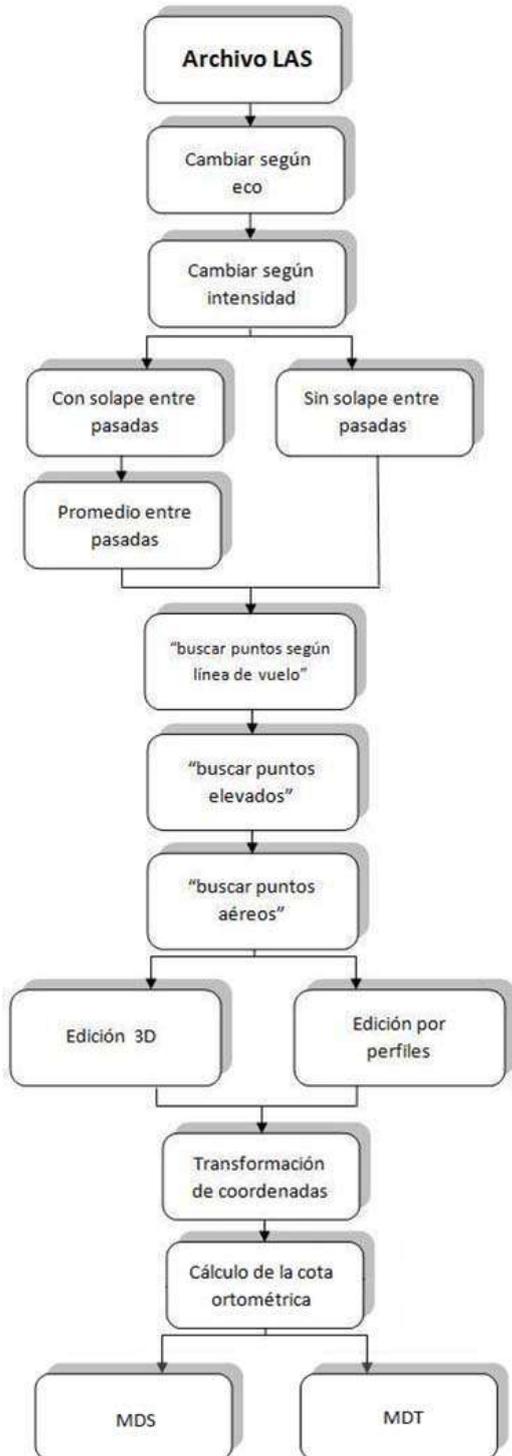


Figura 17: Organigrama de la metodología de edición propuesta. Procedencia propia.

4. ZONA DE ESTUDIO

Para este estudio se contó con un vuelo realizado sobre el municipio de Villarejo de Salvanés, situado en la zona sureste de la Comunidad de Madrid.

Se trataba de un vuelo combinado, con cámara digital y LiDAR. La altura de vuelo fue de 1.000 m y ocupaba una extensión de 1.454 Has. Se utilizó una cámara digital Intergraph Z/I Imaging DMC con un GSD de 0.10 m y un sensor LiDAR Leica ALS60X. La precisión aproximada de los puntos obtenidos fue de 15 cm, encontrándose aproximadamente un punto por cada 1,25 m². El avión realizó tres pasadas, creando así un solape entre ellas.



Figura 18: Esquema con las pasadas y los fotogramas realizados. Procedencia propia.



Figura 19: Gráfico de vuelo. Procedencia propia.

La zona era rústica, con terreno ondulado. Los objetos que se encontraron fueron pequeñas casas, líneas de alta tensión, caminos, carreteras y numerosas áreas de diferentes cultivos arbóreos. Entre estos cultivos se encontraron almendros, olivos y vides de distintos tamaños. Las pocas casas existentes no tienen más de dos plantas y sus tejados, mayoritariamente, son a dos aguas. Los caminos son de tierra definidos por pequeños montículos o surcos.

Como se ha comentado, se ha utilizado el software MDTopX con el módulo de

tratamiento de datos láser, sobre un ordenador de sobremesa Pentium de 32 bits y 4 Gb de RAM. Este ordenador ha sido suficiente para el procesado de los archivos cuyo tamaño máximo era de 30 Mb con un millón de puntos.

5. RESULTADOS

En todo este proceso de filtrado de puntos y en la generación de los modelos digitales, las coordenadas de los puntos no han sido modificadas. Son las mismas que cuando han sido tomadas, por lo tanto, la precisión se mantiene inalterada.

Las precisiones a priori de los puntos LiDAR de un vuelo para realizar cartografía a escala 1/1000 son de 10 cm en altimetría y de 15 cm en planimetría.

Para analizar la precisión real obtenida, se realizó un control de calidad en campo sobre los datos registrados. Para poder referenciar los datos obtenidos mediante fotogrametría clásica, LiDAR y GPS, se registraron los bordes de los caminos, ya que son identificables mediante todas estas técnicas. Se registraron casi ocho mil puntos GPS utilizando medición RTK, lo que garantizaría una precisión menor de 5 cm.



Figura 20: Distribución de los puntos medidos con GPS (color rojo) sobre las pasadas (color negro) y la ortofoto de la zona. Procedencia propia.

En altimetría, se proyectaron puntos obtenidos mediante GPS en RTK sobre un modelo digital obtenido a través de información LiDAR. El resultado fue una diferencia media de $19 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$, un valor tolerable para cartografía a escala 1/1000, que requiere precisiones de 25 cm en la altimetría de los puntos. Los resultados pueden analizarse en la Tabla 1.

Tabla 1: Comparaciones entre puntos GPS y LiDAR. Los valores están dados en metros.

	Media	Desviación típica	Valor máximo	Puntos comparados
LAS 3	0,16	0,04	0,25	475
LAS 4	0,14	0,04	0,28	307
LAS 5	0,16	0,05	0,38	581
LAS 10	0,22	0,06	0,39	270
LAS 11	0,19	0,06	0,41	1342
LAS 12	0,16	0,04	0,31	1460
LAS 13	0,27	0,08	0,49	374
LAS 14	0,18	0,04	0,31	189
LAS 19	0,20	0,04	0,38	525
LAS 20	0,24	0,05	0,45	707
LAS 21	0,23	0,05	0,42	585
LAS 22	0,24	0,06	0,41	383
LAS 27	0,14	0,05	0,35	98
LAS 28	0,13	0,05	0,33	455

Hay que precisar que los puntos LiDAR incluidos en el modelo digital para realizar el control de calidad son aquellos clasificados como suelo, por lo que si se incluye algún punto mal clasificado se detectaría con este control de calidad. Por ello, no solamente se está valorando la precisión de las mediciones si no, también, la clasificación realizada.

La existencia de solape entre pasadas LiDAR permite que se pueda obtener información acerca de la coherencia de los puntos medidos, analizando las diferencias que existen entre ellas. Se proyectaron puntos de una pasada sobre modelos digitales de terreno obtenidos con los puntos de otra pasada y se obtuvo una diferencia media de 10 cm, tolerable para cartografía a escala 1/1000.

También se proyectaron puntos obtenidos con fotogrametría clásica sobre modelos digitales de la misma zona obtenidos con información LiDAR, obteniendo una diferencia media de $12 \text{ cm} \pm 22 \text{ cm}$. Se observó que donde se producían más errores era en las líneas de ruptura. Esto es lógico, ya que la metodología LiDAR no define bien los bordes, debido a que la forma de recogida de datos no es de manera inteligente sino de manera regular no selectiva.

Tabla 2: Proyección de los puntos obtenidos por correlación sobre los MDT obtenidos por LiDAR.

	Media	Desviación típica	Valor máximo	Puntos comparados
LAS 2	0,05	0,19	5,09	10001
LAS 3	0,09	0,17	3,77	8026
LAS 10	0,10	0,24	3,15	33245
LAS 11	0,19	0,23	4,95	12608
LAS 18	0,19	0,31	6,06	27342
LAS 19	0,14	0,29	5,80	15315
LAS 26	0,01	0,15	2,63	7864
LAS 27	0,19	0,17	2,07	6081

Por otro lado, al proyectar los puntos obtenidos con LiDAR sobre modelos digitales del terreno obtenidos a partir de fotogrametría clásica, es decir, a la inversa que anteriormente, se obtuvo una diferencia media de 14 cm con una desviación típica de 21 cm pero, en este caso, los puntos donde los errores eran mayores estaban en los pequeños cambios de pendiente. Esto puede ser debido a que el LiDAR genera unos modelos digitales más completos que la fotogrametría clásica, ya que cualquier pequeño cambio en el terreno lo tiene en cuenta, mientras que la restitución fotogramétrica no. Si se quisiera tener un modelo digital con fotogrametría clásica tan completo como con LiDAR, el tiempo que se tardaría sería tremendamente alto y, en consecuencia, excesivamente caro.

Tabla 3: Proyección de los puntos obtenidos por LiDAR sobre los MDT obtenidos por correlación.

	Media	Desviación típica	Valor máximo	Puntos comparados
LAS 2	-0,07	0,15	2,43	668868
LAS 3	-0,10	0,15	2,04	453825
LAS 10	-0,14	0,20	4,06	1168390
LAS 11	-0,20	0,22	3,35	667242
LAS 18	-0,23	0,30	3,43	1112298
LAS 19	-0,17	0,26	3,58	665857
LAS 26	-0,01	0,17	1,80	511833
LAS 27	-0,23	0,21	9,13	382359

Además de la comprobación de la eficacia de la metodología propuesta, se procedió a comparar el tiempo empleado con otras técnicas.

Para comparar el tiempo que se tarda con las diferentes metodologías, se obtuvieron modelos digitales del terreno con ambas técnicas y se midió el tiempo que se tardó con cada una de ellas. En el caso de la fotogrametría clásica, el tiempo que se tardó en orientar el par, restituir las líneas de ruptura, realizar la correlación automáticamente de puntos y generar un modelo digital del terreno fue de 3 horas, frente a 1 hora y media que se tardó en filtrar los puntos LiDAR y generar un modelo digital del terreno.

Pero, además, el modelo digital obtenido por LiDAR cubría más extensión que el obtenido con fotogrametría. Para cubrir aproximadamente 1500 Ha de una zona rústica a escala 1/1000 son necesarios 63 modelos estereoscópicos. En cambio, en LiDAR para cubrir lo mismo son necesarios 32 ficheros. Por lo tanto, para cubrir 1500 Ha se tarda alrededor de 189 horas con fotogrametría y 48 horas con LiDAR, casi un 75% menos. En fotogrametría, que un operador sea experto marca una diferencia tanto en el tiempo que se tarda en obtener cartografía como

en la calidad de la misma. Sin embargo, con la tecnología LiDAR no existe esa gran diferencia entre operadores, la calidad y el tiempo empleado serán aproximadamente los mismos.

Un tercer parámetro evaluado fue el coste económico necesario para la obtención de los datos. Un vuelo LiDAR es más caro que un vuelo fotogramétrico; además, normalmente en los vuelos LiDAR, también se toman las fotografías aéreas, por lo tanto, resulta aún más caro. Pero como el tiempo de edición es mucho menor con LiDAR, se consigue compensar los costes, por lo que no se podrá elegir entre una u otra técnica en función del coste final. Cuando se trabaja con LiDAR es de gran ayuda contar con las fotografías aéreas de la zona a la hora de la clasificación de puntos y, en el caso de que posteriormente se quieran obtener ortoimágenes, son indispensables.

Las ortoimágenes se han venido haciendo con los modelos digitales obtenidos con la misma restitución de las fotografías pero, como indica Santos [SAN05], ahora también se pueden obtener con modelos calculados a partir de información LiDAR. Las ortoimágenes logradas serán muy completas, gracias a que los modelos tienen más información. Además, se podrá realizar *true-orto* utilizando el MDS generado. Sin embargo, se debe asegurar que no exista ningún desplazamiento entre las imágenes y la información LiDAR resultado de algún error de calibración o sistematismo.

6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Se ha propuesto una metodología de actuación sobre datos LiDAR para realizar cartografía de una zona rústica a escala 1/1000. Para comprobar la bondad de los resultados, se ha realizado un control de calidad utilizando observación en campo y restitución fotogramétrica. Los indicadores de estos controles de calidad parecen señalar que la cartografía obtenida con la metodología propuesta es válida y acorde con la escala del trabajo.

Para futuros trabajos, se elaborará una metodología de actuación similar para escenarios urbanos, donde aparecen otros objetos y con una casuística completamente diferente. Se pretende dar información acerca de cómo abordar trabajos con sensores de esta índole, que todavía siguen siendo desconocidos por muchos profesionales del sector.

7. REFERENCIAS

- [FOW01] Fowler R., "Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM User's Manual" Topographic LIDAR. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2001, pp. 207-236.
- [IBA08] Ibañez, E., "Validación de Modelos Digitales del Terreno de precisión a partir de datos Láser Escáner Aerotransportado; aplicación a la Marisma del Parque Nacional de Doñana", Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, 2008.
- [MDT12] Página web y ayuda del software MDTopX de Digi21.net. www.digi21.net/mdtop.
- [SAN05] Santos, L.J., "Ortofoto verdadera (True-Orto) y LiDAR, el posible futuro de la cartografía catastral urbana", Centro de Gestión Catastral y Cooperación Tributaria, 2005.
- [SHA09] Shan, J. y Toth, C.K. "Topographic laser ranging and scanning. Principles and Processing". CRC Press, 2009.
- [VOS10] Vosselman, G. y Maas, H.G. (eds.). "Airborne and Terrestrial Laser Scanning". Whittles Pub. CRC Press, 2010.

José Juan Arranz Justel: Ingeniero en Geodesia y Cartografía. Profesor Titular en la ETSI en Topografía, Geodesia y Cartografía de la Universidad Politécnica de Madrid. Especializado en modelización geométrica de datos. Actualmente, realizando el doctorado sobre modelización de datos registrados mediante láser. Ha participado en numerosos proyectos de investigación, entre los que destacan "España Virtual" (IGN, UPM, Deimos) y el programa Consolider-Ingenio 2008-2012 del Ministerio de Ciencia e Innovación "Programa de Investigación en Tecnologías para la valoración y conservación del Patrimonio Cultural (TCP)". Experto evaluador: Servicios profesionales para Agencia de Acreditación de Proyectos de I+D+I (AIDIT- UPM/UPC) relativos a modelización. Autor del software MDTop, para el cálculo de MDT. Coautor del software TopCal 21, para cálculos topográficos.

Ana Belén Vigara Jerez: Ingeniero Técnico en Topografía. Especialista en LiDAR.