

ALGORITMO PARA LA CLASIFICACIÓN DE NUBES DE PUNTOS LIDAR EN ENTORNOS URBANOS: DISCRIMINACIÓN ENTRE VEGETACIÓN Y EDIFICACIONES

JOSÉ JUAN ARRANZ JUSTEL

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

Email: josejuan.arranz@upm.es

SANTIAGO ORMEÑO VILLAJOS

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

Email: santiago.ormeno@upm.es

JUAN MANUEL VICENT GARCÍA

Consejo Superior de Investigaciones Científicas

Email: juan.vicent@cchs.csic.es

Resumen: Los sistemas de registro aerotransportados que utilizan láser (LiDAR) se están convirtiendo en el principal instrumental para la recogida de la información cartográfica debido, principalmente, a la gran densidad de puntos, precisión alcanzada y rapidez en la obtención de modelos digitales. Sin embargo, sería importante disponer de algoritmos que permitan filtrar la información, seleccionando aquellos puntos medidos en zonas deseadas. Cuando se miden zonas urbanas, los elementos más importantes son las edificaciones. Por ello, se propone un nuevo algoritmo que permite clasificar y diferenciar aquellos puntos medidos sobre edificios, extrayendo, como resultado, el límite exterior que definen, de tal forma que se podría calcular la zona edificada.

Palabras claves: Clasificación, Edificaciones, LiDAR, MDT, MDS, Vegetación.

Abstract: Registration systems using airborne laser (LiDAR) are becoming the main device for the collection of cartographic information, mainly due to the high density of points, accuracy and rate achieved in obtaining digital models. However, it would be important to have algorithms that filter the information by selecting those points measured in targeted areas. When measuring urban areas, buildings are the most important objects. Therefore, a new algorithm is proposed to classify those measured points on buildings and to compute their outer boundaries, so the built up area can be computed.

Key words: Classification, Buildings, LIDAR, DTM, DSM, Trees.

1. INTRODUCCIÓN

La irrupción de la medida láser aerotransportada (LiDAR) ha revolucionado la toma de datos cartográfica. La obtención de un modelo digital preciso de la superficie terrestre y sus objetos se puede resolver de una manera rápida mediante este tipo de sensores. Sus posibilidades son amplias: la obtención de un modelo digital del terreno (MDT) y sus

consecuentes mapas derivados (mapas de curvas de nivel, entre otros), la obtención de un modelo digital de superficies (MDS) donde queden representados aquellos objetos de interés que estén sobre la superficie terrestre, el cálculo en tiempo real de ortofotografías, etc.

Su funcionamiento es conceptualmente simple: un dispositivo láser realiza medidas mediante un barrido consecuencia de un movimiento oscilatorio y del avance del propio avión. En este barrido, todo objeto que encuentre en su trayectoria ofrecerá una reflexión del rayo y, por tanto, una medida representada, después de numerosos cálculos, en un punto con sus coordenadas XYZ. El conjunto de los puntos medidos por el LiDAR es numeroso y de alta densidad. Los objetos quedan definidos por la cantidad de puntos que han reflejado en sus superficies. Esta característica representa la principal ventaja del LiDAR y, a la vez, su principal inconveniente. Para transformar esta nube de puntos en un documento comprensible, útil para trabajos posteriores (análisis, comprensión, representación, etc.) debe tratarse mediante los procesos adecuados para separar los puntos definitivos de aquellos que puedan ser innecesarios debido a su redundancia o al objeto que están midiendo.

Estos procesos mencionados tendrán, por tanto, que clasificar los puntos medidos según su funcionalidad o finalidad. De hecho, este proceso de clasificación es el trabajo más importante de edición de una nube de puntos LiDAR. La clasificación dará lugar a conjuntos de puntos según tipología, por ejemplo, puntos pertenecientes a suelo desnudo, superficies de agua, vegetación, edificación, ruido, líneas eléctricas, etc.

Muchos autores han propuesto diferentes algoritmos para alcanzar una clasificación óptima que permita la explotación de la información LiDAR. Axelsson [AXE99] ofrece una buena clasificación de aquellos algoritmos que tratan las nubes de puntos LiDAR, en función de los recursos matemáticos o de la información utilizada para realizar la clasificación.

Cuando se desea registrar información procedente de un entorno urbano, uno de los principales objetivos perseguidos es la documentación del área edificada. Se desean obtener las zonas edificadas, tipología de edificación, altura de edificación, etc. Tradicionalmente, este trabajo estaba reservado a la restitución fotogramétrica que realizaba el registro midiendo los límites de los aleros de las edificaciones.

Con la utilización del LiDAR, se obtendrá una densa nube, con puntos sobre los aleros de los edificios, sus fachadas, puntos sobre el suelo, sobre vegetación e, incluso, sobre vehículos y demás mobiliario urbano. Por tanto, considerando el mismo objetivo de extraer el área edificada de un entorno urbano, se precisan algoritmos que permitan diferenciar puntos LiDAR tomados sobre edificaciones del resto de puntos. Además, una vez que se tengan clasificados estos puntos, se deseará obtener el límite de los objetos que representan para, con ello, extraer las superficies edificadas.

Con la generación de estos límites, la siguiente generación de productos cartográficos podría ser abordada: Modelos tridimensionales de ciudades. Se dispondría de un MDT de gran calidad más la definición de las edificaciones con sus alturas. Esto podría verse mejorado con la incorporación de la información radiométrica (fotografías aéreas o terrestres) como tapiz de las caras de los objetos. Todo ello permitiría la visualización virtual de un entorno urbano que, con las debidas herramientas informáticas, podría permitir al usuario la visita interactiva de una ciudad.

Estos nuevos productos son de gran utilidad, no sólo en Cartografía, sino también en Planeamiento urbanístico, Arquitectura, Riesgo Sísmico, Turismo, Seguridad y Protección Civil, Aviación, etc. Se podrá analizar un entorno urbano de mejor manera que sólo utilizando la vista cenital que un plano proporciona. Con aplicaciones específicas se permitirán vuelos virtuales interactivos, procesos dinámicos que involucren edificios, realidad aumentada, etc.

2. OBJETIVOS

El objetivo de este artículo se basa en la presentación de un algoritmo que permite calcular estos límites de los edificios dados en un entorno urbano a partir de la previa clasificación de los puntos que fueron medidos mediante LiDAR.

Se presentarán los procesos u operaciones que deberían ser aplicados sobre el archivo LiDAR para el filtrado de los puntos de interés que definen las edificaciones. Estos procesos deberán separar aquellos puntos dados sobre las cubiertas de los edificios de los que fueron medidos sobre arbolado próximo o las propias fachadas de los edificios. Se utilizarán algoritmos que utilizan directamente la información almacenada en un fichero LiDAR, sin utilizar modelos digitales de rejilla que siempre desvirtuarán más la realidad medida.

A continuación, y partir de estos puntos, se presentará un proceso mediante el cuál es posible calcular los límites de los conjuntos de puntos clasificados. Con estos límites se realizará un modelado tridimensional del entorno urbano, proyectando los edificios sobre el MDT generado con la propia información LiDAR. Se presentarán ejemplos donde, además, se han utilizado las imágenes aéreas tomadas en el mismo vuelo como envolvente de las superficies generadas.

Estos objetivos podrían ser organizados mediante tres fases diferentes, como también exponen Ekhtari et al. [EKH08] en sus trabajos: detección de edificios, extracción de edificios y reconstrucción de edificios.

3. ESTADO DEL ARTE

Desde la aparición del LiDAR, numerosos autores han desarrollado algoritmos para llevar a cabo el proceso de clasificación de los puntos. Este proceso de clasificación generará diferentes grupos de puntos pertenecientes a suelo, edificios, vegetación, líneas eléctricas, puntos erróneos, etc. Los algoritmos existentes se podrían organizar según diferentes características que los definen.

Una posible clasificación estaría en función de si utilizan directamente la información geométrica almacenada en el archivo LiDAR o si utilizan un modelo interpolado (rejilla) a partir de esta información. Shorter et al. [SHO09] proponen un método basado en los puntos originales. Y dentro de los algoritmos

basados en rejilla está el propuesto por Ekhtari et al. [EKH08].

Otra clasificación tendría en cuenta si el algoritmo utiliza exclusivamente las propiedades geométricas de la información o si utiliza información adicional como información radiométrica, intensidad láser, eco, etc. Ejemplo de este último tipo de algoritmos podría ser el propuesto por Rottensteiner et al. [ROT03], que realiza la clasificación utilizando información geométrica y multiespectral. Hermosilla et al. [HER11] compara dos sistemas de detección de edificios diferentes en su planteamiento y que también utilizan información adicional.

El sistema propuesto en este artículo utilizará directamente la información almacenada en el archivo LiDAR sin necesidad de calcular ningún modelo de rejilla interpolado. Esto complica el cálculo pero mejora la calidad de los resultados. Por otro lado, se propone una vía que utiliza exclusivamente la información geométrica de los datos y otra donde se puede utilizar la información radiométrica (RGB almacenado o intensidad) para mejorar los resultados de la clasificación de puntos.

Por otro lado, Verma et al. [VER06] se centraron en la reconstrucción de los edificios y presenta un método rápido que reconstruye la forma de los edificios en función de la tendencia de las superficies definidas por los puntos registrados. Contempla cubiertas planas e inclinadas, generando objetos muy generalizados y simples pero representativos del edificio original.

4. DESARROLLO DEL ALGORITMO PROPUESTO

Los datos de partida de esta herramienta están compuestos por la nube de puntos procedente de un sensor de medición láser aerotransportado, almacenados en un archivo de formato estándar LAS. Estos archivos contemplan la posibilidad de almacenar la posición tridimensional de cada punto, la intensidad recogida en él, el ángulo desde el que fue medido, la pasada y otras características de la medida. Inicialmente, no se dispone de información del color de la superficie medida, aunque será añadida en procesos posteriores.

Para centrarse únicamente en la detección de edificaciones, el archivo debería ser procesado para poder capturar puntos erróneos (o rebotados sobre aves o superficies de agua) o pertenecientes a estructuras aéreas como líneas eléctricas.

4.1. Detección de puntos elevados

La detección y clasificación de puntos LiDAR pertenecientes a algún tipo de objeto puede utilizar diversa información registrada por el sensor. Es decir, una opción sería utilizar información únicamente geométrica; otra opción podría utilizar información geométrica y la intensidad registrada por el sensor; y una tercera, podría utilizar información geométrica y radiométrica por medio del color registrado (o asignado en un post-proceso). La propuesta de este algoritmo sólo utilizará la información geométrica de los puntos medidos.

La condición geométrica de partida para seleccionar un punto se basará en la diferencia de cota que tiene éste sobre los puntos de su entorno, de tal manera, que si esta diferencia supera un determinado umbral se podría considerar o suponer que el punto puede ser seleccionado.

Según esta condición, se debe establecer o definir el entorno de un punto. Una forma sencilla de establecerlo, sería considerando los puntos medidos antes y después del punto en cuestión. La cantidad de estos puntos podría ser previamente definida, considerando no sólo el punto inmediatamente anterior e inmediatamente posterior, sino, un conjunto de puntos. Esta posibilidad es muy sencilla, ya que los sensores LiDAR miden y registran de una forma secuencial. De esta forma, determinados modelos generan un gran perfil del terreno con forma de zigzag o un conjunto de perfiles paralelos y transversales a la línea de vuelo.

Sin embargo, este entorno es expedito y puede servir únicamente para una detección rápida de puntos claramente candidatos de ser clasificados. Como se puede deducir, la definición de entorno apenas seguiría una única dirección que sería la transversal de la línea de vuelo. Puntos situados en el entorno del punto que no hubiesen sido medidos inmediatamente antes o después del punto en cuestión no serían tenidos en cuenta. Para poder considerar todos los puntos entorno a uno dado, se deben considerar otras formas de definición de entorno.

Otra opción más avanzada, podría ser la definición de entorno utilizando una distancia máxima en la vecindad del punto, definida mediante una circunferencia (considerando únicamente las coordenadas planimétricas) o mediante una esfera (considerando también la cota). Esta posibilidad es también rápida pero tiene problemas en zonas muy densas y en

zonas poco densas. Es decir, en zonas muy densas se podrían llegar a hacer consideraciones con puntos que no están en el entorno del punto pero que están dentro del área definida. Por el contrario, en zonas poco densas, un punto podría quedarse sin puntos vecinos con los que realizar las comparaciones.

Por tanto, la manera más adecuada de abordar un problema de entorno es generando las relaciones de vecindad existentes en un conjunto de puntos. Dichas relaciones pueden ser calculadas con diversos supuestos matemáticos y el resultado será un mallado formado por triángulos que relacionan todos los puntos entre sí. En función del tipo de algoritmo matemático elegido para realizar estas relaciones de vecindad, la malla final tendrá unas propiedades u otras. Sería importante que en la malla no existan solapes, ni huecos interiores y que todos los puntos estén incluidos en dicha malla.

Uno de los algoritmos más famosos y utilizados para realizar esta malla es la triangulación de Delaunay. Sus resultados justifican su coste computacional, que es relativamente alto comparándolo con otras formas de relacionar puntos. Sin embargo, se asegura una correcta definición del entorno de un punto.

La solución propuesta en esta presentación utiliza la triangulación de Delaunay. Debido al coste computacional que conlleva su formación, se utiliza un algoritmo que subdivide el conjunto inicial de puntos en zonas, de tal forma que se acelera el proceso y permite realizar triangulaciones con decenas de millones de puntos, sin tener una curva exponencial entre el tiempo empleado y el número de puntos de la triangulación.

Con la triangulación generada, se tiene el punto de partida para realizar las consideraciones necesarias para clasificar un punto. Como se ha comentado anteriormente, estas consideraciones podrían ser puramente geométricas o incluir alguna característica adicional del punto analizado. De esta forma, el resultado de esta selección sería una nube que se podrá caracterizar como puntos “elevados” a falta de decidir si forman parte de una edificación o no. De hecho, muchos de estos puntos clasificados en este proceso pertenecerán al arbolado de la zona o mobiliario urbano de grandes dimensiones como báculos, farolas o carteles informativos.

Para comenzar con la clasificación, se realiza un primer análisis de la triangulación

detectando triángulos de pendiente elevada y con un desnivel superior a la diferencia de altura mínima marcada como umbral. El resultado será un primer conjunto de puntos clasificados como elevados.

Una vez realizada esta detección, se realiza un segundo análisis donde un punto será clasificado como elevado si está relacionado con dos puntos que previamente fueron clasificados y su cota es superior a la de ambos.

Por último, se realizará un tercer análisis de la triangulación donde serán clasificados aquellos puntos cuya cota sea superior a algún punto previamente clasificado como elevado.

Estos análisis son muy rápidos ya que la toma de decisiones apenas conlleva cálculo matemático. El resultado es un conjunto de puntos cuya cota supera a la de su entorno una cantidad superior a la marcada como umbral. Como se puede deducir, no todos los puntos pertenecientes a objetos elevados son clasificados en estos análisis porque su diferencia de cota con el entorno no supera el umbral. Estos puntos serían todos los puntos interiores a una zona, rodeados de puntos que a su vez están elevados.

Para subsanar este problema, se realiza un cálculo adicional. Con los puntos previamente clasificados como elevados se calculan los límites que circundan al conjunto. Por tanto, aquellos que se encuentren dentro de estos límites y no hayan sido clasificados son susceptibles de ser clasificados como elevados. Para ello, deberán cumplir la condición de tener una cota superior a la media de las cotas de los puntos que forman el límite. Con ello se evita clasificar puntos pertenecientes a patios interiores.

En la Figura 1 se muestra un ejemplo de los puntos clasificados por el algoritmo en una edificación que contiene un patio interior. Los puntos de color rojo se han clasificado con el algoritmo anteriormente expuesto. Por tanto, son considerados como elevados. Los puntos de color verde y de color amarillo todavía no han sido clasificados. Los puntos verdes pertenecen al suelo y, por tanto, su cota será muy inferior a los clasificados. Los puntos de color amarillo pertenecen a la azotea del edificio y su cota será similar a la de los puntos clasificados. Generando un límite como unión de los puntos clasificados y utilizando la información altimétrica, se podrán clasificar como elevados los puntos de color amarillo.

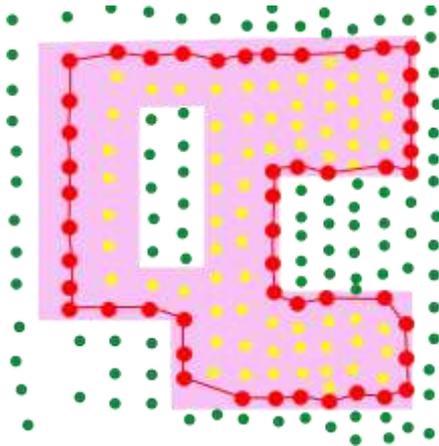


Figura 1: Puntos clasificados y límite generado con ellos.

La descripción del algoritmo para la extracción de los límites exteriores de un conjunto de puntos dado se explica al final de este apartado.

4.2. Detección de edificaciones

Con estas operaciones se finalizaría la primera fase del algoritmo cuyo resultado sería un conjunto de puntos clasificados como elevados. Sin embargo, ahora habría que discriminar entre puntos pertenecientes a edificaciones y puntos pertenecientes a otros objetos, fundamentalmente árboles.

Como muestra la Figura 2, ahora se dispondría de un conjunto de puntos donde se presentan dos clasificaciones: puntos no clasificados como elevados (puntos de color amarillo) y puntos clasificados como elevados (puntos de color rojo y verde). Sin embargo, ahora se debe abordar la separación entre edificación (punto de color rojo) y el resto de objetos, por ejemplo, árboles (puntos de color verde).

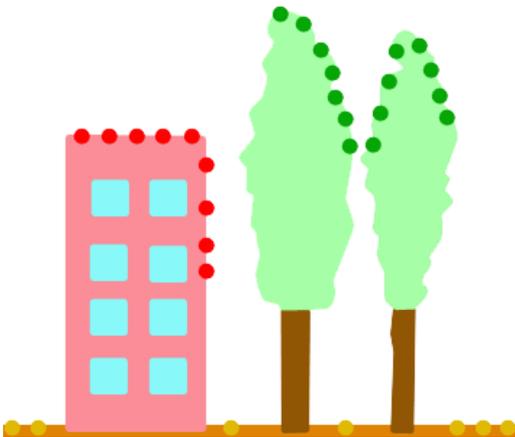


Figura 2: Puntos clasificados sobre árboles y edificios.

Los puntos pertenecientes a edificaciones medidos por el sensor LiDAR tienen dos procedencias fundamentales: puntos pertenecientes al tejado y puntos pertenecientes a las fachadas. Este segundo conjunto de puntos no es interesante para realizar la cartografía, por lo que debería ser seleccionado y clasificado o incluso eliminado. El primer conjunto de puntos permitirá, en procesos posteriores, poder extraer el límite de la zona edificada. Por tanto, ahora se establecen dos procesos: uno para detectar los puntos sobre fachadas y otro para detectar los puntos sobre los tejados.

En la Figura 3, se muestra un ejemplo de los puntos registrados por el sensor sobre una edificación. De color rojo, se muestran los puntos medidos sobre la azotea y que interesa clasificar como edificación. De color verde, se encuentran los puntos medidos sobre el suelo y que no han sido clasificados como elevados. De color azul, se muestran los puntos medidos sobre la fachada. Muchos de estos puntos se habrán clasificado como elevados por su condición geométrica con respecto al entorno, pero no son interesantes para representar la edificación, por lo que deben ser aislados o eliminados.

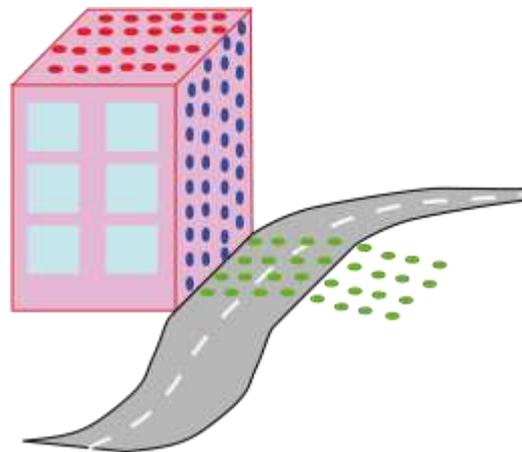


Figura 3: Puntos sobre cubierta (rojo), sobre fachada (azul) y suelo (verde).

El proceso para detectar puntos sobre fachadas se basaría en el hecho de que los puntos pertenecientes a estas medidas en el mismo barrido del sensor deben tener, aproximadamente, la misma localización planimétrica. Es decir, se van a encontrar en la misma vertical. Por tanto, aquellos puntos que habiendo sido clasificados como elevados y que tengan aproximadamente las mismas coordenadas planimétricas serán clasificados

como fachadas. Se pueden establecer más condiciones para que no se seleccionen puntos erróneos, por ejemplo, un número mínimo de puntos en esa vertical. La precisión en la definición de la vertical será, aproximadamente, la que haya tenido el sensor a esa altura.

El segundo proceso que clasificaría los puntos finalmente como edificios, se basa en la distribución que los puntos tienen sobre este tipo de objetos. La gran mayoría de las edificaciones tienen cubiertas planas. Éstas podrán ser horizontales o inclinadas, pero forman una superficie de grandes dimensiones que define un plano. Bajo estas dos premisas se ha diseñado un algoritmo que permite encontrar estos puntos rápidamente.

Por tanto, inicialmente se calculará una triangulación únicamente con los puntos clasificados como elevados, donde también se encontrarán los puntos pertenecientes a los árboles. A continuación, se generará una relación de las pendientes aportadas por todos los triángulos generados y se irán agrupando estos en función de este valor, de tal forma que se vayan formando superficies mediante la unión de aquellos triángulos con inclinación similar. Estas superficies estarán definidas por un plano. Tras el agrupamiento, cuando las dimensiones de este plano superen un valor mínimo de superficie, se podrá considerar que pertenece a un tejado de una edificación, clasificando todos sus puntos.

El proceso es rápido y efectivo, planteando problemas en superficies onduladas o en aquellos tejados donde existan más objetos que los propios de la cubierta, por ejemplo, aparatos de aire acondicionado o tuberías.

4.3. Extracción de los límites de zona edificada

Una vez clasificados los puntos pertenecientes a las cubiertas de los edificios, el último proceso, adicional a la propia clasificación de los puntos LiDAR, sería la extracción de los límites de las edificaciones con estos puntos. Este algoritmo de extracción de los límites a partir de nubes de puntos ya fue utilizado anteriormente para clasificar aquellos puntos interiores que no fueron clasificados por sus condiciones geométricas con el entorno. Para su correcto funcionamiento se debe indicar una distancia máxima para que dos puntos puedan formar el límite. Este valor es importante y depende de la densidad de puntos LiDAR medidos. Si su valor es pequeño, podrían no formarse ciertas superficies por encontrarse sus puntos más distanciados que

este valor. Si su valor es grande, podrían no encontrarse ciertas concavidades existentes en la forma de las superficies.

El funcionamiento del algoritmo se basa en la triangulación de Delaunay. El algoritmo de esta triangulación se basa en el establecimiento de unos puntos ajenos a la nube de puntos dato y externos a esta (puntos ficticios), marcando los límites de actuación. Estos puntos generarán triángulos con los puntos exteriores de la nube por los cuatro costados (norte, sur, este y oeste), de tal manera, que se genera una superficie total siempre convexa (*convex hull*). Utilizando esta información, se podrían determinar qué puntos están unidos con estos puntos ficticios y utilizar los lados de los triángulos generados con estos para la formación del límite exterior de la nube de puntos. El proceso es rápido y sencillo y no implica el cálculo de toda la triangulación de la nube de puntos.

La Figura 4 muestra la triangulación de un conjunto de puntos dato (color negro) utilizando los puntos ficticios (color rojo) para su cálculo. Los puntos ficticios son calculados según la extensión del conjunto de puntos dato. Los triángulos generados utilizando estos puntos ficticios (color rojo) proporcionarán el límite exterior del conjunto de puntos dato (color verde).

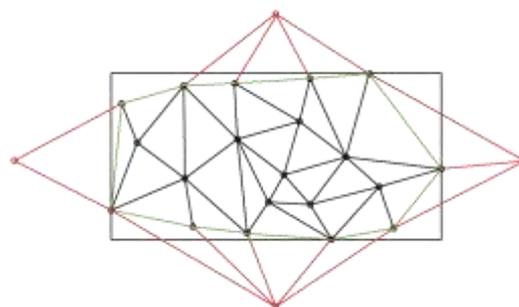


Figura 4: Triangulación de puntos (color negro) más puntos ficticios (color rojo). En verde, el límite exterior

5. ZONA DE ESTUDIO

Para probar la bondad del algoritmo se ha utilizado un vuelo LiDAR de la zona sureste de Madrid. Este vuelo ha sido realizado a una altura de 700 m con una densidad de puntos de 1.29 puntos/m², lo que significa que se tienen puntos cada 90 cm aproximadamente, que permitirían realizar una cartografía 1/500 de la zona. La precisión aproximada de los puntos en coordenadas terreno es superior a 10 cm. La

superficie total es de 190 Ha incluyendo más de tres millones de puntos.

La zona incluye edificaciones de diversas alturas, desde dos plantas hasta diez plantas en viviendas. Asimismo, incluye bastante arbolado que podría perturbar el funcionamiento del algoritmo.

La Figura 5 muestra parte de la zona registrada utilizando una escala de grises en función de la intensidad registrada por el sensor. La parte izquierda de la imagen está poblada de edificios de viviendas de gran altura. Existe una autopista en la parte central y en la parte derecha se encuentran edificios de baja altura rodeados de numerosos árboles de mayor altura que los propios edificios.

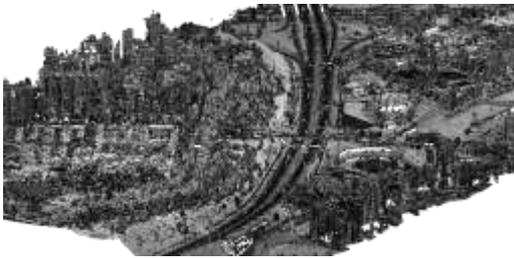


Figura 5: Nube de puntos LiDAR representada según la intensidad registrada por el sensor.

La Figura 6 muestra la misma zona utilizando una gama de tintas hipsométricas, dando color en función de la altura de los puntos. Según estos colores, se puede apreciar la altura de cada zona.

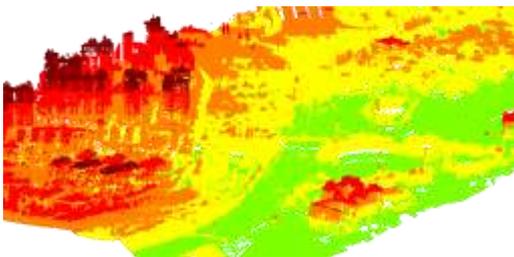


Figura 6: Nube de puntos LiDAR representada utilizando una gama de tintas hipsométricas.

6. RESULTADOS

A partir de los datos almacenados en un fichero LAS (propio de LiDAR) de la zona mencionada anteriormente, se ha procedido a probar la propuesta presentada.

El primer paso es la detección de los puntos elevados, es decir, aquellos que superen un umbral mínimo de altura con respecto a su entorno más inmediato y que, para este ejemplo, se ha establecido en 3 m. Asimismo, el algoritmo precisa que se le indique un valor de proximidad entre puntos para no realizar consideraciones entre puntos alejados en el espacio. Sabiendo que el sensor ha registrado puntos a una distancia inferior al metro, este valor también ha sido de 3 m.

Después de varias iteraciones para localizar todos los puntos elevados, se han clasificado 843.810 puntos lo que representa un 27% de puntos del fichero.

El segundo paso es la detección de los puntos pertenecientes a fachadas de edificaciones y que no serán útiles para ningún proceso posterior por lo que incluso se podrían eliminar. El algoritmo clasifica 81.897 puntos.

El último paso en el proceso de clasificación sería la detección de los puntos pertenecientes a las azoteas de los edificios. El programa precisa de dos parámetros adicionales que caracterizarían las construcciones de la zona y son la pendiente máxima que puede alcanzar un plano que defina una edificación y el tamaño mínimo que debe alcanzar la superficie del plano. Estos valores se han fijado en 30°, sabiendo que la mayoría de las edificaciones poseen cubiertas horizontales, y 30 m², respectivamente. Según esto, el algoritmo clasifica 300.245 puntos.

Después de aplicar la herramienta sobre el archivo, se obtiene una clasificación como la mostrada por la Figura 7, donde se muestra los datos en planta.



Figura 7: Datos LiDAR clasificados. De color verde los puntos no clasificados o suelo, de color morado la vegetación y de color naranja las edificaciones.

La Figura 8 muestra el archivo desde una determinada perspectiva inclinada para percibir los puntos clasificados como fachadas.

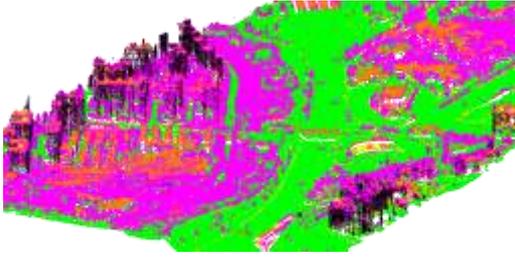


Figura 8: Puntos LiDAR clasificados. De color negro, los puntos sobre fachadas.

Con los puntos sobre las edificaciones clasificados, se puede ejecutar el algoritmo de cálculo de los límites de edificación. El resultado de este proceso será un archivo vectorial con los límites que definen a los edificios de la zona. Se generan un total de 325 superficies. La bondad de su cálculo se puede probar mediante las fotografías aéreas de la zona. En la Figura 9 se muestra parte del archivo donde se encuentra bloques de viviendas.

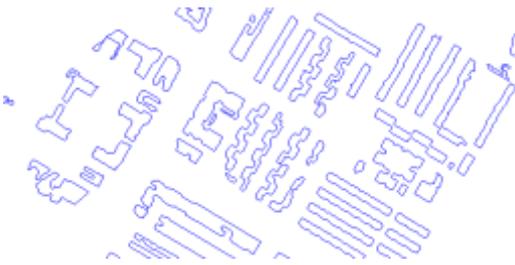


Figura 9: Límites generados a partir de los datos LiDAR clasificados como edificación.

La Figura 10 muestra los límites generados con la fotografía aérea de fondo para comprobar la bondad de los resultados. La zona representada tiene edificios de poca altura y árboles entre los edificios que dificultan el cálculo. Aun así se detectan los límites de las edificaciones con pequeños errores puntuales, pero salvando los árboles circundantes.



Figura 10: Límites de edificaciones generados con la imagen aérea de fondo.

Estos límites podrán servir para realizar un modelo tridimensional de la zona, representando las edificaciones como objetos con volumen, como muestra la Figura 11. Además, se podría mejorar este modelo utilizando como papel tapiz la propia imagen aérea, como muestra la Figura 12.

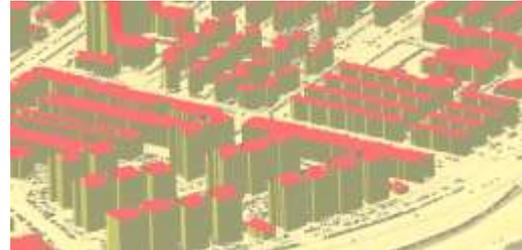


Figura 11: Modelo digital con edificaciones proyectadas.



Figura 12: Modelo digital con edificaciones proyectadas y ortofotografía.

Todo el desarrollo presentado ha sido implementado en el software MDTopX de Digi21.net [MDT12], mediante el cual se han realizado los cálculos y extraído las imágenes de este artículo.

7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

A la vista de los resultados, se podría afirmar que se ha presentado un algoritmo que permite encontrar un alto porcentaje de puntos pertenecientes a edificaciones, discriminando otros objetos con altura similar a este tipo de objetos. Además, se ha esbozado una posible solución para encontrar los límites de las edificaciones. Sin embargo, las futuras líneas de investigación se centrarán en varios aspectos donde todavía hay cabida a mejoras.

Por un lado, la detección eficaz de aquellas edificaciones que no presentan cubiertas perfectamente planas, debido a las características propias de su arquitectura o por

la inclusión de objetos ajenos que impiden calcular perfectamente su morfología, como pueden ser aparatos de aire acondicionado, barandillas o tuberías.

Por otro lado, mejorar la extracción de los límites de las edificaciones. Estas mejoras podrían venir de la mano de la utilización de información adicional, por ejemplo, información radiométrica proveniente de las imágenes fotogramétricas. Teniendo el modelo tridimensional y la imagen fotogramétrica no selectiva y de mayor precisión, se podrían dar con mayor precisión las superficies edificadas.

8. REFERENCIAS

- [AXE99] P. Axelsson, "Processing of laser scanner data—algorithms and applications", *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, No. 54, 1999, pp. 138–147.
- [EKH08] N. Ekhtari, M.R. Sahebi, M.J. Valadan Zoej y A. Mohammadzadeh, "Automatic building detection from LIDAR point cloud data", *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B4. Beijing 2008.
- [HER11] T. Hermosilla, L.A. Ruiz, J.A. Recio y J. Estornell, "Evaluation of Automatic Building Detection Approaches Combining High Resolution Images and LiDAR Data", *Remote Sensing*, 2011, No. 3, pp. 1188–1210.
- [MDT12] Página web del software MDTopX de Digi21.net. www.digi21.net/mdtop.
- [ROT03] F. Rottensteiner, J. Trinder, S. Clode y K. Kubik, "Building Detection Using LIDAR Data and Multi-spectral Images", *Proc. VIIth Digital Image Computing: Techniques and Applications*, Sun C., Talbot H., Ourselin S. and Adriaansen T. (Eds.), 10-12 Dec. 2003, Sydney.
- [SHO09] N. Shorter, N. y T. Kasparis, "Automatic vegetation identification and building detection from a single nadir aerial image" *Remote Sensing* 2009, No. 1, pp. 731–757.
- [VER06] V. Verma, R. Kumar y S. Hsu, "3D Building Detection and Modeling from Aerial LIDAR Data", *Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06)*.

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.

Santiago Ormeño Villajos: Doctor Ingeniero Agrónomo. Catedrático EU en la ETSI en Topografía, Geodesia y Cartografía de la Universidad Politécnica de Madrid. Responsable docencia posgrado: "Espectroscopía de la superficie terrestre, Teledetección ambiental y Modelos Cartográficos ambientales". Experto evaluador: Servicios profesionales para Agencia de Acreditación de Proyectos de I+D+I (AIDIT- UPM/UPC) relativos a Teledetección. Dirección Proyecto "Obtención de parámetros de interés ambiental en Paraguay a partir de imágenes de satélites de observación de La Tierra de baja resolución". Convenio SEAM-Paraguay, UPM. 2008-2011. Dirección Subproyecto 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)". Codirección de la Unidad Asociada UPM-CSIC "Espectroscopía y Fotogrametría Arqueológicas".

Juan Manuel Vicent García: Doctor en Historia por la Universidad Autónoma de Madrid. Investigador Científico del Instituto de Historia del Centro de Ciencias Humanas y Sociales del CSIC. Investigador principal del Grupo de Investigación en Prehistoria Social y Económica y responsable científico del Laboratorio de Teledetección y Arqueología del Paisaje. Codirección de la Unidad Asociada UPM-CSIC "Espectroscopía y Fotogrametría aplicadas a la Arqueología". Ha desarrollado una intensa labor en la investigación y desarrollo de metodologías avanzadas, para la Arqueología del Paisaje y los estudios sobre arte rupestre, contribuyendo destacadamente a la promoción en estos campos de la aplicación combinada de Tecnologías de Información Geográfica y Teledetección. Ha dirigido la revista *Trabajos de Prehistoria*, publicada por el CSIC, de cuyo consejo editorial forma parte y es miembro del Panel de Expertos de UNESCO "World Rock Art Archives Working Group".