

## AJUSTE PLANIMÉTRICO DE DATOS LiDAR PARA LA ESTIMACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DASOMÉTRICAS EN EL PARQUE NATURAL DEL ALTO TAJO

MARIANO GARCÍA<sup>1</sup>, ELENA PRADO<sup>2</sup>, DAVID RIAÑO<sup>3,4</sup>, EMILIO CHUVIECO<sup>1</sup> y FRANCIS M. DANSON<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá. C/ Colegios, 2, 28801 Alcalá de Henares, Madrid (España). [mariano.garcia@uah.es](mailto:mariano.garcia@uah.es) ; [emilio.chuvieco@uah.es](mailto:emilio.chuvieco@uah.es)

<sup>2</sup> Área de Teledetección, Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial (INTA), Crta. de Ajalvir Km 4, 28850 Torrejón de Ardoz, Madrid [pradooe@inta.es](mailto:pradooe@inta.es)

<sup>3</sup> Instituto de Economía, Geografía y Demografía (IEGD), Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CCHS), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Albasanz 26-28 28037 Madrid (España). [david.riano@cchs.csic.es](mailto:david.riano@cchs.csic.es)

<sup>4</sup> Centre for Spatial Technologies and Remote Sensing (CSTARS), University of California, 250-N, The Barn, One Shields Avenue, Davis. CA 95616-8617, USA

<sup>5</sup> Centre for Environmental Systems Research, School of Environment and Life Sciences, University of Salford, Manchester M5 4WT, UK.

### RESUMEN

Los datos LiDAR (Light Detection and Ranging) han mostrado un gran potencial para multitud de aplicaciones ambientales, debido a su capacidad para generar densas nubes de puntos que describen la superficie del terreno. Sin embargo, este potencial depende de la precisión con la que se determina la posición de estos puntos. En este artículo se revisa la utilidad de una técnica de correlación de imágenes basada en áreas, aplicada sobre datos de intensidad, para corregir el desplazamiento planimétrico entre dos vuelos de una misma zona. Esta técnica de correlación permitió reducir los desplazamientos observados, de un RMSE de 0,5 y 1,4 m. en X e Y a un RMSE de 0,24 y 0,3 m. en X e Y, respectivamente. Finalmente, se estudió el efecto del desplazamiento de los datos en la generación de un Modelo Digital de Altura del Dosel (MDAD) para estimar la altura de la vegetación en una zona situada en el Alto Tajo, encontrándose diferencias estadísticamente significativas entre el MDAD generado antes de corregir el desplazamiento relativo entre los datos y el MDAD generado a partir de los datos ajustados.

Palabras clave: LiDAR, correspondencia de imágenes, intensidad, Modelo Digital de Altura del Dosel (MDAD)

## PLANIMETRIC OFFSET ADJUSTMENT OF TWO LiDAR DATASETS FOR THE ESTIMATION OF DASOMETRIC CHARACTERISTICS IN THE NATURAL PARK OF THE ALTO TAJO

### ABSTRACT

LiDAR (Light Detection and Ranging) data have shown a great potential for 3D modelling applications. This potential lies on the ability of LiDAR systems to generate highly dense 3D point clouds for describing the terrain surface. Several error sources affect the position accuracy of the 3D points, which are represented as offsets between the overlapping areas. Throughout this paper, the utility of an area-based matching technique is evaluated to correct the planimetric offset found between two data sets of the same area. The offset was considerably reduced (RMSE: 0,5 and 1,4 m. X, Y to RMSE: 0,24 and 0,3 m. in X, Y). Subsequently, a digital canopy height model (DCHM) was generated to estimate the height of the vegetation, and the effects of the planimetric offset was evaluated. Significant differences were observed between the DCHM generated from the uncorrected data and the DCHM obtained after adjusting both datasets.

Keywords: LiDAR, Image matching, intensity, Digital Canopy Height Model (DCHM)

### 1. Introducción

Cada vez son más frecuentes las aplicaciones de los datos adquiridos por sistemas LiDAR (*Light Detection and Ranging*) en muy diversas temáticas, tales como la generación de modelos digitales del terreno y/o de superficie (MDT/MDS), modelos urbanos tridimensionales, estimación de diversos parámetros forestales (alturas, volúmenes, biomasa, etcétera), cartografía de líneas eléctricas o estudios batimétricos (Irish and White, 1998; Maas and Vosselman, 1999; Næsset *et al.*, 2004). El gran potencial mostrado por esta técnica se debe a su habilidad para determinar con gran precisión las coordenadas X, Y, Z de una densa nube de puntos que permiten describir detalladamente la superficie terrestre.

El principio de funcionamiento de los sistemas LiDAR consiste en la medición muy exacta del tiempo transcurrido entre la emisión de un pulso láser y su retorno, tras reflejarse en la superficie que se observa. A partir de ese tiempo, se calcula la distancia entre el sensor y el objeto sobre el que incide el pulso. Actualmente, los sistemas son capaces de almacenar uno o varios retornos (sistemas discretos), correspondientes a las distintas superficies interceptadas por el pulso en su trayectoria. Algunos sistemas también pueden almacenar la señal de retorno prácticamente de manera continua, en pequeños intervalos de tiempo (por ejemplo cada 1 ns), lo que permite generar una huella completa de la onda emitida y refleja.

Los componentes de un sistema LiDAR pueden agruparse en las siguientes unidades: unidad de medida de distancias, escáner, y unidad de control y procesamiento, la cual incluye un sistema GPS/IMU que permite determinar la posición y orientación del sensor (Wehr and Lohr, 1999). La combinación de los datos proporcionados por estos subsistemas permite determinar la

García, M., Prado, E., Riaño, D., Chuvieco, E. y Danson, F. M. (2009): "Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 184-208. ISSN: 1578-5157

---

coordenadas (X, Y, Z) del punto donde se refleja el pulso emitido. En cuanto al principio de medida de distancias podemos distinguir dos métodos fundamentales. El primer método, más directo, consiste en medir el tiempo transcurrido desde la emisión de un pulso hasta su recepción, mientras que el segundo se basa en determinar la diferencia de fase entre el pulso emitido y el recibido. El tiempo empleado por el pulso en recorrer la distancia sensor-objeto es directamente proporcional a la diferencia de fase. El primer método es empleado por la mayoría de los sistemas comerciales. Además de por el método empleado en la determinación de la distancia sensor-objeto, o de la manera en que se almacenan los retornos (sistemas discretos o de huella continua), los sistemas LiDAR pueden clasificarse en función del diámetro del pulso sobre el terreno en sistemas de huella pequeña (varios centímetros) o sistemas de huella grande (varios metros). Debido a la gran cantidad de información que es necesario almacenar cuando se registra la huella completa, estos sistemas emplean tamaños de huella grande, mientras que los sistemas que registran pulsos discretos emplean tamaños de huella de pocos centímetros.

Actualmente, la inmensa mayoría de los sistemas LiDAR son aeroportados, por lo que la aplicación de estos datos suele restringirse a escalas locales. Hasta ahora el único sistema LiDAR a bordo de satélite que ha permitido obtener datos LiDAR de manera global es el sensor Geoscience Laser Altimeter System (GLAS), a bordo de la plataforma ICESat (Ice, Cloud and Land Elevation Satellite) (Schutz *et al.*, 2005).

La utilidad de los sistemas LiDAR en modelización 3D es clara debido a su capacidad de generar nubes de puntos mucho más densas que con cualquier otro método, y de modo más rápido. Sin embargo, los modelos tridimensionales generados con LiDAR estarán afectados por la precisión en la determinación de las coordenadas de los puntos. Esta precisión está afectada por una serie de fuentes de error que pueden agruparse en los siguientes factores (Huising and Gomes Pereira, 1998; Maas, 2001):

- Errores de alineación entre el sistema láser, el avión y el sistema de navegación, que causarían errores sistemáticos en los datos.
- Precisión en la determinación de la distancia. Este error se propaga fundamentalmente en la coordenada Z.
- Error del espejo, causado principalmente por problemas mecánicos (vibraciones y oscilaciones), y se transmite en mayor medida a las coordenadas planimétricas.
- Errores del sistema GPS/INS. Puede considerarse como la mayor fuente de error, causando errores en las coordenadas finales comprendidos entre los 10 a 20 centímetros en altitud y hasta 50 centímetros en X e Y.

El efecto de estos errores queda reflejado como desplazamientos en las áreas de solape de las pasadas adyacentes o transversales, en términos relativos, o respecto a superficies de control, en términos absolutos. Tradicionalmente se ha prestado mayor atención a los desplazamientos altimétricos puesto que la precisión de la determinación de la altura es el factor más importante en

García, M., Prado, E., Riaño, D., Chuvieco, E. y Danson, F. M. (2009): "Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 184-208. ISSN: 1578-5157

---

la generación de MDT. Sin embargo, el uso de modelos 3D en un número cada vez mayor de aplicaciones ha resaltado la necesidad de determinar las discrepancias tanto altimétricas como planimétricas (Maas, 2001). Para reducir estas discrepancias encontradas, se han propuesto diversas metodologías empleando técnicas de correspondencia mediante mínimos cuadrados entre las nubes de puntos en cuestión (Maas, 2002), elementos lineales o superficiales (Lee *et al.*, 2007; Pfeifer *et al.*, 2005; Vosselman, 2002a) o bien sobre imágenes de intensidad generadas por interpolación a partir de la nube de puntos proporcionada por el sistema LiDAR (Maas, 2001; Vosselman, 2002b).

Estas técnicas propuestas se han aplicado fundamentalmente para lograr un ajuste relativo entre las distintas pasadas que componen un vuelo, pero pueden ser también aplicadas sobre datos de una misma zona tomados en dos momentos distintos. Así mismo, se han aplicado sobre áreas en las que podían extraerse fácilmente elementos lineales o superficiales que facilitasen el proceso de correspondencia, no así sobre zonas forestales. El principal objetivo de este artículo es evaluar el potencial de una técnica de correlación de imágenes basada en áreas, aplicada sobre datos de intensidad, para el ajuste planimétrico de datos LiDAR en un área forestal, donde la aplicación de técnicas basadas en características (lineales o superficiales) resulta compleja. También se estudiarán los efectos de la aplicación de filtros de *paso bajo* sobre la correspondencia de imágenes. Finalmente se evaluará el efecto de los desplazamientos planimétricos encontrados en la generación de un Modelo Digital de Altura del Dosel (MDAD).

A lo largo de este artículo se revisarán, en primer lugar, los distintos métodos propuestos para corregir las discrepancias, tanto altimétricas como planimétricas. Posteriormente, se describirá la metodología empleada, la cual se puede dividir en los siguientes pasos: generación de imágenes de intensidad a partir de los pulsos discretos; extracción de puntos de control distribuidos homogéneamente por la imagen mediante la aplicación de una técnica de correlación basada en áreas; determinación, por mínimos cuadrados, de los parámetros de una transformación global afín bidimensional y corrección de los desplazamientos observados. Una vez corregidos los desplazamientos, se integrarán ambos vuelos y se determinará la altura de la vegetación a partir de los datos LiDAR mediante la generación de un MDAD. Finalmente, se mostrarán y discutirán los resultados obtenidos, así como las conclusiones obtenidas de este trabajo.

## 2. Métodos para la corrección de errores geométricos

La existencia de errores, tanto sistemáticos como accidentales, en la determinación de las coordenadas de los puntos queda reflejada como un desplazamiento relativo entre los datos de dos líneas de vuelo con una zona común. Esto ha dado lugar al desarrollo de diversos métodos para la corrección de dichos errores. Las metodologías empleadas pueden agruparse de acuerdo a distintos criterios como serían los que consideran el tipo de desplazamiento corregido (planimétrico, altimétrico o 3D), la correlación basada en elementos o bien en áreas, o el tipo de dato empleado (altura o intensidad). Otro criterio de clasificación de estos métodos considera dos grandes grupos: aquéllos que sólo consideran las discrepancias observadas entre los puntos de dos líneas de vuelo y aquellos métodos que se basan en un "modelo del sensor" que permita relacionar cada punto con sus datos de observación originales, es decir, métodos que permiten traducir los desplazamientos

García, M., Prado, E., Riaño, D., Chuvieco, E. y Danson, F. M. (2009): "Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 184-208. ISSN: 1578-5157

---

observados a parámetros de orientación externa (Pfeifer *et al.*, 2005). La principal ventaja de estos métodos es que nos van a permitir conocer las verdaderas causas del desplazamiento (Kager, 2004), pero su principal limitación radica en que para su aplicación son necesarios datos que generalmente no están disponibles para el usuario final.

A continuación se describirán las principales metodologías empleadas, considerando en primer lugar aquéllas que utilizan la nube de puntos para determinar las discrepancias en las tres coordenadas (X, Y, Z), bien simultáneamente o bien por separado, y posteriormente aquellas metodologías que permiten la determinación de los desplazamientos planimétricos (X, Y) mediante el uso de la intensidad del retorno.

### 2.1. Ajuste de datos LiDAR a partir de datos de altura

La mayor parte de las metodologías propuestas emplean la nube de puntos LiDAR para determinar los desplazamientos relativos entre pasadas, puesto que en muchos casos el usuario final no dispone de los datos originales de adquisición. La determinación de desplazamientos implica, fundamentalmente, la segmentación de la nube de puntos original en elementos superficiales o lineales utilizados como elementos de enlace que son posteriormente comparados y ajustados. Pfeifer *et al.* (2005) propusieron un método para determinar la diferencia en Z que comparaba la altura de una superficie con respecto al plano formado por los puntos de la pasada o pasadas adyacentes, permitiendo determinar la diferencia de altura entre ambas pasadas.

El uso de elementos lineales, tales como líneas de cumbre de tejados, simplifica el proceso e incrementa la precisión de la determinación de discrepancias entre coordenadas (Lee *et al.*, 2007). Basándose en el empleo de líneas de cumbre de tejado o linderos en zonas agrícolas, delimitados manualmente, Vosselman (2002a) propuso un método de ajuste por mínimos cuadrados a partir de un modelo geométrico que permitiese definir matemáticamente dichos elementos, y así determinar el desplazamiento observado en la zona común de dos líneas de vuelo. Este modelo geométrico permitió establecer las ecuaciones de observación empleadas en el ajuste posterior por mínimos cuadrados. Lee *et al.* (2007) también propusieron el uso de elementos lineales para determinar el desplazamiento, no sólo altimétrico sino en las tres direcciones (X, Y, Z). El algoritmo propuesto por estos autores se divide en cinco pasos, donde primero se determinan los desplazamientos planimétricos (X, Y) y luego se corrige la altura. El algoritmo implica en primer lugar generar una estructura de datos, en este caso una estructura TIN (Triangular Irregular Network), procediendo posteriormente a una segmentación de los puntos en elementos superficiales, como por ejemplo tejados. A partir de la obtención de las líneas resultantes de la intersección de los distintos planos encontrados en cada una de las pasadas, es posible determinar las discrepancias de coordenadas entre los puntos. La distancia entre estas líneas permite establecer un modelo de transformación global que se aplica a los datos de una de las pasadas para ajustarlos a la otra.

La utilización de una estructura de datos TIN para la determinación de discrepancias en coordenadas fue propuesta inicialmente por Maas (2000), aplicando un ajuste por mínimos cuadrados sobre dicha estructura de datos. En este caso se seleccionan varios planos, generalmente

García, M., Prado, E., Riaño, D., Chuvieco, E. y Danson, F. M. (2009): "Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 184-208. ISSN: 1578-5157

---

de forma circular o rectangular. La altura de un punto dado en una de las líneas de vuelo se compara con la altura que, en la misma posición, presenta una estructura TIN obtenida a partir de los datos de la otra línea de vuelo. Esta comparación proporciona una ecuación de observación que se utiliza posteriormente para determinar los parámetros de ajuste. La estructura TIN tiene la ventaja de que utiliza datos originales, no interpolados, evitando los sesgos introducidos por interpolación en las estructuras raster, especialmente en las zonas de oclusión. Sin embargo, a pesar de las ventajas de una estructura TIN sobre una estructura raster, el método propuesto por Maas (2000), requiere que los planos utilizados presenten un contraste altimétrico significativo en las tres direcciones para poder determinar tanto los desplazamiento altimétricos como los planimétricos. El autor también propone la aplicación de constreñimientos al modelo para poder limitar la determinación de desplazamiento al plano vertical u horizontal.

Respecto a los métodos basados en un "modelo del sensor", Kager (2004) propuso un método para realizar un ajuste en 3D simultáneamente, aplicando una corrección polinómica a los elementos de orientación, tanto interna como externa, en función del tiempo. Debido a la imposibilidad de encontrar puntos homólogos en los datos LiDAR, este autor propuso emplear superficies de enlace en vez de puntos de enlace, comúnmente utilizados en fotogrametría. Además, el método propuesto permitía determinar las superficies de enlace de manera automática.

## 2.2. Ajuste de datos a partir de datos de intensidad

Aunque la mayoría de los procedimientos propuestos para corregir las discrepancias se han centrado en la corrección de la coordenada Z o las tres coordenadas simultáneamente, también se han propuestos algunos métodos dirigidos exclusivamente a la determinación del error de las coordenadas planimétricas (Maas 2001, 2002; Vosselman 2002b). Estos métodos se han basado fundamentalmente en la determinación de discrepancias planimétricas utilizando técnicas de correspondencia entre imágenes o *matching*, generadas por interpolación a partir de los datos LiDAR. En estas imágenes el nivel digital (ND) representa la intensidad del pulso, es decir, la fuerza con la que el retorno es registrado por el sistema. Esta intensidad dependerá de diversos factores como son: la distancia sensor-objeto, la reflectividad del objeto o el área interceptada.

Las técnicas de correspondencia entre imágenes se aplican comúnmente en fotogrametría y en teledetección aeroportada para la determinación automática de detalles o entidades homólogas puntuales, lineales y superficiales en una o múltiples imágenes tomadas desde distintos puntos de vista. Los métodos utilizados en correspondencia de imágenes pueden agruparse en (Lerma, 2002):

- Métodos basados en áreas o intensidades (valores de ND): Se basan en el ajuste radiométrico de puntos o superficies en una o varias imágenes.
- Métodos basados en entidades: En la comparación y determinación de entidades homólogas se emplean ciertas entidades obtenidas a partir de las imágenes originales (esquinas, intersecciones,...). Los criterios de similitud tienen en cuenta la forma, el signo, la longitud y el gradiente.

García, M., Prado, E., Riaño, D., Chuvieco, E. y Danson, F. M. (2009): "Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 184-208. ISSN: 1578-5157

- Métodos relacionales: Se basan en la detección topológica de estructuras y objetos definidos en bases de datos con descripciones de los objetos.

La aplicación de un método u otro dependerá en gran medida de las características de la zona de estudio. Así, la aplicación de métodos basados en entidades es adecuada en zonas donde pueden encontrarse fácilmente entidades homólogas, tales como zonas urbanas, pero no tanto en zonas donde la definición de elementos característicos sea más compleja.

### 3. Metodología

#### 3.1. Área de estudio y datos

El presente estudio se realizó sobre una zona forestal situada en el Parque Natural del Alto Tajo en Guadalajara (UL: 40° 56' 49'' N; 2° 14' 49'' W; LR: 40° 48' 25'' N; 2° 13' 21'' W), incluyendo parte de la zona afectada por el incendio de Riba de Saelices de 2005 ([figura 1](#)). El Parque abarca una superficie de 176.265 Ha, incluyendo la zona periférica de protección. En el paisaje destacan los cañones y hoces fluviales y formas singulares de ladera sobre calizas y areniscas rojas, configurado por la red hidrográfica conformada por el río Tajo y sus afluentes (JCCM, 2004). El área de estudio presenta una gran diversidad de especies, siendo relevantes los extensos pinares de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.), laricio (*Pinus nigra* Arn.) y resinero (*Pinus Pinaster* Ait.). También puede encontrarse quejigo (*Quercus faginea* Lam.), encina (*Quercus ilex* L.), sabina (*Juniperus thurifera* L.) y melojo (*Quercus pyrenaica* Willd.). La altura media del área de estudio es de 1200 m., variando entre 895 m. y 1403 m.

Se realizaron dos vuelos sobre la zona de estudio en dos fechas próximas al final del periodo de primavera de 2006, concretamente el 16 de mayo y el 3 de junio. Ambos vuelos fueron realizados por el Natural Environment Research Council (NERC) utilizando un sistema LiDAR Optech-ALTM3033, con una frecuencia de 33000 pulsos por segundo. La altura media de vuelo fue de aproximadamente 750 m. sobre el terreno, con un ángulo máximo de escaneo de  $\pm 12^\circ$  y una densidad media de puntos en cada pasada de aproximadamente 1,5 puntos/m<sup>2</sup>. El diámetro de la huella con esta configuración fue de 18 cm. En cada uno de los vuelos se realizaron tres pasadas en dirección Norte-Sur, sin solape. En el primero de ellos también se realizó un vuelo transversal Este-Oeste para la calibración. El área cubierta por el vuelo fue de aproximadamente 382 km<sup>2</sup>. Los datos proporcionados incluían coordenadas (X, Y, Z) del primer y último retorno en proyección UTM huso 30 en el sistema WGS84, y el valor de intensidad total de cada retorno ([figura 2](#)).

#### 3.2. Determinación de las discrepancias en coordenadas entre los dos vuelos

La integración de los datos correspondientes a los dos vuelos permitirá aumentar la densidad media de cada pasada y, por tanto, caracterizar mejor la superficie del terreno. Previo a la integración de los dos vuelos se realizó un análisis del ajuste relativo entre los datos de ambos. Este

García, M., Prado, E., Riaño, D., Chuvieco, E. y Danson, F. M. (2009): "Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 184-208. ISSN: 1578-5157

---

análisis reveló un desplazamiento sistemático en la dirección XY, no así en Z (figuras 3 y 4). La [figura 3](#) muestra un perfil transversal sobre un núcleo de población situado a lo largo de la línea de vuelo. Puede observarse un desplazamiento lateral entre el primer vuelo (azul) y el segundo vuelo (magenta), no así en el plano vertical.

Para comprobar el ajuste relativo en Z entre los dos vuelos, es conveniente tomar superficies lo más llanas posibles y sin vegetación para evitar posibles errores causados por la presencia de vegetación durante el filtrado de los puntos. Para ello, se utilizó como superficie de referencia una carretera incluida en la zona de estudio. Puede verse en la [figura 4](#) que ambos vuelos presentaban un correcto ajuste relativo en altimetría.

Por tanto, puesto que sólo existía un desajuste entre ambos vuelos en el plano horizontal (X, Y), para la determinación del desplazamiento existente entre los datos se aplicó una técnica de correspondencia de imágenes basada en áreas, aplicada sobre las imágenes generadas a partir de los datos de intensidad. El uso de estas técnicas sobre imágenes de intensidad ha mostrado su utilidad en zonas de estudio llanas que no presentan suficiente contraste altimétrico o cuando el objetivo es determinar las discrepancias en el plano horizontal (Maas, 2001; Vosselman, 2002b).

La metodología empleada para determinar y corregir el desplazamiento planimétrico puede resumirse en los siguientes pasos que serán posteriormente detallados. En primer lugar, se generaron las imágenes de intensidad a partir de la nube de puntos correspondiente mediante un algoritmo de interpolación basado en una media ponderada por la distancia. Posteriormente, se aplicó una técnica de correlación de imágenes sobre cada una de las pasadas para extraer un número suficiente de puntos de control regularmente distribuidos por la imagen. Finalmente, a partir de los puntos de control extraídos en la fase anterior, se determinaron por mínimos cuadrados los parámetros de transformación. Debido a que no se encontraron deformaciones locales, se aplicó una transformación global afín bidimensional (2D) para corregir los datos.

### 3.2.1 Generación de las imágenes de intensidad

La aplicación de los métodos de *matching* basados en áreas requiere la generación previa de una imagen raster a partir de los datos LiDAR originales, de manera que pueda compararse la distribución de los niveles de gris o niveles digitales de ambas imágenes. Por tanto, los datos originales fueron interpolados a una imagen con una resolución espacial de 0,5 m., utilizando como método de interpolación el método *normal core*, implementado en el paquete LiDAR Engine de PCI Geomatica™. Este método utiliza los valores de intensidad de un número de puntos que se encuentren dentro de un radio de búsqueda que define el área de interpolación. Como radio para el área de interpolación se tomó 2 m., lo que permitió disponer de aproximadamente 20 pulsos para determinar el valor de intensidad de la imagen interpolada. Los valores interpolados se calculan como una media ponderada por la distancia, sin embargo, la función de pesos no es lineal sino que decrece con una función exponencial de la distancia (Stewart Wyseman, PCI Geomatics, comunicación personal). Las imágenes de intensidad presentan un característico efecto de moteado



García, M., Prado, E., Riaño, D., Chuvieco, E. y Danson, F. M. (2009): "Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 184-208. ISSN: 1578-5157

---

(*speckle noise*). Este ruido es común a las imágenes de intensidad como consecuencia de una serie de factores entre los que se pueden mencionar (Vosselman, 2002b):

- El modo en que el escáner mide la intensidad. Ésta es una medida instantánea, en vez de integrar la intensidad en un pequeño período de tiempo.
- El sistema realiza un submuestreo de la superficie terrestre, de manera que la cantidad de detalles existentes entre dos puntos láser consecutivos puede ser muy elevada, lo que incrementa el ruido.
- El tamaño de la huella es mucho menor que la distancia entre los puntos, por lo que la intensidad recogida sólo representa una pequeña parte del terreno, incrementando el ruido.

Para reducir el ruido en las imágenes generadas y eliminar su influencia en la correspondencia de imágenes se aplicaron dos filtros de *paso bajo* con un tamaño de ventana de 3x3 ([figura 5](#)). En concreto se aplicó un filtro de mediana, ampliamente utilizado en teledetección para reducir el efecto de moteado (Blom and Daily, 1982), y un filtro *Lee SAR* empleado en imágenes radar (Lee, 1980). Este filtro tiene por objeto suavizar la imagen para reducir el efecto de moteado manteniendo, al mismo tiempo, los bordes. Para ver la influencia de este suavizado en la correspondencia entre imágenes se compararon los resultados obtenidos, utilizando en el proceso de correspondencia las imágenes de intensidad original y las imágenes filtradas.

### 3.2.2. Correspondencia de imágenes

Los métodos de correspondencia de imágenes o *matching* basados en áreas se basan en la asunción de que píxeles homólogos tienen valores similares de reflectividad, por lo que buscan maximizar una función predefinida que mida la similitud entre los píxeles, como por ejemplo el coeficiente de correlación, información mutua, etc. basadas en ventanas de referencia (Liu *et al.*, 2006). Esta ventana de referencia puede ser toda la imagen o una parte de la misma.

Para determinar el desplazamiento planimétrico sobre toda la imagen se aplicó una rutina desarrollada por Prado (2007). La rutina compara dos matrices, una considerada como ventana de referencia (maestra) y otra como ventana a ajustar (esclava), la cual se desplaza sobre la primera. Se estableció un tamaño de ventana de 100x100 píxeles. Para cada desplazamiento de la ventana esclava sobre la maestra (hasta  $\pm 3$  píxeles en X e Y) se calculó el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) como medida de similitud. Como resultado, la rutina proporciona una imagen donde el valor de cada píxel representa el máximo valor de correlación encontrado en los desplazamientos de la ventana esclava sobre la maestra. También genera dos imágenes en las que el valor del píxel representa el desplazamiento encontrado entre ambas imágenes en las direcciones X e Y. Estas imágenes de desplazamientos permiten detectar posibles patrones de error.

Resulta muy difícil obtener una correlación máxima ( $r=1$ ) debido a varios factores como son: ruido, cuyas causas en el caso de las imágenes de intensidad se explicó anteriormente; efectos

García, M., Prado, E., Riaño, D., Chuvieco, E. y Danson, F. M. (2009): "Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 184-208. ISSN: 1578-5157

de iluminación, o en el caso de las imágenes generadas a partir de datos LiDAR, a que es prácticamente imposible que dos pulsos incidan exactamente en el mismo punto. Por tanto se suele establecer un umbral de aceptación, de manera que los píxeles con valor inferior a dicho umbral son descartados. Un valor típico empleado es  $r=0,5$  que equivale a decir que la señal ruido es mayor a 1 (Lerma, 2002). En este estudio se seleccionó un umbral de  $r=0,8$  para seleccionar los puntos de control, utilizados posteriormente en la determinación por mínimos cuadrados de los parámetros del modelo de transformación aplicado para ajustar los datos de los dos vuelos. Además, se superpuso una cuadrícula regular sobre la imagen de correlación, de manera que se extrajeron como puntos de control aquéllos coincidentes con píxeles que en la imagen de correlación tuviesen un valor mayor o igual a  $r=0,8$ . Esto permitió disponer de puntos uniformemente distribuidos por toda la imagen, evitando dar mayor peso a unas zonas que a otras. Aproximadamente un 85% de los puntos seleccionados en cada pasada se utilizaron para obtener los parámetros de transformación, mientras que el 15% restante se utilizaron para validación. Finalmente la transformación se aplicó sobre los datos del 3 de junio para ajustarlos a los datos del 16 de mayo.

Debido a que no se observaron deformaciones locales, se eligió un modelo de transformación global para cada línea de vuelo. El modelo elegido fue una transformación afín bidimensional, el cual puede representarse como:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Donde a, b, c, d, e, y f representan los parámetros geométricos de la transformación, ( $X'$ ,  $Y'$ ) son las coordenadas transformadas y ( $X$ ,  $Y$ ) son las coordenadas observadas, en UTM 30-WGS84. En ambos casos, las coordenadas se redujeron al baricentro de la zona de estudio para evitar problemas en la inversión de la matriz al realizar el ajuste por mínimos cuadrados.

### 3.2. Efecto del desplazamiento de los datos en la generación de Modelos Digitales de Altura del Dosel

Una de las variables más ampliamente estimada con datos LiDAR para el inventario forestal es la altura de los árboles. Esta variable resulta de gran importancia para estimar otras variables, como por ejemplo biomasa (Dubayah *et al.*, 2000; Lefsky *et al.*, 1999a), o bien para determinar variables críticas relacionadas con el comportamiento de los incendios forestales, como altura del dosel y del sotobosque (Riaño *et al.*, 2003). Así mismo, diferencias en la altura media y máxima son indicadores de las diferencias en el desarrollo de distintas masas forestales (Lefsky *et al.*, 1999b; Means *et al.*, 1999).

La densidad de puntos ha mostrado ser más importante que el tamaño de la huella en la estimación de ciertas variables como el área y el volumen de copa (Goodwin *et al.*, 2006), por lo que al utilizar conjuntamente los datos de ambos vuelos cabe esperar una mejor determinación de las variables forestales.

García, M., Prado, E., Riaño, D., Chuvieco, E. y Danson, F. M. (2009): "Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 184-208. ISSN: 1578-5157

---

Para determinar la altura de los árboles en la zona de estudio, en primer lugar se clasificaron los pulsos correspondientes al terreno y los correspondientes a vegetación, aplicando un algoritmo morfológico, el cual clasifica los puntos mediante un proceso iterativo. En primer lugar selecciona el punto más bajo de una zona determinada como punto perteneciente al terreno y genera un TIN a partir de estos puntos iniciales. En cada iteración el algoritmo va añadiendo puntos al terreno que satisfagan dos umbrales. El primer umbral considera el ángulo formado entre el punto analizado, su proyección sobre el TIN y el vértice más próximo del triángulo. El segundo criterio considera la distancia (altura) del punto considerado con respecto a la superficie del TIN generado en la iteración anterior, evitando así grandes saltos cuando los triángulos que forman el TIN son muy grandes (Soinen, 2005).

Una vez clasificados los pulsos, se generó un MDT y un MDS mediante interpolación *spline*, con una resolución de 1 m. El MDS se generó considerando el punto más alto dentro de cada celda de 1 m<sup>2</sup>. La diferencia entre ambos modelos proporcionó un MDAD en el que el valor de cada píxel representa la altura de la vegetación contenida en el mismo con respecto al terreno:

$$MDAD_i = MDS_i - MDT_i \quad (2)$$

Para ver si el desplazamiento planimétrico influía en la generación del MDAD generado a partir de los datos de ambos vuelos y, por tanto, en la estimación de la altura de la vegetación, se generó un MDAD de una zona representativa del área de estudio, con los datos de ambos vuelos antes de realizar el ajuste, y otro MDAD con los datos corregidos planimétricamente. Posteriormente se realizó un muestreo aleatorio extrayendo la altura de 500 píxeles en cada uno de los MDAD generados, y se aplicó un test de Kolmogorov-Smirnov (Martín *et al.*, 2007) para evaluar si existían diferencias estadísticamente significativas entre la altura estimada en cada uno de los MDAD generados.

## 4. Resultados

### 4.1. Corrección de las discrepancias planimétricas

La [tabla 1](#) presenta los coeficientes de correlación medios obtenidos para cada una de las pasadas, es decir, considerando el valor de correlación obtenido en cada píxel de la imagen, no sólo en los puntos de control. También se presentan los valores máximos de desplazamiento ( $\Delta X_{\max}$ ,  $\Delta Y_{\max}$ ) encontrados en los puntos de control, así como el número de puntos de control y validación obtenidos para cada imagen. Como puede observarse en la tabla, los desplazamientos encontrados fueron mayores para la coordenada Y que para la coordenada X. En cuanto a los valores de correlación de cada línea de vuelo, se observa un valor medio ligeramente menor para la primera pasada debido a que las características del área cubierta por esta línea de vuelo dificultaban la correspondencia. Esto también queda reflejado por el número de puntos de control y de validación que se extrajeron para esta línea, prácticamente la mitad que para las otras dos pasadas.

García, M., Prado, E., Riaño, D., Chuvieco, E. y Danson, F. M. (2009): "Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 184-208. ISSN: 1578-5157

---

La [tabla 2](#) muestra los parámetros geométricos de la transformación afín bidimensional obtenidos mediante mínimos cuadrados. Estos parámetros fueron posteriormente aplicados a los datos originales del segundo vuelo para ajustar a los datos del primero, permitiendo reducir notablemente las discrepancias observadas en un principio ([tabla 3](#)).

La [figura 6](#) muestra un perfil vertical de una de las pasadas después de corregir las discrepancias planimétricas observadas. Puede observarse cómo el desplazamiento sistemático observado inicialmente (ver [figura 3](#)) desaparece después de aplicar la transformación afín bidimensional.

Previo al ajuste planimétrico de los datos, se comprobó visualmente que no existía un desplazamiento relativo en altimetría entre los dos vuelos. Sin embargo, para verificar que efectivamente los dos vuelos ajustaban, se seleccionaron varias zonas a lo largo de cada una de las pasadas, lo más llanas posible y con escasa o nula vegetación, y se generó un MDT para cada una de ellas utilizando los datos del primer vuelo. Se utilizaron zonas llanas para que la influencia del desplazamiento horizontal fuese mínima y con poca vegetación para eliminar el ruido que puede introducir la vegetación en el proceso de filtrado y, por tanto, en la generación del MDT. Posteriormente se generó un MDT para cada zona con los datos del segundo vuelo, antes y después de la corrección planimétrica, que fueron comparados con los MDT generados para el primer vuelo. La [tabla 4](#) muestra la media y la desviación típica de las diferencias absolutas entre los MDT generados.

Puede observarse que los resultados son similares tanto antes como después de aplicar la transformación afín a los datos, con pequeñas variaciones para la primera y segunda línea de vuelo ([tabla 4](#)). La mayor discrepancia se encontró en la tercera línea de vuelo, donde la diferencia media se redujo de 14 cm. a 7 cm., y la desviación estándar se redujo de 10 cm. a 6 cm.

#### 4.2. Efecto del desplazamiento de los datos en la generación de Modelos Digitales de Altura del Dosel

La integración de ambos vuelos permitió aumentar la densidad media de cada línea de vuelo de 1,5 pulsos/m<sup>2</sup> a 2,6 pulsos/m<sup>2</sup>, permitiendo una mejor caracterización de la vegetación presente en el área de estudio.

La [figura 7](#) muestra el MDAD generado sobre una zona representativa del área de estudio una vez ajustados los datos de ambos vuelos. La zona presenta una altura media de 2,4 m. y una desviación estándar de 1,59 m. La altura máxima es de 17,7 m., correspondiente a los árboles situados en el cuadrante Sur-Oeste, parte superior izquierda de la figura.

Los resultados logrados para el MDAD obtenido antes de ajustar los datos presentan valores muy parecidos en cuanto a altura media (2,2 m.) y desviación estándar (1,58 m.). La altura máxima obtenida en este caso fue de 18,35 m.

García, M., Prado, E., Riaño, D., Chuvieco, E. y Danson, F. M. (2009): "Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 184-208. ISSN: 1578-5157

---

Comparando la distribución de alturas de las 500 muestras extraídas del MDAD generado a partir de los datos antes de realizar el ajuste con el MDAD creado con los datos ajustados, se observaron diferencias entre ambos, siendo la clase correspondiente a alturas menores de 1m. la que más diferencias presenta. Estas diferencias se deben al efecto que los desplazamientos tienen en el proceso de interpolación y, por tanto, en la descripción de la superficie. La [figura 8](#) muestra los histogramas obtenidos para ambos MDAD, donde pueden verse las diferencias en las distribuciones de altura.

La aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov para comparar las distribuciones de las dos muestras extraídas de los MDAD verificaron la existencias de diferencias estadísticamente significativas entre ambos modelos para un nivel de confianza del 95% (K-S=1,49, p-valor<0,05; n=500).

## 5. Discusión de los resultados

La aplicación de filtros de paso bajo a las imágenes de intensidad permitió obtener mejores correlaciones para las imágenes filtradas, ya que se reduce el característico efecto de moteado presente en las imágenes de intensidad. Este ruido de las imágenes de intensidad tiene un efecto negativo en el proceso de correspondencia entre imágenes. Conviene notar que no hay apenas diferencias entre los resultados de ambos métodos de filtrado, sin embargo el filtro de mediana mejora ligeramente los resultados ya que el método *Lee SAR* mantiene parte del ruido de las imágenes de intensidad originales. Vosselman (2002b) mostró la utilidad de los filtros de mediana aplicados sobre imágenes de intensidad para determinar el desplazamiento planimétrico entre datos LiDAR.

Los resultados muestran un cambio en el signo de los desplazamientos de acuerdo a la dirección de vuelo seguida en cada pasada, es decir, las líneas primera y tercera se volaron en dirección Norte-Sur, mientras que la segunda se voló en dirección Sur-Norte. Así, para la primera y tercera línea de vuelo se obtuvo un desplazamiento negativo en X y positivo en Y que cambia para la segunda pasada. Este hecho refleja el carácter sistemático del desplazamiento encontrado en los datos.

Las pequeñas diferencias encontradas entre los MDT generados con los datos de ambos vuelos están por debajo de la precisión teórica del sistema LiDAR, de aproximadamente 15 cm. (Baltsavias, 1999). Reutebeuch *et al.* (2003) encontraron errores medios de 0.22 m.  $\pm$  0.24 m. en MDT generados en una zona de coníferas del estado de Washington, Estados Unidos, por lo que las diferencias halladas entre los MDT para las distintas líneas de vuelo se encuentran por debajo de la precisión que cabría esperar en un MDT generado a partir de datos LiDAR. Las mayores diferencias encontradas para la tercera línea de vuelo pueden explicarse por el hecho de que el área seleccionada presentaba una ligera pendiente y, por tanto, se debe a la influencia del desplazamiento planimétrico sobre la componente vertical.

García, M., Prado, E., Riaño, D., Chuvieco, E. y Danson, F. M. (2009): "Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 184-208. ISSN: 1578-5157

---

Respecto al modelo digital de alturas generado una vez corregidos los datos, hay que tener en cuenta que diversos autores han mostrado cómo los datos LiDAR tienden a infraestimar la altura de la vegetación comparada con las alturas medidas en campo, tanto en bosques de coníferas (Naesset, 1997; Nilsson, 1996), como de frondosas (Gaveau and Hill, 2003). Korpela *et al.* (2008) encontraron que la infraestimación en la altura de la vegetación estimada a partir de datos LiDAR en un bosque de coníferas variaba entre el 19% y el 39%, dependiendo de la especie. Esta infraestimación puede producirse por la baja probabilidad de que el pulso emitido sea reflejado por el ápice del árbol, siendo más probable que lo sea en otras partes del árbol. Otro factor a considerar en la infraestimación de la altura de la vegetación es el error introducido por los propios errores del MDT, cuya influencia será mayor en zonas de vegetación más densa o en zonas de topografía compleja (Korpela *et al.*, 2008). Reutebeuch *et al.* (2003) encontraron pequeñas diferencias, aunque significativas, en los errores del MDT generado en zonas de coníferas con distintos grados de densidad de vegetación, desde zonas abiertas hasta zonas con alta densidad de vegetación, que se transmiten a la determinación de la altura de la vegetación.

Comparando las alturas de los MDAD generados antes y después de ajustar planimétricamente los datos, se obtuvieron pequeñas diferencias en términos generales. La mayor diferencia en la estimación de la altura máxima se debe a la inclusión de pulsos en el borde del MDAD que, una vez corregidos los datos, quedaron fuera. La diferencia media obtenida fue de 0,3 m. con una desviación estándar de 0,76 m., siendo la diferencia máxima en valor absoluto de 10,7 m. Aunque la diferencia media para toda la zona considerada fue pequeña, en aproximadamente el 13% de los píxeles ésta fue superior a 1 m.

Las diferencias, estadísticamente significativas, entre las distribuciones de las dos muestras extraídas (500 puntos), muestran la importancia de un correcto ajuste de los datos para describir adecuadamente la superficie del terreno y la posterior derivación de variables de interés, especialmente cuanto mayor sea el nivel de detalle (estimaciones a nivel de árbol frente estimaciones a nivel de masa).

## 6. Conclusiones

En este artículo se ha evaluado el uso de una técnica de correspondencia entre imágenes basadas en áreas, aplicada sobre imágenes de intensidad generadas a partir de una nube de puntos LiDAR, para determinar el desplazamiento planimétrico observado entre dos vuelos LiDAR realizados sobre un área forestal. Esta técnica basada en áreas ha mostrado ser adecuada sobre zonas en las que la aplicación de métodos basados en entidades resulta compleja. También se ha mostrado cómo la aplicación de filtros de paso bajo, que reducen el ruido característico de dichas imágenes, mejora los resultados de estas técnicas facilitando la extracción de puntos de control; si bien, no se han encontrado diferencias significativas entre ambos filtros.

La rutina desarrollada, la cual genera imágenes de desplazamiento, permite detectar patrones de desplazamiento, tanto globales como locales, que puedan presentar las imágenes. Así mismo, la extracción de puntos de control distribuidos homogéneamente sobre la imagen permitiría

García, M., Prado, E., Riaño, D., Chuvieco, E. y Danson, F. M. (2009): "Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 184-208. ISSN: 1578-5157

---

aplicar métodos de transformación local como *piecewise linear models* o *local weighted mean*, los cuales requieren un gran número de puntos distribuidos por toda la imagen ya que los parámetros de transformación varían de una región a otra.

Los datos LiDAR permiten obtener de una manera directa y sencilla la altura de la vegetación en zonas forestales. Esta variable resulta crítica para derivar otros parámetros forestales o para mejorar la información relacionada con el peligro de incendios.

La integración de los dos vuelos permitió aumentar la densidad de pulsos disponible, siendo ésta una variable de gran importancia para derivar diversos parámetros forestales al permitir una mejor caracterización del área muestreada. Sin embargo, en esta integración resulta crítico el correcto ajuste de los datos entre los dos vuelos para describir correctamente la superficie terrestre mediante modelos digitales, a partir de los cuales se derivarán las variables de interés.

### Agradecimientos

Queremos mostrar nuestro agradecimiento al UK Natural Environment Research Council por proporcionar los datos LiDAR como parte de la Campaña Mediterránea de adquisición de datos de teledetección aeroportada de 2006, referencia WM06-04 (Airborne Remote Sensing Facility 2006 Mediterranean Campaign, grant WM06-04); así como a los dos revisores anónimos por sus comentarios y sugerencias.

### Referencias bibliográficas

- Baltsavias, E.P. (1999): "Airborne laser scanning: Basic relations and formulas", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53, pp.199-214.
- Blom, R.G. and Daily, M. (1982): "Radar image processing for rock-type discrimination", *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, GE20, pp.343-351.
- Dubayah, R.O., Knox, R.G., Hofton, M.A., Blair, J.B. and Drake, J.B. (2000): "Land surface characterization using lidar remote sensing". In M.a.A. Hill, R. (Eds) (Ed.), *Spatial Information for Land Use Management*. Singapore: International Publishers Direct.
- Gaveau, D.L.A. and Hill, R.A. (2003): "Quantifying canopy height underestimation by laser pulse penetration in small-footprint airborne laser scanning data", *Canadian Journal of Forest Research*, 29, pp. 650-657.
- Goodwin, N.R., Coops, N.C. and Culvenor, D.S. (2006): "Assessment of forest structure with airborne LiDAR and the effects of platform altitude", *Remote Sensing of Environment*, 103, pp. 140-152.
- Huising, E.J. and Gomes Pereira, L.M. (1998): "Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53, pp. 241-261.

García, M., Prado, E., Riaño, D., Chuvieco, E. y Danson, F. M. (2009): "Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 184-208. ISSN: 1578-5157

---

Irish, J.L. and White, T.E. (1998): "Coastal engineering applications of high-resolution lidar bathymetry", *Coastal Engineering*, 35, pp. 47-71.

Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha-JCCM (2004): *Alto Tajo, información general*. [última consulta: 31 de marzo de 2009]. Disponible en: <http://www.castillalamancha.es/medioambiente/sp/Contenidos/espaciosnaturales/PDF/alto%20tajo%20-%20información.pdf>

Kager, H. (2004): "Discrepancies between overlapping laser scanning strips – simultaneous fitting of aerial laser scanner strips", In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, pp. 555-560.

Korpela, I., Tuomola, T., Tokola, T. and Dahlin, B. (2008): "Appraisal of Seedling Stand Vegetation with Airborne Imagery and Discrete-Return LiDAR – an Exploratory Analysis", *Silva Fennica*, 42, pp. 753-772.

Lee, J.-S. (1980): "Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1-2

Lee, J., Yu, K., Kim, Y. and Habib, A.F. (2007): "Adjustment of discrepancies between LiDAR data strips using linear features", *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 4, pp. 475-479.

Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Acker, S.A., Parker, G.G., Spies, T.A. and Harding, D. (1999a): "Lidar Remote Sensing of the Canopy Structure and Biophysical Properties of Douglas-Fir Western Hemlock Forests", *Remote Sensing of Environment*, 70, pp. 339-361.

Lefsky, M.A., Harding, D., Cohen, W.B., Parker, G. & Shugart, H.H. (1999b): "Surface Lidar Remote Sensing of Basal Area and Biomass in Deciduous Forests of Eastern Maryland, USA", *Remote Sensing of Environment*, 67, pp. 83-98.

Lerma, J.L. (2002). *Fotogrametría moderna: analítica y digital*

Liu, D., Gong, P., Kelly, M. and Q., G. (2006): "Automatic registration of airborne images with complex local distortion", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72, pp. 1049-1059.

Maas, H.-G. (2000): "Least-squares matching with airborne laserscanning data in a TIN structure", *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33, pp. 548-555.

Maas, H.-G. (2001): "On the use of reflectance data for laserscanner strip adjustment", *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34, pp. 53-56.

Maas, H.-G. (2002): "Methods for measuring height and planimetry discrepancies in airborne laserscanner data", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68, pp. 933-940.

Maas, H.-G. and Vosselman, G. (1999): "Two algorithms for extracting buildings models from raw laser altimetry data", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, pp. 153-163.

Martín, Q., Cabero, M.T. and Paz, M.R. (2007): *Tratamiento estadístico de datos con SPSS*. Thomson Editores Spain - Paraninfo, S.A.



García, M., Prado, E., Riaño, D., Chuvieco, E. y Danson, F. M. (2009): "Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 184-208. ISSN: 1578-5157

---

Means, J.E., Acker, S.A., Harding, D.J., Blair, J.B., Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Harmon, M.E. and McKee, W.A. (1999): "Use of Large-Footprint Scanning Airborne Lidar To Estimate Forest Stand Characteristics in the Western Cascades of Oregon", *Remote Sensing of Environment*, 67, pp. 298-308.

Naesset, E. (1997): "Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 52, pp. 49-56.

Næsset, E., Gobakken, T., Holmgren, J., Hyypä, H., Hyypä, J., M., M., Nilsson, M., Olsson, H., Persson, A. and Söderman, U. (2004): "Laser scanning of forest resources: The Nordic experience", *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19, pp. 482-499.

Nilsson, M. (1996): "Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system", *Remote Sensing of Environment*, 56, pp. 1-7.

Pfeifer, N., Oude Elberink, S. and Filin, S. (2005): "Automatic tie elements detection for laser scanner strip adjustment", *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Proceedings of Laserscanning*, 36, pp. 174-179.

Prado, E. (2007): "Mejoras en la evaluación y corrección de errores de corrección en imágenes hiperespectrales AHS para estudios multitemporales". En, *Departamento de Geografía*. Alcalá de Henares: Universidad de Alcalá

Reutebuch, S.E., McGaughey, R.J., Andersen, H.E. and Carson, W.W. (2003): "Accuracy of a high-resolution lidar terrain model under a conifer forest canopy", *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29, pp.527-535.

Riaño, D., Meier, R., Allgower, B., Chuvieco, E. and Ustin, S.L. (2003): "Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling", *Remote Sensing of Environment*, 86, pp.177-186.

Schutz, B.E., Zwally, H.J., Shuman, C.A., Hancock, D. and DiMarzio, J.P. (2005): "Overview of the ICESat Mission". *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 32

Soinen, A. (2005): *TerrasScan User's Guide*. Terrasolid, 169 p.

Vosselman, G. (2002a): "Strip offset estimation using linear features". In, *3rd International workshop on mapping geo-surficial processes using laser altimetry*, pp. 1-9.

Vosselman, G. (2002b): "On the estimation of planimetric offsets in laser altimetry data", *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 34, pp.375-380.

Wehr, A. and Lohr, U. (1999): "Airborne laser scanning—an introduction and overview", *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, pp. 68-82.

## TABLAS

**Tabla 1: Coeficientes de correlación y puntos de control extraídos (\*1pd, 2pd, 3pd: se refieren a los datos del primer día; 1sd, 2sd, 3sd: se refieren a los datos del segundo día)**

Pasada *	r medio			Puntos de Control	Puntos de Validación	$\Delta X_{\max}$ (m)	$\Delta Y_{\max}$ (m)
	original	Filtro mediana	Filtro Lee-SAR				
1pd-1sd	0,40	0,49	0,48	40	7	-1	1,5
2pd-2sd	0,49	0,57	0,55	82	12	1	-1,5
3pd-3sd	0,45	0,55	0,53	94	14	-1	1,5

**Tabla 2: Parámetros geométricos de la transformación afín 2D**

Pasada	a	b	c	d	e	f
1pd-1sd	0,999404	$6,603 \text{ e}^{-6}$	0,0054	-0,0001175	0,999986	-0,0223
2pd-2sd	0,999930	$-8,749 \text{ e}^{-6}$	-0,0028	-0,001187	1,0000107	0,0146
3pd-3sd	0,998103	$-2,1434 \text{ e}^{-5}$	0,0003	0,0002042	0,9999997	-0,0166

**Tabla 3: Error medio cuadrático en X e Y antes y después de ajustar los datos**

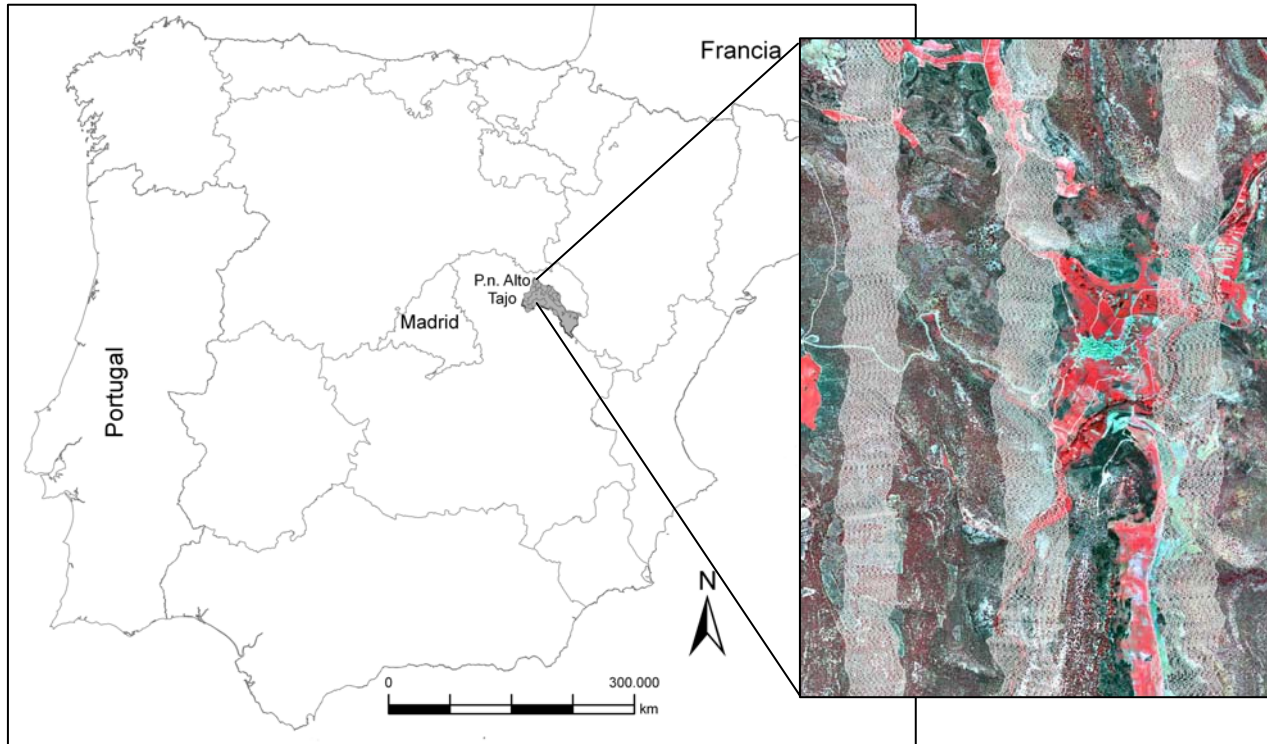
Pasada	RMSE-X antes (m)	RMSE-Y antes (m)	RMSE-X después (m)	RMSE-Y después (m)
1pd-1sd	0,46	1,41	0,24	0,33
2pd-2sd	0,56	1,45	0,24	0,27
3pd-3sd	0,55	1,29	0,23	0,30

**Tabla 4: Media y desviación estándar entre los MDT comparados antes y después de corregir planimétricamente los dos vuelos**

Pasada *	$\Delta Z$   Antes (m)		$\Delta Z$   Después (m)	
	Media	Desviación Estándar	Media	Desviación Estándar
1pd-1sd	0,058	0,043	0,073	0,044
2pd-2sd	0,056	0,050	0,066	0,050
3pd-3sd	0,140	0,100	0,070	0,060

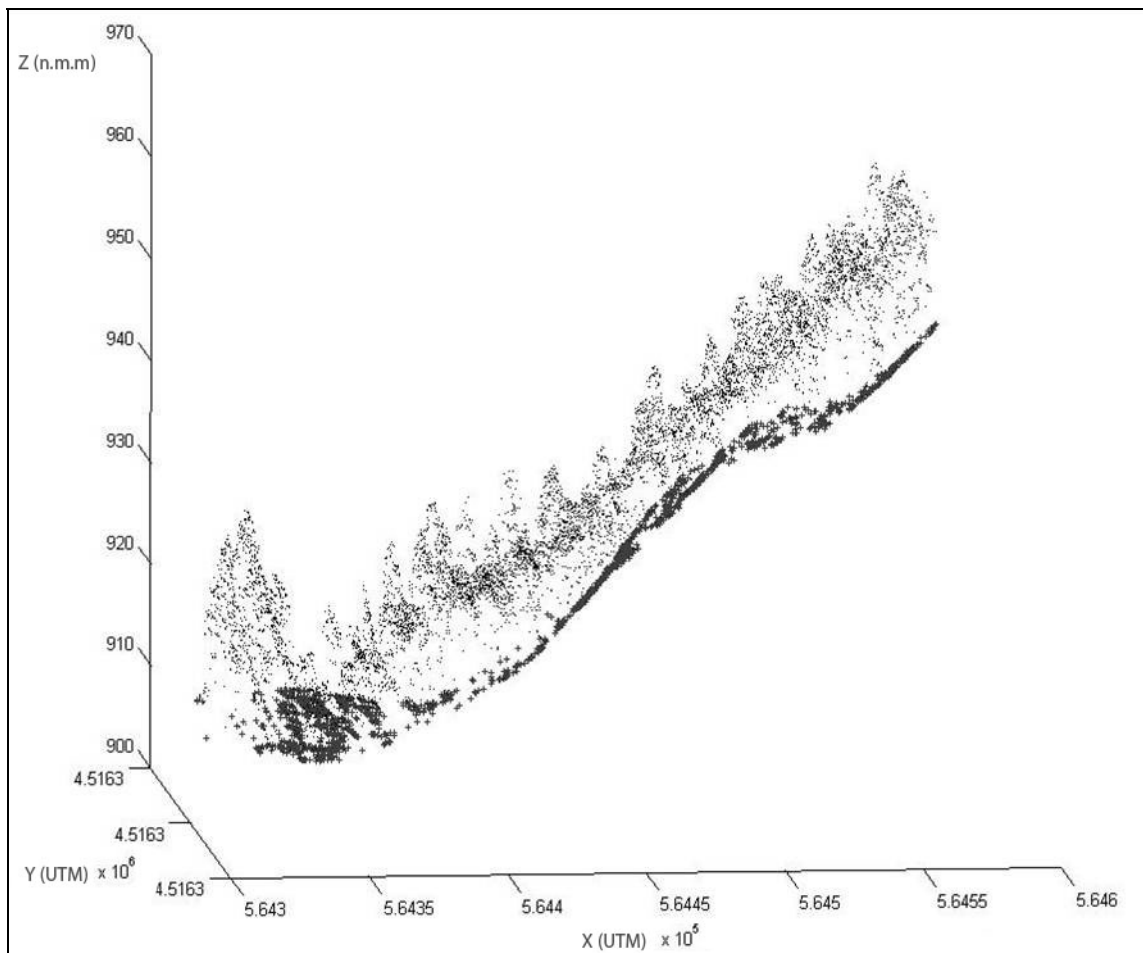
García, M., Prado, E., Riaño, D., Chuvieco, E. y Danson, F. M. (2009): "Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 184-208. ISSN: 1578-5157

## FIGURAS



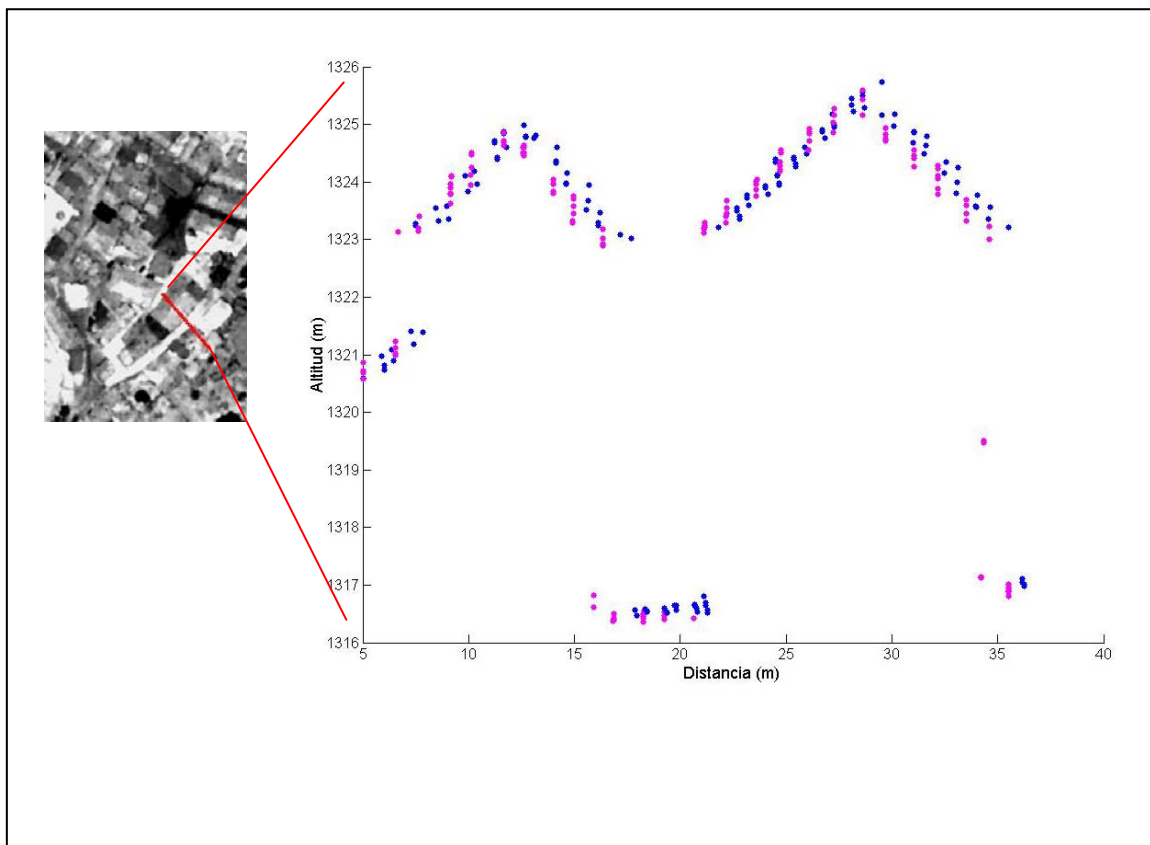
**Figura 1: Localización del área de estudio. La imagen ampliada muestra parte de la zona cubierta por datos LiDAR sobre una imagen ATM en falso color (R: Infrarrojo Cercano, G: Rojo; Z: Verde).**

García, M., Prado, E., Riaño, D., Chuvieco, E. y Danson, F. M. (2009): "Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 184-208. ISSN: 1578-5157



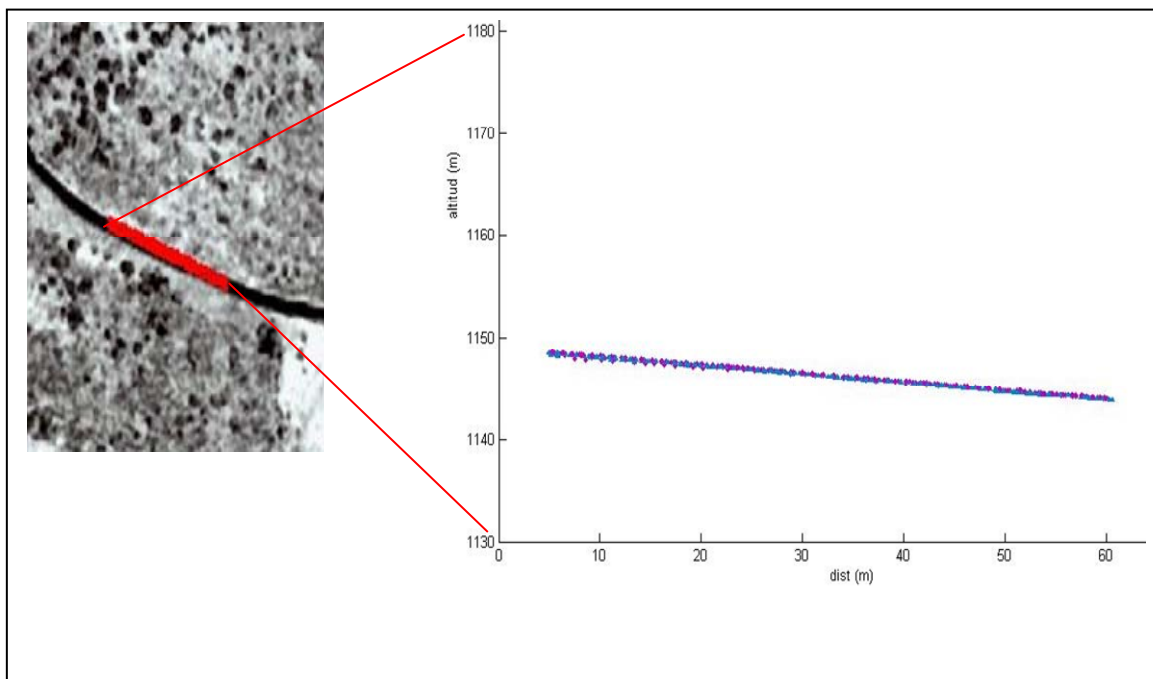
**Figura 2: Muestra de los datos LiDAR adquiridos sobre el área de estudio.**

García, M., Prado, E., Riaño, D., Chuvieco, E. y Danson, F. M. (2009): "Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 184-208. ISSN: 1578-5157

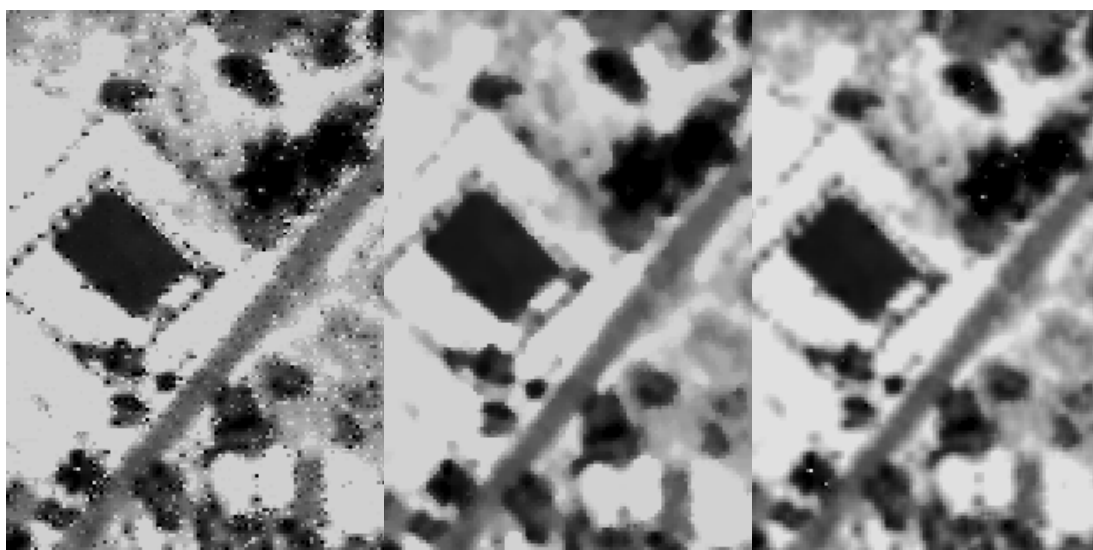


**Figura 3: Desplazamiento planimétrico observado entre los dos vuelos.**

García, M., Prado, E., Riaño, D., Chuvieco, E. y Danson, F. M. (2009): "Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 184-208. ISSN: 1578-5157

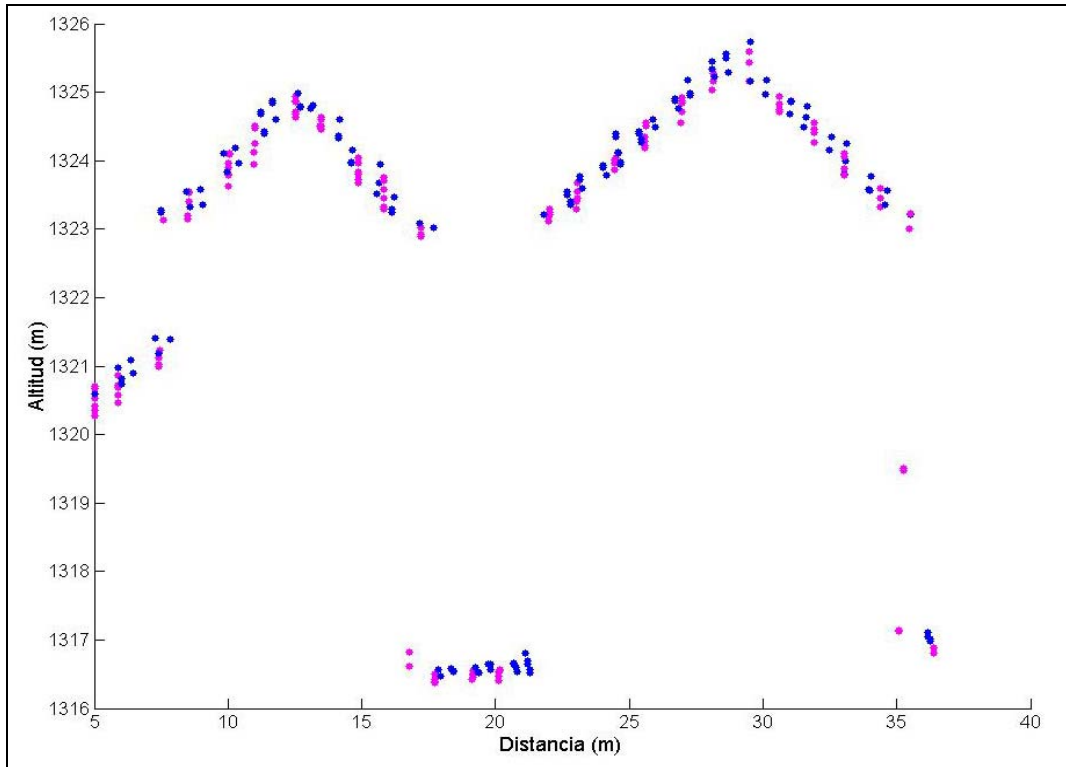


**Figura 4:** Ajuste relativo en Z entre los dos vuelos sobre una superficie llana (carretera).



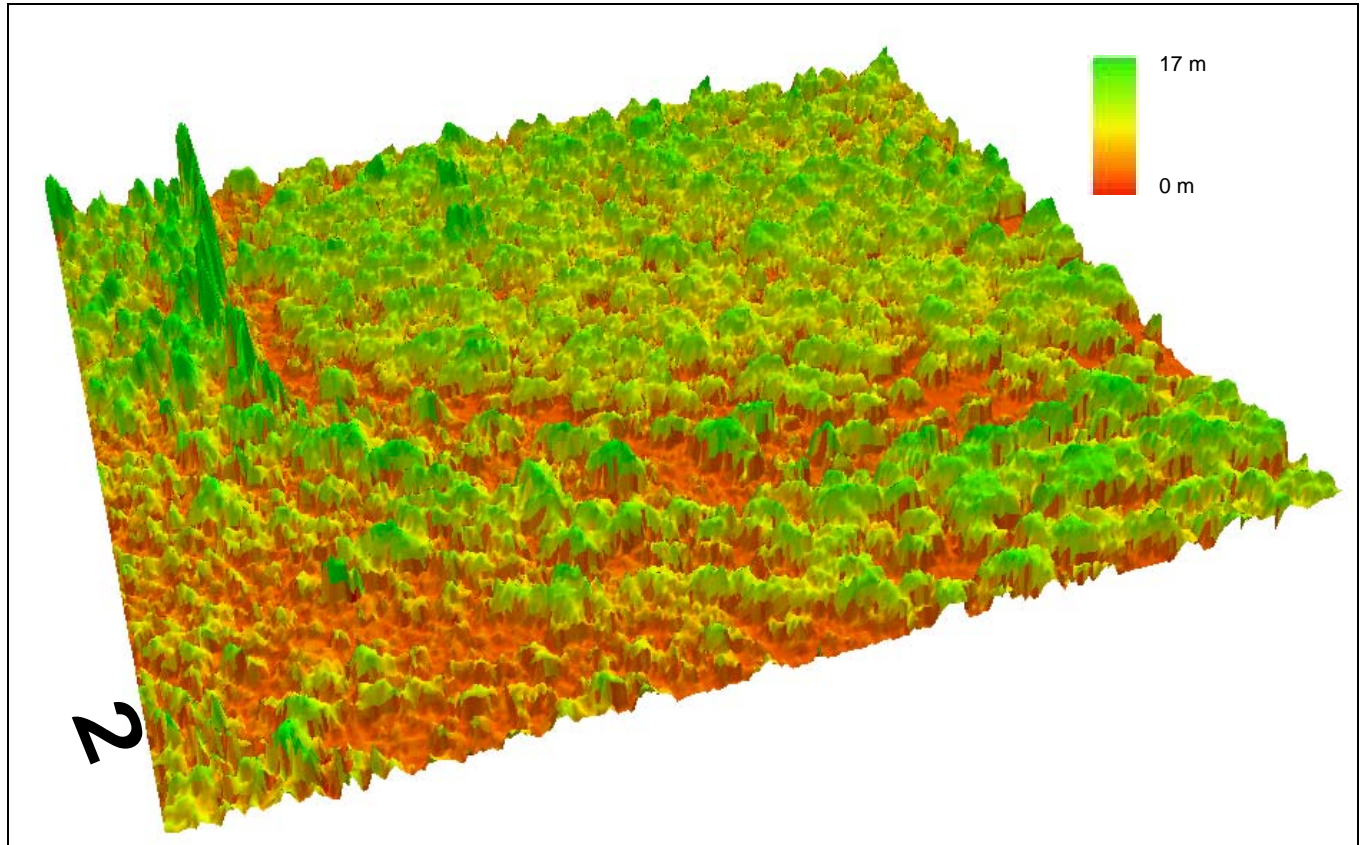
**Figura 5:** Imagen de intensidad original (izda.), con filtro de mediana (centro) y con filtro Lee SAR (dcha). Tamaño de ventana 3x3.

García, M., Prado, E., Riaño, D., Chuvieco, E. y Danson, F. M. (2009): "Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 184-208. ISSN: 1578-5157



**Figura 6: Perfil transversal una vez corregido el desplazamiento planimétrico entre los dos vuelos.**

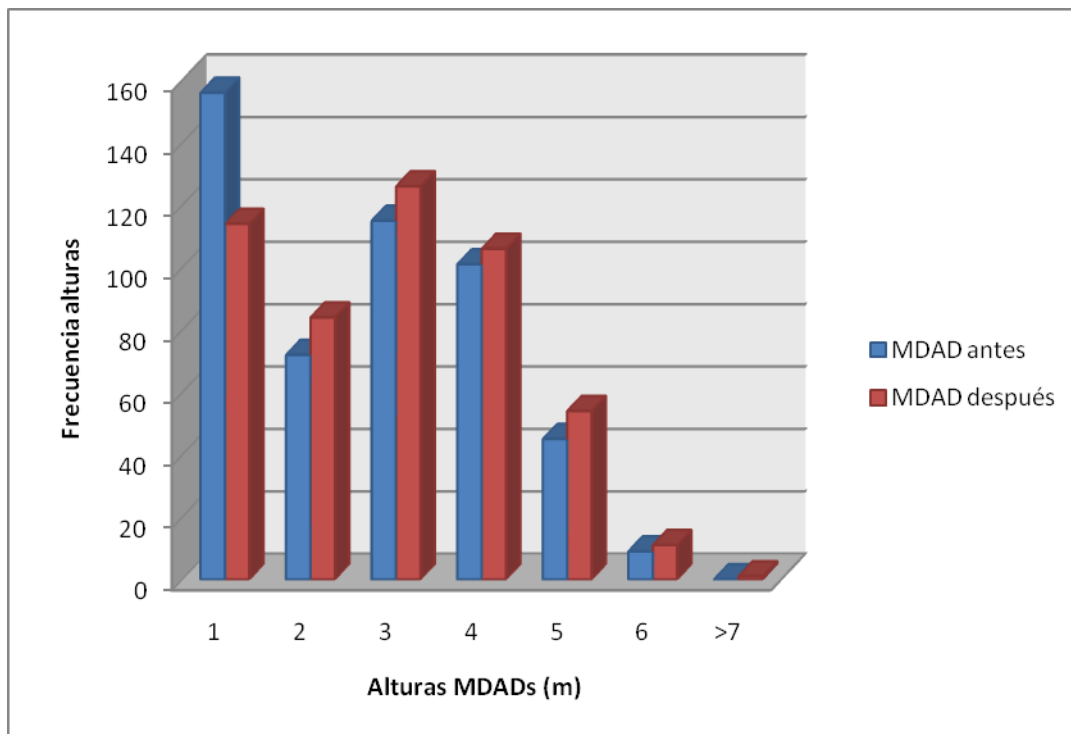
García, M., Prado, E., Riaño, D., Chuvieco, E. y Danson, F. M. (2009): "Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 184-208. ISSN: 1578-5157



**Figura 7: Modelo digital de altura del dosel (MDAD) generado después de ajustar los datos planimétricamente.**



García, M., Prado, E., Riaño, D., Chuvieco, E. y Danson, F. M. (2009): "Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 184-208. ISSN: 1578-5157



**Figura 8: Distribución de alturas observadas en los MDAD generados antes y después de ajustar los datos.**