



Artículo / Article

Mapecto del arbolado urbano con lidar aéreo

Urban tree mapping with aerial lidar

Fabiola Doracely Yépez Rincón¹ y Diego Fabián Lozano García²

Resumen

Los recientes avances en las tecnologías de sensores remotos han hecho posible que algunas características físicas de la vegetación sean estimadas con mayor rapidez y permiten distinguir las especies del arbolado urbano y analizar su distribución en el espacio y tiempo, lo cual resulta en mejoras notables de precisión cartográfica. En el presente trabajo se utilizaron datos de LIDAR aéreo para estimar la altura y el diámetro de copa de árboles individuales en un área urbana al sur de Monterrey a fin de diseñar un método eficiente para cartografiar el arbolado de las ciudades. Se usaron dos técnicas de extracción: 1) diseño de filtros semiautomatizados para los puntos asociados a la vegetación y 2) uso de líneas de contorno sobre un modelo digital de superficie. Los resultados se verificaron con la información de campo que se obtuvo durante el mismo periodo mediante el empleo de métodos tradicionales de medición forestal, lo que se realizó en 57.80 ha y se contabilizaron 2 575 árboles. El mapeo de las copas fue eficaz para 74.7 % de los individuos y se registró 6.4 % de error de medición en el geoposicionamiento e inventario. Se observó una eficacia similar entre el muestreo en campo y la nube de puntos de LIDAR aéreo ($xy=0.70m$; $z=0.10m$), de acuerdo con el análisis de regresión lineal de alturas ($R^2=0.885$) y del ancho de copa ($R^2=0.902$). Las mejores estimaciones fueron en *Quercus shumardii* (95 %) y *Quercus vaseyana* (94 %).

Palabras clave: Cartografía, dendrometría, gestión urbana, LIDAR, modelos digitales, sensores remotos.

Abstract

Recent advances in remote sensing technologies enable rapid estimation of some physical characteristics of the vegetation, as well as to distinguish species of urban trees and analyze spatiotemporal distribution, which results in significant improvements in mapping accuracy. By using aerial LIDAR data, height and crown diameter of individual trees were estimated in an urban area south of Monterrey, Mexico in order to design an efficient mapping methodology for urban trees. 1) semi-automathized design filters for extracting points associated vegetation and 2) use of contour lines on a digital surface model, two extraction techniques were used. The results were verified with field data obtained during the same period belonging to the Arboretum project *Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey*, and obtained with traditional methods of forest measuring 57.80 hectares with 2 575 trees reported. Canopy mapping was efficient for the 74.7 % of individuals despite registering a 6.4 % measurement error in geoposition and inventory measurements according to the comparison of the position and crown width LIDAR data versus 2010 inventory. Results showed similar efficacy between field sampling at the point cloud and aerial LIDAR ($x = 0.70m$, $z = 0.10m$) according to linear regression analysis of height ($R^2=0.885$) and crown width ($R^2=0.902$). The best estimates were for *Quercus shumardii* (95 %) and *Quercus vaseyana* (94 %).

Key words: Cartography, dendrometry, urban management, LIDAR, digital models, remote sensing.

Fecha de recepción/date of receipt: 1 de julio de 2013; Fecha de aceptación/date of acceptance: 15 de abril de 2014.

¹ Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey, Ciencias de Ingeniería, Sistemas Ambientales y Energía.

Correo-e: fabiolayepes@gmail.com

² Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey, Centro de Calidad Ambiental, Laboratorio de Sistemas de Información Georreferenciada.

Introducción

La vegetación urbana desempeña funciones fundamentales en la calidad de vida de los habitantes de las ciudades (Zhangab *et al.*, 2010; Rivera, 2012); por ello su manejo, conservación, gestión además de la reforestación representan un gran reto para las metrópolis que desean mejorar el medio ambiente y el entorno ecológico (Bradley, 1989; Moll y Ebenreck, 1989) y es un recurso clave para obtener beneficios locales y globales (Linn, 1983).

Una correcta gestión de las áreas verdes que involucre al arbolado urbano requiere de cartografía detallada para lograr identificar parámetros a nivel individual. Este grado de información generalmente se crea a través de la fotointerpretación de fotografías aéreas o por medio de inventarios de campo, lo que resulta en un alto consumo de tiempo y requiere de personal capacitado y con poca rotación para evitar errores (Renaud *et al.*, 2007).

El sistema LIDAR (*Light Detection and Ranging*) es una herramienta tecnológica para crear información 3D con utilidad y eficacia demostrada (Benhamu y Doytscher, 2003; Kauffman y Steudler, 1998; Larsson, 1991; Stoler, 2000; Stoler y Salzmann, 2003), para caracterizar la superficie y cobertura del suelo (Bergen *et al.*, 2009) y resolver mediciones forestales (Lefsky, 1997; Parker, 1995). Avances recientes han demostrado que con LIDAR se puede conocer la distribución espacio-temporal de las distintas especies de árboles urbanos según Small (2001) y estimar las características físicas de la vegetación (Tookey *et al.*, 2009). Entre los estudios sobre estimación de la altura de los árboles individuales con LIDAR destacan los realizados por Kwak *et al.* (2007), Magnussen *et al.* (1999) y Naesst (1997); mientras que estudios enfocados a la extracción de datos para calcular el dosel del género *Quercus* han sido registrados por Jones *et al.* (2011).

Como parte de su política ambiental para impulsar el desarrollo sostenible, el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores Monterrey (ITESM) generó el proyecto "Arboretum" en 2003, como un propósito de sostenibilidad para la gestión del arbolado y que se basa en un Sistema de Información Geográfica (SIG) con el inventario de los árboles del Campus Monterrey; en él se espera integrar la información que se genere con los datos LIDAR. En la actualidad, el Campus tiene un área total de 57.80 ha, de las cuales 39.31 % corresponde a los jardines que conforman el área verde, que en 65.76 % están cubiertas por las copas de los árboles, cuyas dimensiones varían de 0.80 a 26.20 m en diámetros y alturas de 1.03 a 25.60 m. El arbolado se compone de 19 especies nativas (959 árboles) y 39 introducidas (1 616 árboles), que en conjunto propician un paisaje agradable en el lugar, contribuye a la captura de bióxido de carbono, y brinda un hábitat a diversas especies silvestres de la región que han quedado

Introduction

Urban vegetation plays key roles in the quality of life of the inhabitants of the cities (Zhangab *et al.*, 2010; Rivera, 2012); therefore, its management, conservation and reforestation are also a major challenge for cities that want to improve the environment and the ecological environment (Bradley, 1989; Moll and Ebenreck, 1989) and is a crucial resource for local and global benefits (Linn, 1983).

A right administration of the green areas that involves the urban woodland demands detailed cartography in order to accomplish to identify parameters at an individual level. This degree of information generally is created through the interpretation of aerial photointerpretation or by means of field inventories, which results in a high time consumption and demands trained personnel and with almost no rotation in order to avoid mistakes (Renaud *et al.*, 2007).

The LIDAR (Light Detection and Ranging) system is a technological tool to create 3D information useful and proven (Benhamu and Doytscher, 2003; Kauffman and Steudler, 1998; Larsson, 1991; Stoler, 2000; Stoler and Salzmann, 2003) to characterize the surface and ground cover (Bergen *et al.*, 2009) and resolve forest measurements (Lefsky, 1997; Parker, 1995). Recent advances have shown that LIDAR can know the spatiotemporal distribution of the various species of urban trees according to Small (2001) and estimate the physical characteristics of vegetation (Tookey *et al.*, 2009). Among the studies on estimating the height of individual trees with LIDAR are included those by Kwak *et al.* (2007), Magnussen *et al.* (1999) and Naesst (1997); while studies focused on the extraction of data to calculate the canopy of the genus *Quercus* have been recorded by Jones *et al.* (2011).

As part of its environmental policy for sustainable development, the *Instituto Tecnológico de Estudios Superiores Monterrey* (ITESM) generated the "Arboretum" project in 2003 as a purpose of sustainable woodland management and is based on an geographic information system (GIS) with the inventory of the trees of the *Monterrey Campus*; it is expected to integrate the information generated with LIDAR data. Currently, the Campus has a total area of 57.80 ha, of which 39.31 % are gardens that make up the green area, 65.76 % of which are covered by the treetops, whose dimensions vary from 0.80 to 26.20 m in diameter and height of 1.03 to 25.60 m. The woodland consists of 19 native species (959 trees) and 39 introduced (1 616 trees), which together foster a pleasant landscape in place, helping to capture carbon dioxide, and provides a habitat for various species of wild region have been confined to the few and small green spaces of the metropolis. The most common tree species on campus are ash (*Fraxinus americana* L.) and evergreen oak (*Quercus fusiformis* Small).

confinadas a los pocos y reducidos espacios verdes de la metrópoli. Las especies forestales más frecuentes en el campus son el fresno (*Fraxinus americana* L.) y el encino siempre verde (*Quercus fusiformis* Small).

El objetivo general de este trabajo fue estimar la altura y el tamaño de la copa en un arbolado urbano con datos LIDAR de mediana resolución (0.70 m) a partir de filtros basados en tres variables generadas. Los objetivos específicos consistieron en: identificar variables e intervalos de valores de los datos LIDAR que permitan agrupar umbrales para la segmentación de la nube de puntos en clases; generar filtros que favorezcan la segmentación de la nube de puntos en vegetación arbórea, edificios, suelo, pavimentos e infraestructura; elaborar una capa de información con la ubicación de los árboles individuales mediante el cálculo del valor de la altura y copas individuales de los árboles; y finalmente, comparar los resultados obtenidos con los datos LIDAR con mediciones de campo, para estimar la precisión del uso de la herramienta.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El polígono graficado en la Figura 1 corresponde al ITESM Campus Monterrey e incluye las áreas deportivas y el estadio Tecnológico.

Datos del inventario forestal

El inventario se ha actualizado mediante la toma de datos en campo en 2006, 2009 y 2010; la información que se utilizó corresponde al último año y se obtuvo entre noviembre de 2010 y febrero de 2011 por dos brigadas de campo. Para cada árbol se consideraron las siguientes variables: altura, diámetro a la altura del pecho (DAP), diámetro de copa del árbol, factor de riesgo, cavidades en el tronco, declinación del árbol y fenología. Para las mediciones se utilizó un hipsómetro Vertex IV y un LaserAce 2D/3D; para el DAP una cinta diamétrica (*Forestry Suppliers*) y para el diámetro de copa, densiómetro GRS (*Geografic Resource Solutions*) y una cinta Lufkin 1850MM de 50 metros de longitud (diámetro norte-sur y este-oeste).

En comparación con los inventarios realizados en la ciudad de Monterrey, el campus cuenta con 70 % de las especies registradas por Reséndiz (2003), las cuales corresponden a 29 familias, 13 nativas y 16 introducidas, con 16 y 34 géneros respectivamente. La altura promedio de las nativas fue de 8.84 ± 2.99 m y la máxima de 19.20 m (un ejemplar de la familia Platanaceae, *Platanus mexicana* Moric); el diámetro de copa promedio fue de 7.40 ± 3.10 m y el máximo, de 20.20 m para la familia Fabaceae (*Acacia farnesiana* L. Willd.). Las introducidas tuvieron una altura promedio de 9.69 ± 3.83 m, la

The overall objective of this study was to estimate the height and size of the crown in an urban woodland with LIDAR data medium resolution (0.70 m) from variables generated based on three filters. The specific objectives were to: Identify variables and ranges of values of the LIDAR data to group thresholds for segmentation of the point cloud into classes. In generating filters that favor segmentation point cloud tree vegetation, buildings, floor, flooring and infrastructure. Similarly, to develop an information layer with the location of individual trees by calculating the value of the height and individual treetops, and finally, compare the results obtained with LIDAR data with field measurements to estimate the accuracy the use of the tool.

Materials and Methods

Study area

The polygon plotted in Figure 1 corresponds to the ITESM Campus Monterrey and includes sports facilities and the Technological stadium.

Forest inventory data

The inventory has been updated by taking field data in 2006, 2009 and 2010; the information that used corresponds to the last year and was obtained between November 2010 and February 2011 by two brigades of field. For each tree the following variables were considered: Height, diameter at breast height (DBH), tree crown diameter, risk factor, cavities in the trunk, tree decline and phenology: height, diameter at breast height (DBH). One Vertex IV hypsometer and 2D/3D Laser Ace were used for measurements; for DBH a diameter tape (*Forestry Suppliers*) and crown diameter, a GRS (*Geografic Resource Solutions*) densitometer and a tape Lufkin 1850MM 50 m in length (north-south and east-west diameter).

Compared with the inventories carried out in the city of Monterrey, the campus has 70 % of the species recorded by Reséndiz (2003), corresponding to 29 families, 13 native and 16 introduced, with 16 and 34 genera respectively. The average height of the native was 8.84 ± 2.99 m and a maximum of 19.20 m (a copy of the Platanaceae family, *Platanus mexicana* Moric), average crown diameter 7.40 ± 3.10 m and the maximum 20.20 m for the Fabaceae family (*Acacia farnesiana* L. Willd.). The introduced species had an average height of 9.69 ± 3.83 m; the maximum height corresponded to *Juglans nigra* L. of the Juglandaceae family, with 25.60 m in height, average crown diameter of 9.03 ± 4.74 m, and the largest crown accounted for *Fraxinus americana* L., of the Oleaceae family, with 26.20 m in diameter.

2010 LIDAR Data

The cloud of points that was used was obtained from a flight made on December 2010, in which a ALS50 Airborne Laser

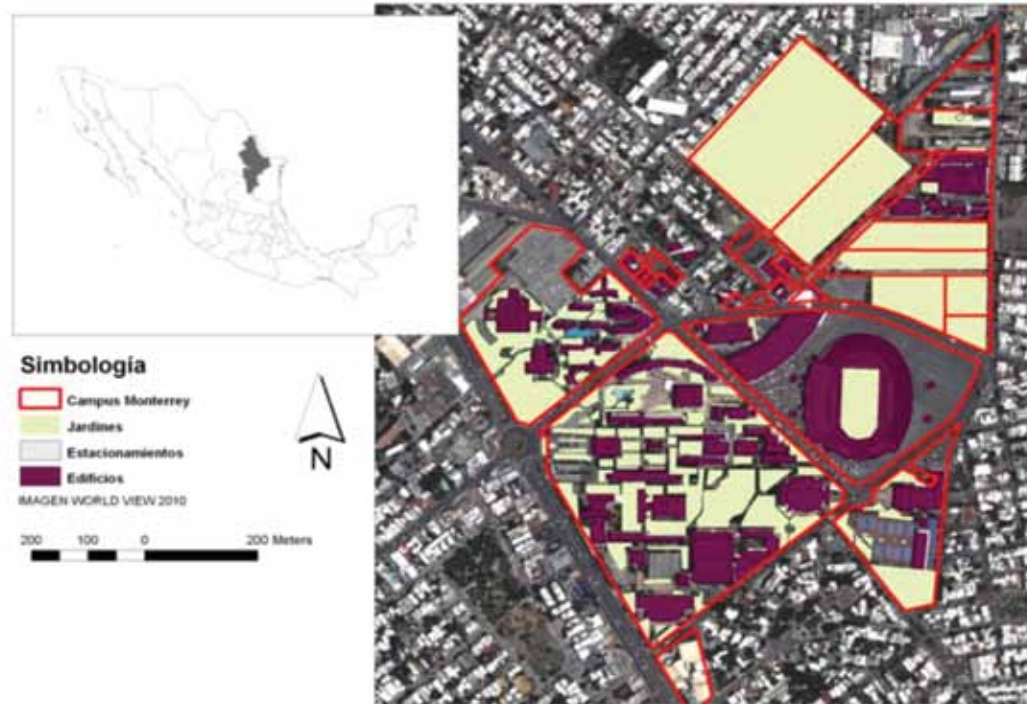


Figura 1. Localización del área de estudio.
Figure 1. Location of the study area.

altura máxima correspondió a la especie *Junglans nigra* L. de la familia Juglandaceae, con 25.60 m de altura, el diámetro de copa promedio fue 9.03 ± 4.74 m y la copa más grande correspondió a *Fraxinus americana* L, de la familia Oleaceae, con 26.20 m de diámetro.

Datos LIDAR 2010

La nube de puntos que se utilizó fue obtenida a partir de un vuelo de diciembre del 2010, en el cual se empleó un ALS50 Airborne Laser Scanner Phase 2+ de Leica, a resolución 0.70m (xy) y precisión vertical, de acuerdo al RMSE, de 0.10m (z).

Se incluyó la altitud (E) del terreno (msnm), la intensidad (I), que es el grado de reflectividad de los objetos en función de la longitud de onda utilizada por el LIDAR (0 a 255) y el número de retornos (R), 4 en total (Figura 2). La nube de puntos dentro del polígono fue extraída para analizar los datos en *tiles* (secciones) de 100 x 100 m.

Filtrado y Clasificación

La extracción de los datos de árboles de la nube de puntos LIDAR consistió en: a) filtrado, b) construcción de las medidas de altura y c) definición del tamaño de la copa (Figura 3). Se elaboró un filtro con los algoritmos disponibles en el programa MARS que

Scanner Phase 2+ Leica, at 0.70m (xy) resolution and vertical precision was used according to 0.10m (z) RMSE.

The elevation (E) of the land (masl), the intensity, the degree of reflectivity of objects according to the wave length used for LIDAR (0 to 255) and the number of returns (R), 4 in total (Figure 2). The cloud of points inside the polygon was extracted to analyze the data in 100 x 100 m tiles (sections).

Filtering and Classification

The extraction of the tree data of the cloud of LIDAR points included: a) filtering, b) build-up of height measures and c) definition of the size of the crown (Figure 3). A filter was made the available algorithms in the MARS program that in a semiautomatic procedure and was complemented with manual work to solve some errors.

The design of the filter was based in a combination of elevation ranges, according to the formula proposed to Meng *et al.* (2010), whose categories are: (i) bare soil, (ii) the objects over the ground and (iii) noise.

$$MS(\text{sensor}) = E(\text{soil}) + O(\text{no soil}) + N(\text{noise}) \quad (1)$$

Where:

MS = Measurements of the LIDAR sensor

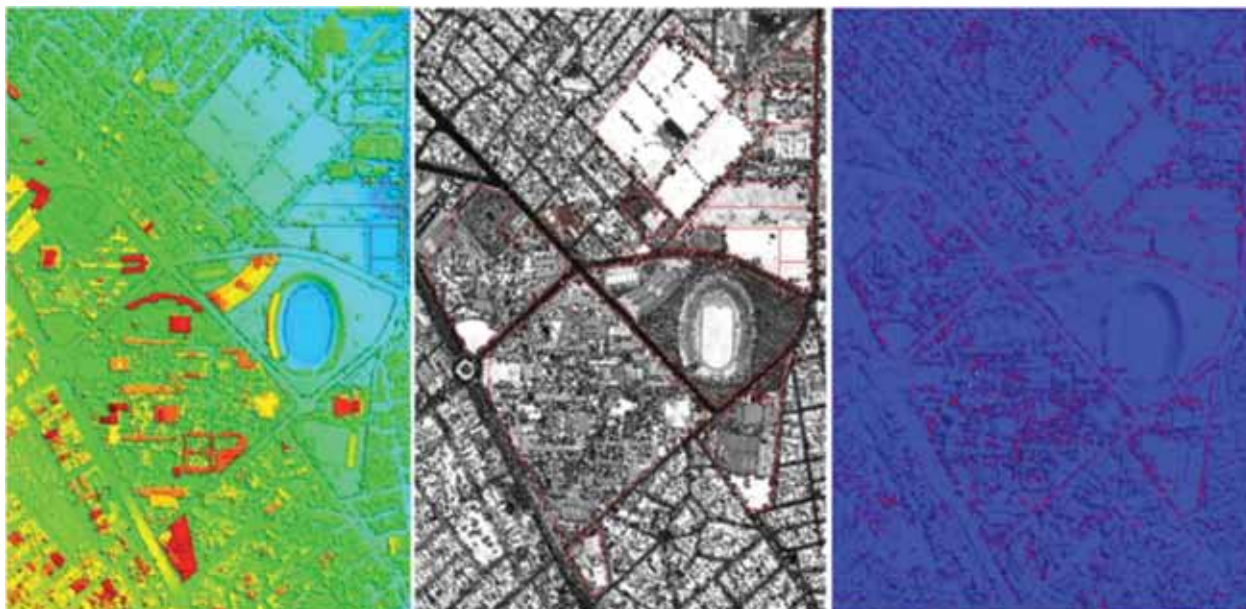


Figura 2. Nube de puntos que incluye la altitud, la intensidad y los retornos.
Figura 2. Cloud of points that includes elevation, intensity and returns.

en un procedimiento semiautomático fue complementado con trabajo manual para solventar algunos errores.

El diseño del filtro se basó en una combinación de intervalos de altitud, de acuerdo con la fórmula propuesta por Meng *et al.* (2010), cuyas categorías son: (i) el suelo desnudo, (ii) los objetos sobre el suelo y (iii) el ruido.

$$MS \text{ (sensor)} = E \text{ (suelo)} + O \text{ (no suelo)} + N \text{ (ruido)} \quad (1)$$

Donde:

MS = Mediciones del sensor LIDAR
 E = Altitud del suelo
 O = Altura de los objetos sobre el suelo
 N = Ruido o mediciones de objetos no deseados (aves, cableado, etc.)

La representación matemática de la superficie terrestre es la más simple y se describe con la ecuación siguiente, propuesta por Cayley (1876) y modificada por Hengl y Reuter (2008):

$$z = f(x, y) \text{ o bien } z = f(s) \quad (2)$$

Donde:

z = Altitud (depende de coordenadas planares, como x e y)

E = Soil elevation
 O = Height of the objects over the ground
 N = Noise or measurements of non-desired objects (birds, cables, etc.)

The mathematical representation of the ground surface is the most simple and is described by the following equation proposed by Cayley (1876) and fitted by Hengl and Reuter (2008):

$$z = f(x, y) \text{ o bien } z = f(s) \quad (2)$$

Where:

z = Elevation (depends on planar coordinates, like x and y)

Data extraction by individual

The classified cloud of points allows to extract information from the corresponding points to trees but measurements are not automatic; in that regard, the data are exported in an ESRI- Ascii GRID format with a cell size of 0.5 m (Figure 3). The digital model of the land (DTM) was built with the soil classes and pavement and the corresponding to buildings and vegetation was exported in the same format to obtain a digital model for surface (DSM).

The DSM value was extracted cell by cell from DTM, and the heights digital model was made (DHM). This procedure was applied too for the cloud of points, with the vegetation basis and cell height of 0.5 cm; thus were formed the bordering lines of the tree crowns directly and an information layer (shape) which



Extracción de datos por individuo

La nube de puntos clasificada permite extraer información de los puntos correspondientes al arbolado, pero las mediciones no son automáticas; para ello los datos se exportaron en formato ESRI- Ascii GRID, con un tamaño de celda de 0.5 m (Figura 3). El modelo digital del terreno (DTM) se construyó con las clases de suelo y pavimento, y la correspondiente a los edificios y vegetación se exportó en el mismo formato para obtener el modelo digital de superficie (DSM).

El valor de DSM se sustrajo celda por celda desde el DTM, y se generó el modelo digital de alturas (DHM). Este procedimiento se aplicó también para la nube de puntos, con la clase de vegetación y altura de celda de 0.5 cm; así se formaron las líneas de contorno de la copa de los árboles de manera directa y se obtuvo una capa de información (*shape*) que se refiere al modelo digital del dosel (CDM) para conocer las medidas del dosel por individuo. Se tomaron la altura y el ancho de copa mayor de cada uno de los 260 ejemplares muestreados. Se realizó un análisis de regresión lineal con base en los resultados inventariados con técnicas de campo.

refers to the canopy digital model (CDM) which is the digital model of the canopy to know the measures of the crown by individual. Height and the width of the main crown were taken from each one of the 260 sampled trees. A linear analysis was made based upon the inventoried results with field techniques.

Office measurements. 261 trees were selected (10 % of the total number) from the *Arboretum* to validate the analysis of the LIDAR data. Measures were taken with MARS and were integrated to the data base of the Inventory, for which two columns were added with heights (ALT10 _ LIDAR and COPI0 _ LIDAR); the elevations and the width of the crown were edited with ArcGIS 9.3. (ESRI, 2003).

Error. A 0.70 error margin was considered for the crown width and of 0.10 m for height, from the resolution due to the accuracy of the LIDAR data. The errors in the data filtering were fitted manually with the 3D MARS tools, as the Adjustable Profile Line Tool allowed to value some elements that produced noise in the border lines, an example of which are the cars within the parking lots.

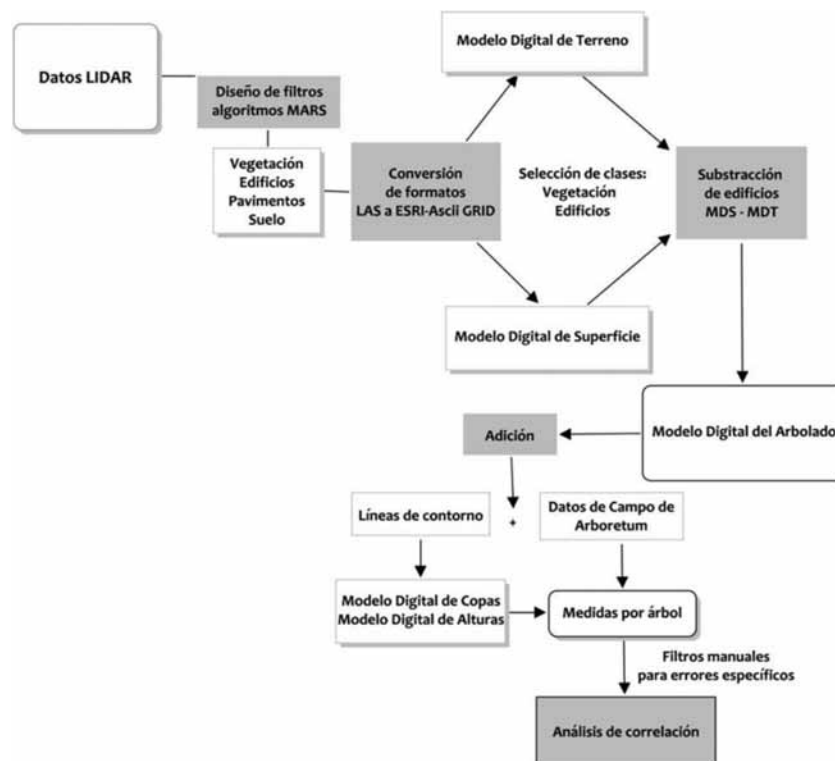


Figura 3. Esquema del modelo para extracción de copas por árbol.

Figure 3. Scheme of the model for the extraction of crowns per tree.

Mediciones en gabinete. Se seleccionaron 261 árboles (10 % del total) del Arboretum para validar los resultados del análisis de datos LIDAR. Las medidas fueron tomadas con MARS y se integraron a la base de datos del Inventario, para lo cual se agregaron dos nuevas columnas con las alturas (ALT10 _ LIDAR y COPI0 _ LIDAR); las altitudes y el ancho de copa se editaron con ArcGIS 9.3. (ESRI, 2003).

Error. Se consideró un margen de error de 0.70 para el ancho de copa y de 0.10 m para la altura, dada la resolución debido a la precisión de los datos LIDAR. Los errores en el filtrado de datos fueron ajustados de forma manual con las herramientas de MARS en 3D, como la Herramienta de Línea Ajustable de Perfil (*Adjustable Profile Line Tool*) que permitió valorar algunos elementos que generaron ruido en las líneas de contorno, un ejemplo de ello son los coches dentro de los estacionamientos.

Resultados

En el mapa de clasificación (Figura 4) se incluyeron las distintas clases filtradas: la 1 representa edificios que se clasifican en distintos tipos, en función de su densidad (color guinda); la 2 comprende la vegetación (color verde) y su tono depende de la intensidad, y la 3 corresponde a los suelos (color beige-café). La extracción de datos por clase facilitó visualizar las copas de los árboles (Figura 4).

Con un acercamiento a la zona de estudio es posible observar cada árbol (Figura 5). El filtrado permitió localizar geográficamente al 97.6 % de los individuos para su comparación con los datos registrados por el Arboretum; hubo casos en los que las líneas de contorno de las copas no se cerraron, lo cual redujo la eficiencia a 74.7 %; se validó hasta 99 % de los datos durante el manejo de la nube de puntos, aunque cerca de 6.4 % de ellos presentaron errores mayores y se requirió un re-muestreo en ejemplares adultos. Los datos corroborados arrojaron una reducción del error de 2.3 %.

Los errores específicos de filtrado promovieron que algunos elementos (como los automóviles) generaran ruido al trazar las líneas de contorno, en las figuras 6 y 7) se presentan los retornos de los árboles (verde) y de los automóviles (blanco), también hubo objetos con forma redonda (como antenas parabólicas) que generaron errores en las líneas de contorno debido a una confusión con los valores determinados para el filtrado de los individuos arbóreos como altura promedio y ancho de copa (Figura 7).



Results

In the classification map (Figure 4) the different filtered classes were included: number 1 refers to buildings that are ordered in different kinds, according to their density (purple color); 2 includes vegetation (green color) and its tone depends on intensity, and 3 refers to soils (beige to brown color). The extraction of data by class made it easier to see the crowns of the trees (Figure 4).

With an approach to the study area, it is possible to observe each tree (Figure 5). Filtering allowed to find 97.6 % of the individuals for their comparison to the recorded data by *Arboretum*; there were cases in the border lines of the canopy that did not close, which reduced the efficiency to 74.7 %; up to 99 % of the data during the management of the point cloud was validated, even though around 6.4 % of them had major errors and a resampling of adult trees was necessary. The confirmed data revealed 2.3 % of error reduction.

The specific filter errors promoted that some items (like cars) made noise when drawing contour lines. In figures 6 and 7 returns from trees (green) and automobiles (white) are shown; there were also round shaped objects (such as parabolic antennas) that produced errors in the contour lines due to a confusion with the determined values for the filtering of individual trees such as average height and crown width (Figure 7).

There were errors linked to the level of accuracy between the geographic position of the inventory and the centroids obtained with the layers of trees of the LIDAR data. Errors were compared by ranges (1 m to 5 m) between the point recorded for the tree in the data base of *Arboretum* and that produced by the contour lines with fitted errors (Figure 8).

In Figure 9 are shown the final results of the crowns and contour lines. The different families that make up the inventory, the green areas, the parking lots and the buildings can be appreciated within the limits of the Campus.

The measurements taken at the field and those obtained with the LIDAR data were analyzed and compared by linear regression, for which heights and crown diameter by individual tree were taken into account. In regard to both heights, the resulting line showed an 88 % correlation between them and in the case of the crown, correlation was 92 % (Figure 10). The relation between height and crown diameter by species of the *Quercus* and *Fraxinus* genera and other species as well (figures 11 and 12) were obtained too.



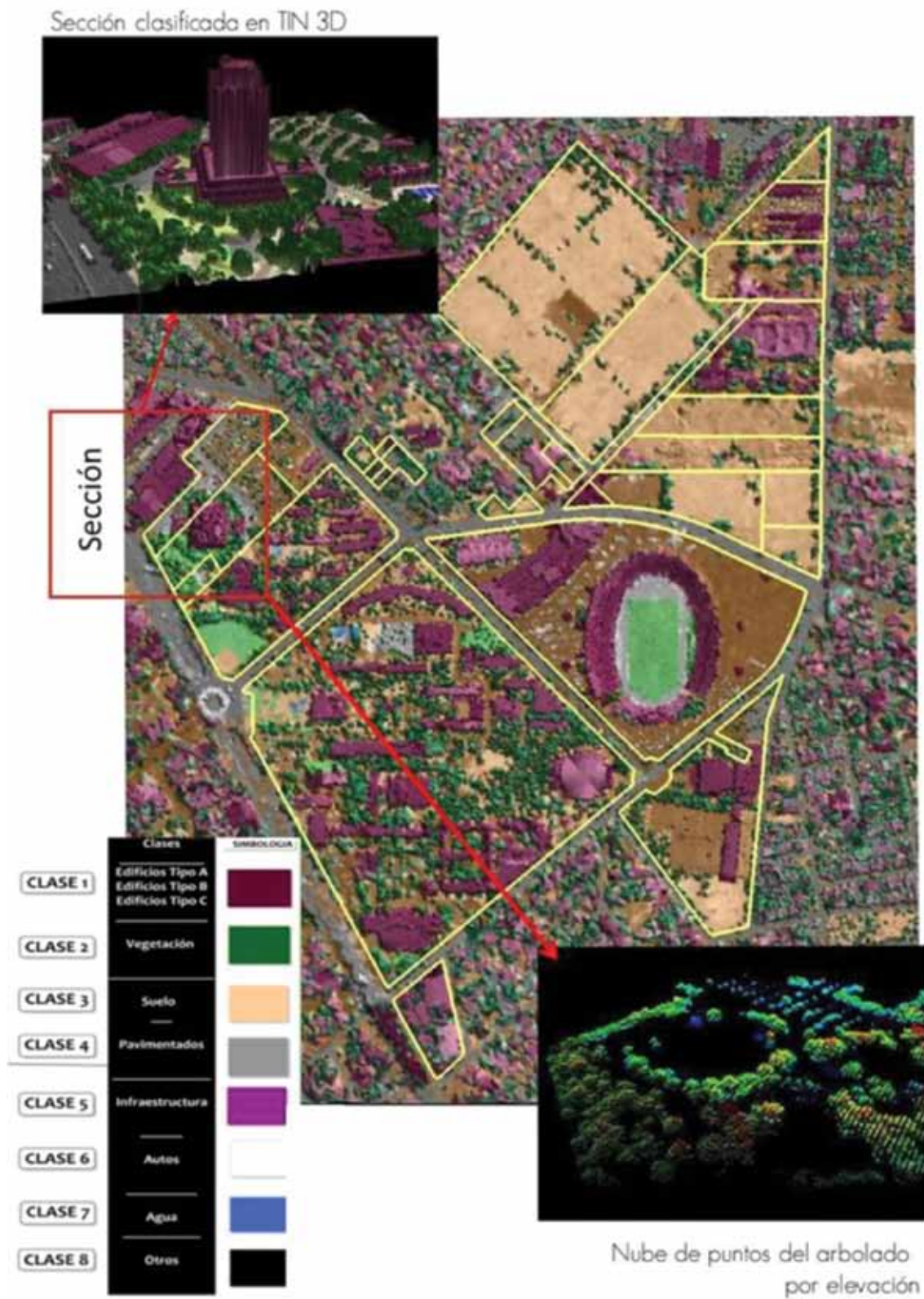


Figura 4. Datos clasificados en distintas clases y acercamiento con nube de puntos.
Figure 4. Data classified in different classes and approach with point cloud.

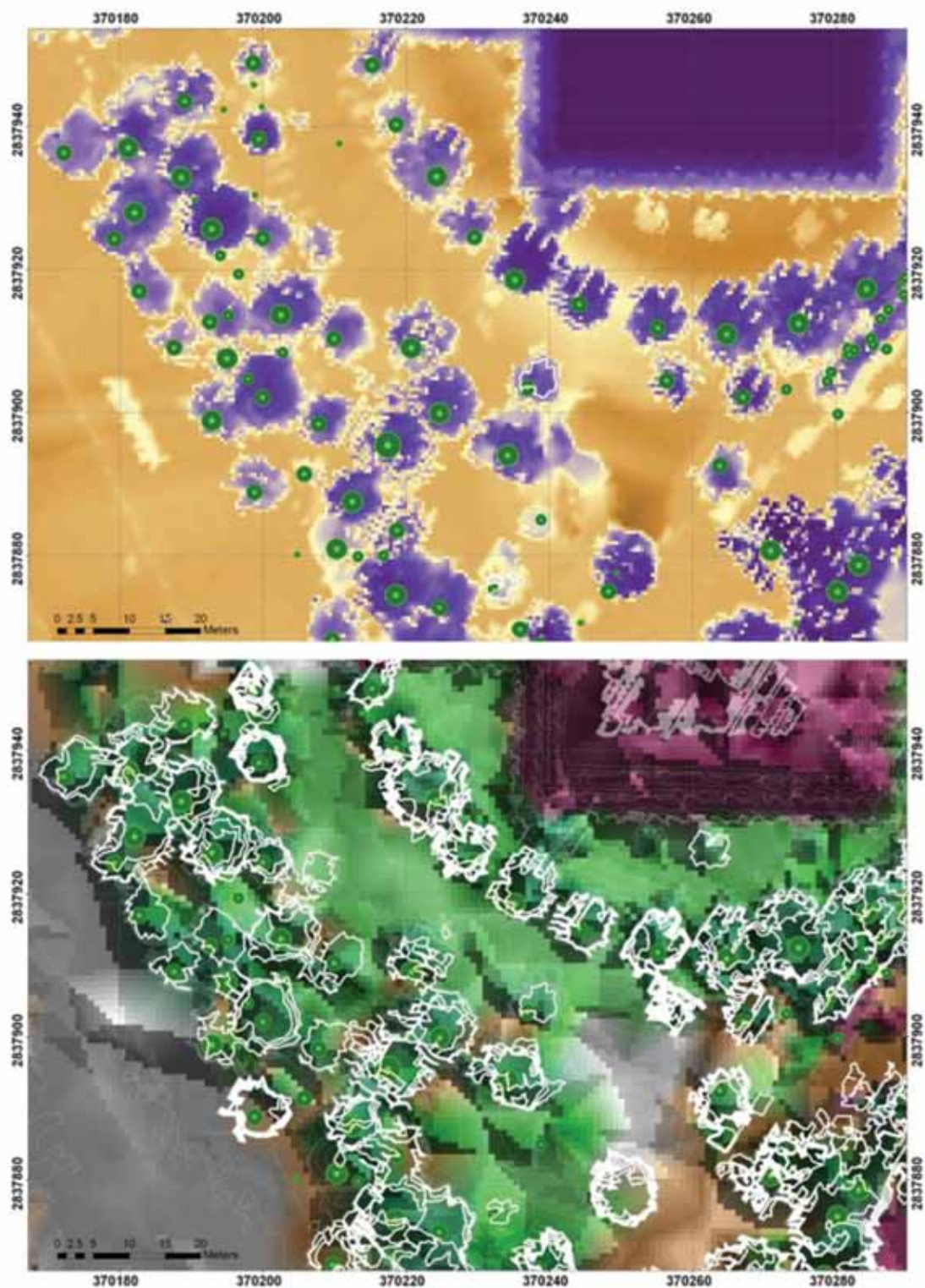


Figura 5. Modelo digital del arbolado (DAM) en metros (información del Arboretum)- parte superior; y clasificación en red irregular triangulada (*Triangulated Irregular Network, TIN*) con las curvas de nivel del dosel (*Canopy Contour Lines, CCL*) de los árboles muestreados -parte inferior.

Figure 5. Digital Model of trees (DAM) in meters (data from Arboretum)- upper part; and classification in Triangulated Irregular Network (TIN) with Canopy Contour Lines (CCL) of the sampled trees -lower part.

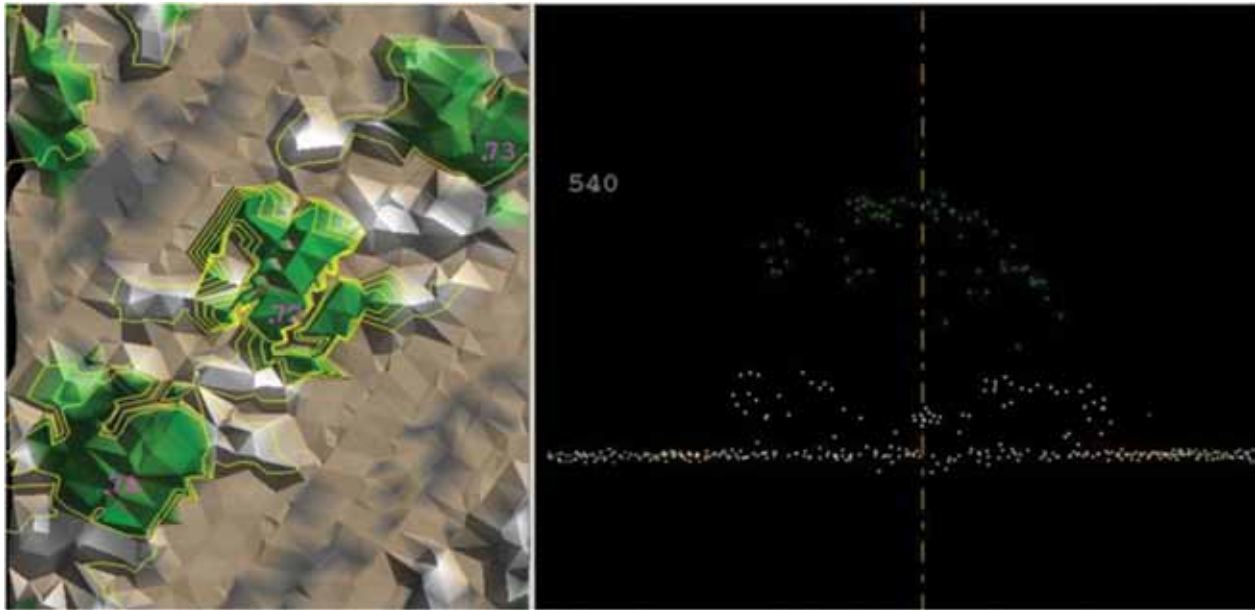


Figura 6. Ejemplo de retornos de árboles y automóviles y su confusión al crear las líneas de contorno.
Figure 6. Examples of tree returns and automobiles and their confusion when creating border lines.



Figura 7. Los automóviles y las antenas parabólicas representaron elementos de ruido para generar las clases y las líneas de contorno.
Figure 7. Automobiles and parabolic antennas are noise elements to generate the classes and border lines.

Hubo errores asociados al nivel de precisión entre el posicionamiento geográfico del inventario y los centroides obtenidos con las copas de los árboles de los datos LIDAR. Se compararon los errores por intervalo (de 1 m hasta los 5 m) entre el punto registrado para el árbol en la base de datos del Arboretum y el generado por líneas de contorno con errores corregidos (Figura 8).

The altitude, number of returns and the intensity were the variables used to build the semiautomatic filters that classify the LIDAR data; the profile fit line tool allowed to correct specific errors. Altitudes (masl) which were detected in the study area had a variation from 527 to 604 m with an average of 542 m. There were eight classes for the Campus: water, buildings, grass, pavement, bare soil, tree vegetation and scrub vegetation.



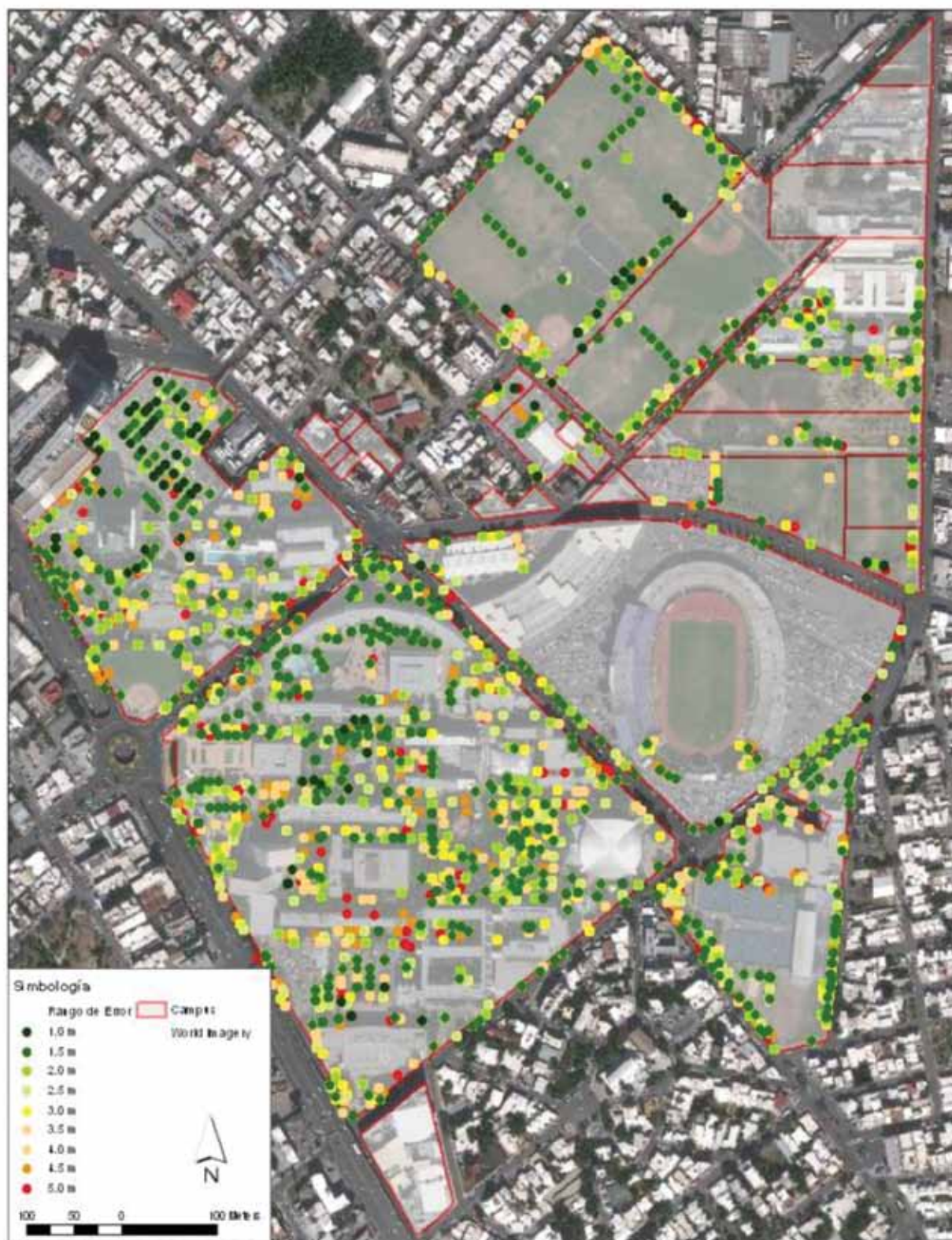


Figura 8. Intervalo de error en el geoposicionamiento del inventario por individuo.
Figure 8. Error range in the geopositioning of the inventory by individual trees.

En la Figura 9 se muestran los resultados finales de las copas y de líneas de contorno. Se pueden distinguir las diferentes familias que componen el inventario, las áreas verdes, los estacionamientos y los edificios dentro de los límites del Campus.

From an extraction model were separated the measures of the trees by individual; it consisted in dividing the land digital surface model and take out the information from the rest of the classes to generate a canopy digital model and another for heights.

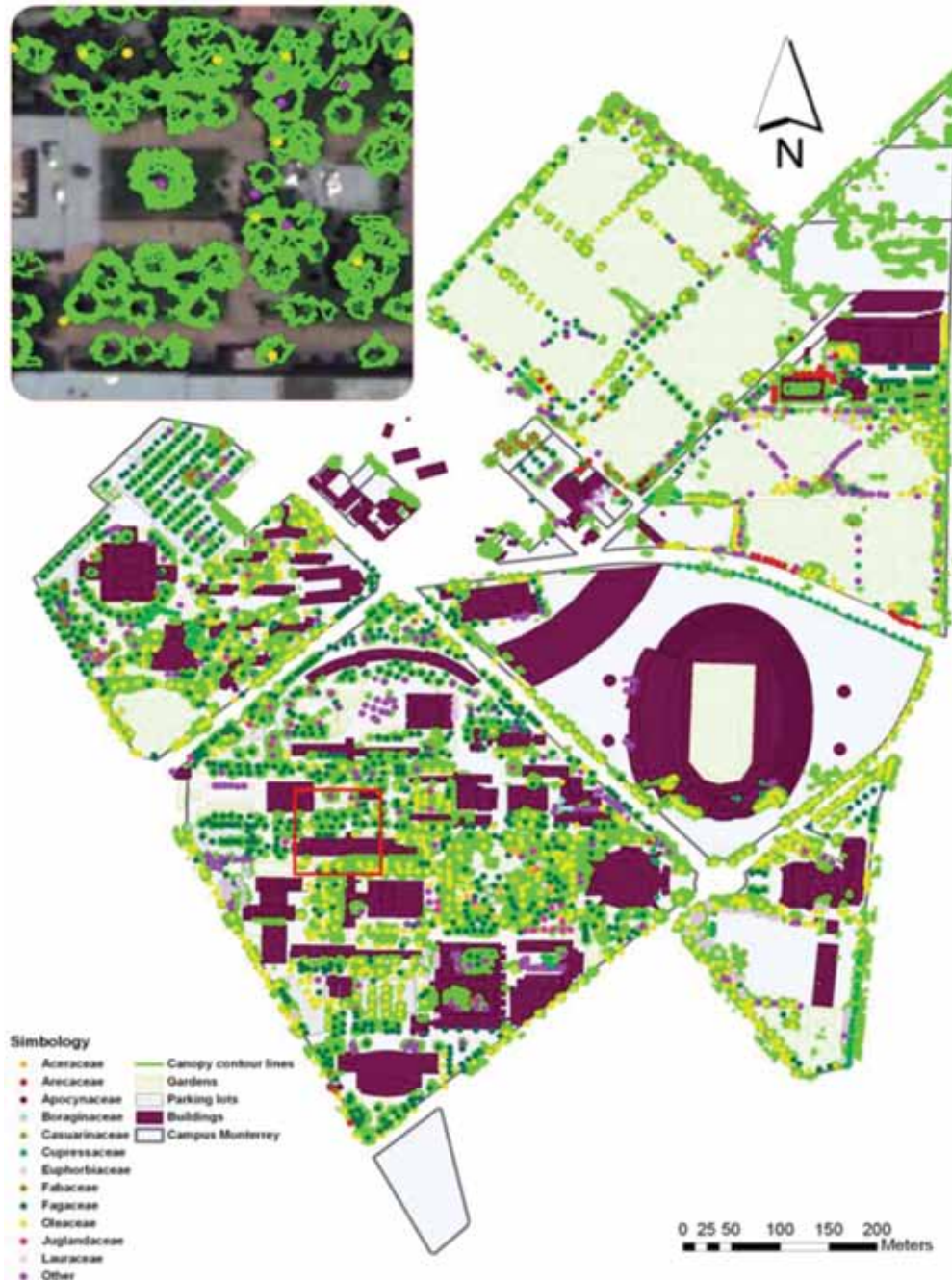


Figura 9. Ubicación de los árboles individuales (por familias) en el Campus Monterrey y áreas de copa (líneas de contorno) generadas con los datos LIDAR aéreo.

Figure 9. Location of the individual trees (by families) in Monterrey Campus and crown areas (contour lines) generated by aerial LIDAR data.

Las mediciones realizadas en campo y las obtenidas con los datos LIDAR fueron analizadas y comparadas mediante regresión lineal, para lo cual se consideraron las alturas y el diámetro de copa por individuo. Respecto a las dos alturas, la línea resultante mostró correlación de 88 % entre ellas y en el caso de la copa hubo correlación de 92 % (Figura 10). Se obtuvo la relación entre altura y diámetro de copa por especie en el género *Quercus* (Figura 11) y para *Fraxinus* y otras especies (Figura 12).

Error by type of methodology varied from 3.2 to 7.3 % and in the case of the data from LIDAR filtering, the error was 3 %, which can be attributed to the resolution of the information and to the supposed cartographic level.

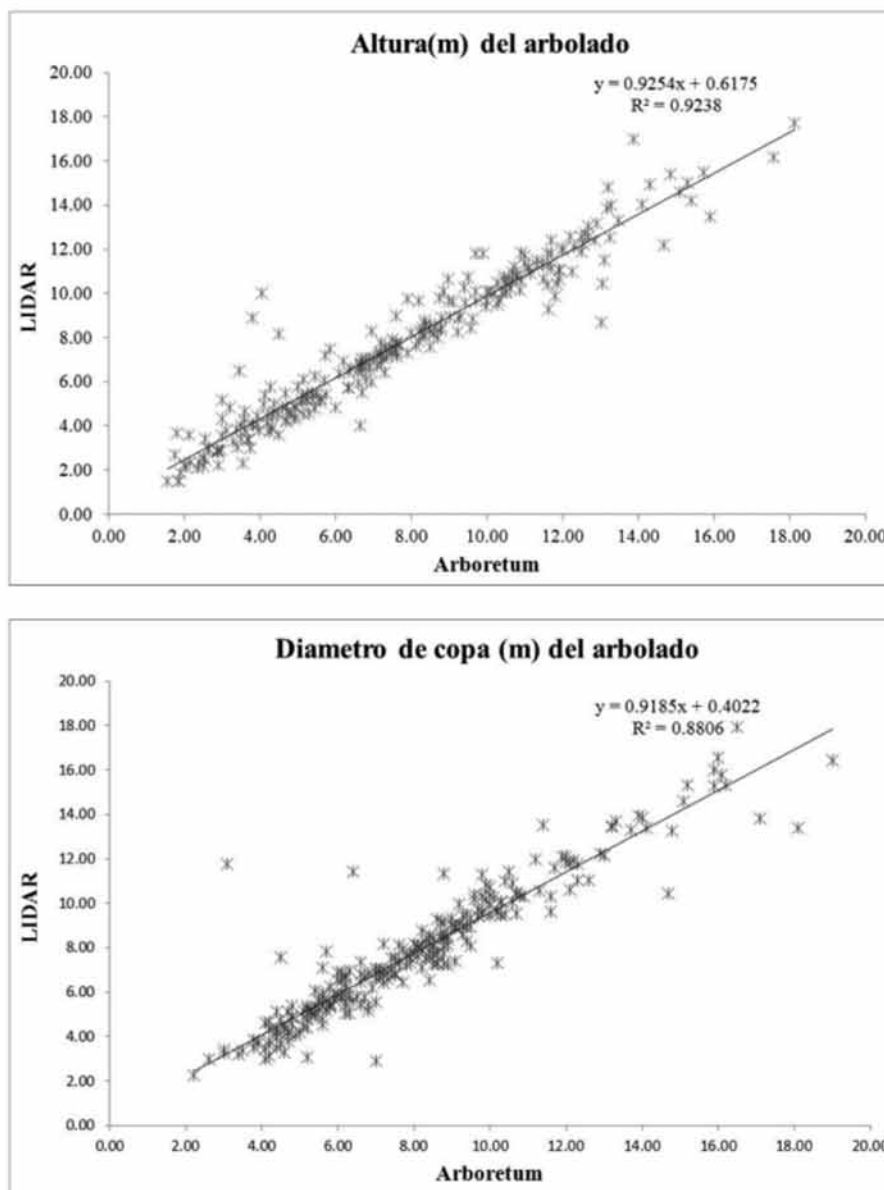


Figura 10. Relación entre la altura y el diámetro de copa para la muestra del inventario.
Figure 10. Relationship between height and crown diameter for the inventory sample.

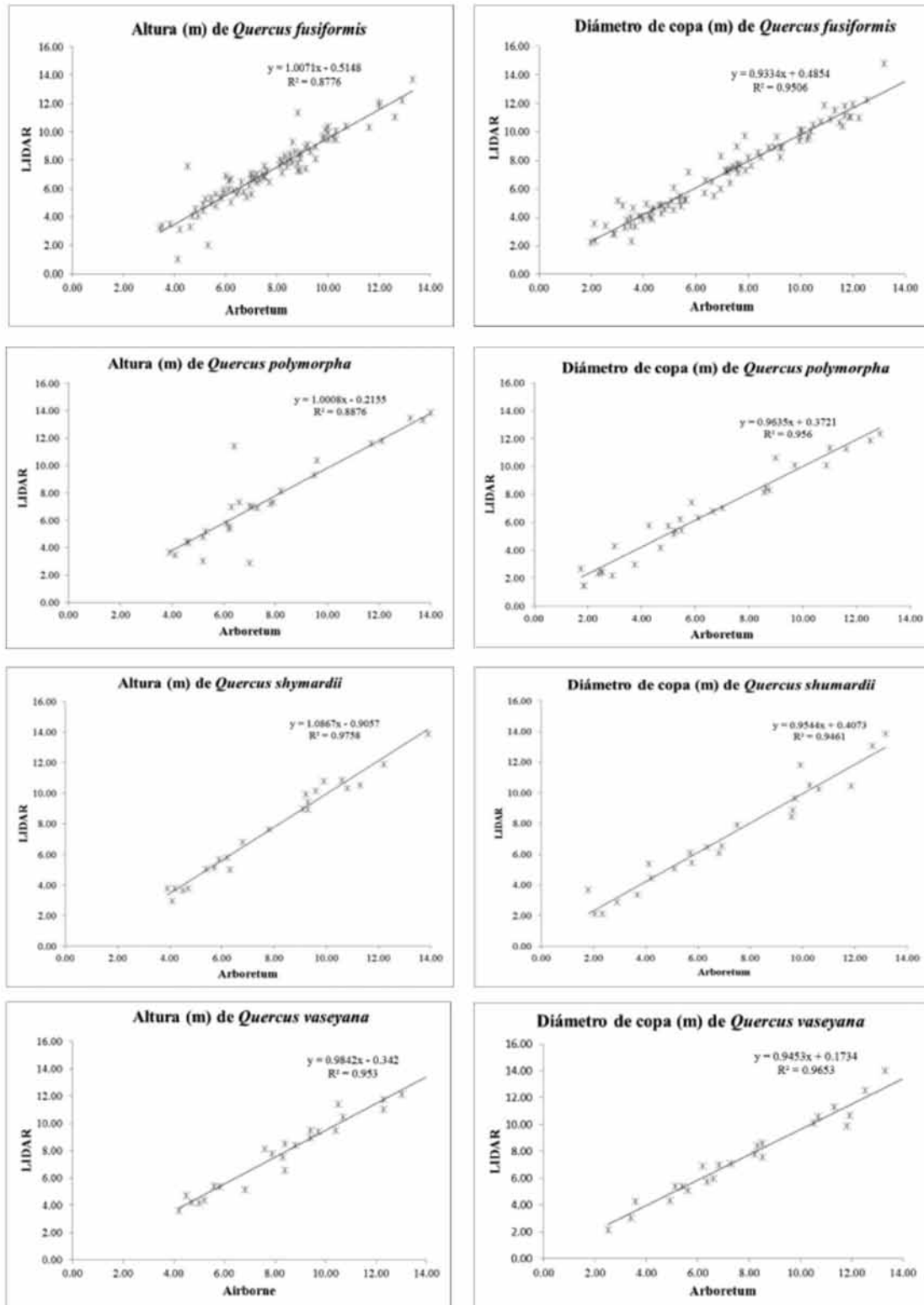


Figura 11. Relación entre los datos de campo y las mediciones con LIDAR aéreo para especies del género *Quercus* (cada estrella representa un individuo).

Figure 11. Relationship between field data and the aerial LIDAR measurements by species of the *Quercus* genus (each star represents an individual).

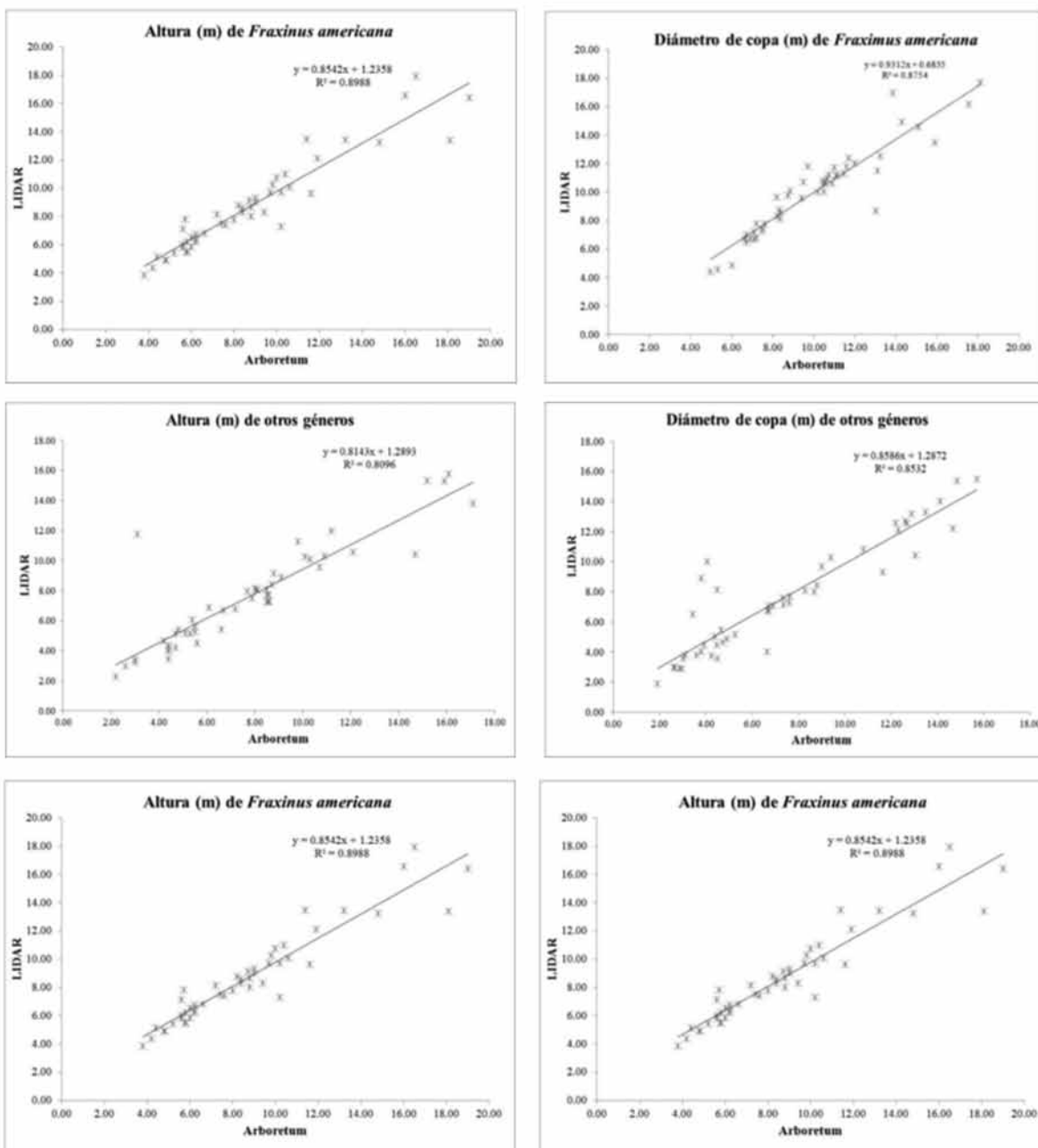


Figura 12. Relación entre los datos de campo y las mediciones con LIDAR aéreo para especies del género *Fraxinus* y otros géneros (cada estrella representa un individuo).

Figure 12. Relationship between field data and the aerial LIDAR measurements by species of the *Fraxinus* genus (each star represents an individual).

La altitud, el número de retornos y la intensidad fueron las variables que se utilizaron para construir los filtros semiautomáticos que clasificaron los datos LIDAR; la herramienta de línea ajustable de perfil permitió corregir errores específicos. Las altitudes (msnm) que se identificaron en el área de estudio tuvieron una variación de 527 a 604 m y el promedio fue

There was a difference of 5 % between the estimates made with LIDAR and the Arboretum, which could originate from metric values of the tree or updating trees removed because of a total of 2 613 individuals recorded in the 2010 inventory, 38 were removed for various reasons and at least half were not updated.

de 542 m. Se obtuvieron ocho clases para el Campus, que son agua, automóviles, edificios, pastos, pavimentos, suelo desnudo, vegetación arbórea y vegetación arbustiva.

A partir de un modelo de extracción se separaron las medidas del arbolado, por individuo; este consistió en dividir el modelo digital de terreno del modelo digital de superficie y sustraer la información del resto de las clases para generar un modelo digital de dosel y uno de alturas.

Los errores por tipo de metodología variaron de 3.2 a 7.3 % y en el caso de los datos obtenidos del filtrado LIDAR el error fue de 3 %, que se puede atribuir a la resolución de la información y al nivel cartográfico pretendido.

Hubo una diferencia de 5 % entre las estimaciones efectuadas con LIDAR y las del Arboretum, lo que pudo originarse a partir de los valores métricos del árbol o de la actualización de árboles removidos, ya que de un total de 2 613 individuos registrados en el inventario de 2010 se eliminaron 38 por distintas razones y, al menos, la mitad no estaban actualizados.

Los errores por morfología indican que las alturas de los ejemplares de especies introducidas son más precisas (7 %) que las de las nativas, lo que puede justificarse porque la densidad del follaje por especie (o su pérdida) depende de la estación del año (fecha de muestreo). La familia Fagaceae tuvo la mayor coincidencia, tanto en altura como en el de diámetro de copa, fue la más observada y mostró una correlación superior a 95 % en ambas bases de datos; la segunda fue Oleaceae y *Fraxinus* fue el género con mayor presencia. El género más representativo en el Arboretum fue *Quercus*, que se caracterizó por presentar líneas de contorno circulares y estratos conspicuos, lo que facilitó su identificación. Entre las especies, la relación más elevada en cuanto a las mediciones por altura fue para *Q. shumardii* Buckley (97.58 %) y *Q. vaseyana* Buckley (95.3 %) y por diámetro de copa para *Q. polymorpha* Schltdl. et Cham. (95.60 %) y *Q. vaseyana* (96.53 %) (Figura 11). *Fraxinus americana* tuvo los especímenes más grandes y es el segundo género con mejor relación al comparar las bases de datos con una $R^2 = 0.898$ para las alturas y $R^2 = 0.875$ para las copas (Figura 12).

Conclusiones

Los datos LIDAR procesados constituyen una herramienta eficaz para evaluar las medidas de diámetro de copa y alturas para 97 % de los árboles; las variables consideradas fueron útiles para clasificar distintos elementos de la superficie; el número de retornos (específicamente el *Single return*) representó el valor más adecuado para filtrar las copas en el Campus y la altitud fue crucial para las líneas de contorno.

Errors by morphology indicate that the heights of the samples of introduced species are more accurate (7 %) than those of the native, this can be justified because foliage density by species (or loss) depends on the season (sampling date). The Fagaceae family had the greatest coincidence, in the case of the height and the diameter of the crown, it was the most observed and showed a correlation above 95 % in both databases; the second was Oleaceae and *Fraxinus* was the genus with greatest presence. The most representative genus in the Arboretum was *Quercus*, which was characterized by circular contour lines and conspicuous strata, which facilitated their identification. Among species, the highest relation in terms of height measurements was *Q. shumardii* Buckley (97.58 %) and *Q. vaseyana* Buckley (95.3 %) and by crown diameter, *Q. polymorpha* Schltdl. et Cham. (95.60 %) and *Q. vaseyana* Buckley (96.53 %) (Figure 11). *Fraxinus americana* had the largest specimens and is the second kind with best relation when comparing databases with an $R^2 = 0.898$ for heights and $R^2 = 0.875$ for the crowns (Figure 12).

Conclusions

The processed LIDAR data are an efficient tool to assess the measurements of crown and heights for 97 % of the trees; the variables were useful to classify different elements of the surface area; the number of returns (specifically the Single return) had the most convenient value to filtrate the crowns in the Campus and altitude was crucial for the border lines.

Although the generation of digital elevation models and the formation of contour lines helped in mapping the treetops, there are still outstanding tasks to incorporate other data for species identification and estimation of volume, becoming evident that information worked for trees with widths larger than 2 m.

The incorporation of a statistical evaluation to relate the geometrical shape of the segments and the species could help conclude by species, as a tendency to their differentiation is observed in the forms of the *Quercus* genus.

The fusion with other remote sensing data as the use of high resolution multispectral images could help to make the inventory of the species by individuals and the use of terrestrial LIDAR could be helpful in the register of stems and branches for the calculation of volume and carbon sequestration by species. 

Acknowledgements

To the physical plant of ITESM Campus Monterrey and to the work group of Dr. Mario Manzano.

End of the English version

Aunque la generación de modelos de elevación digital y la formación de las líneas de contorno ayudaron al mapeo de copas de árboles quedan aún pendientes las tareas de incorporar otro tipo de datos para la identificación de especies y para el cálculo de volumen; haciéndose evidente que la información funcionó para árboles con anchos de copa mayores a los 2 m por lo que no funcionaría para algunas especies urbanas con menor altura.

La incorporación de una evaluación estadística que permita relacionar la forma geométrica de los segmentos y la especie podría ayudar a concluir por especie, pues se observa una tendencia a su diferenciación en las formas del género *Quercus*.

La fusión con otros datos de percepción remota como las imágenes multiespectrales de alta resolución podría ayudar a inventariar los individuos por especie, y el uso de LIDAR terrestre puede auxiliar en el levantamiento de troncos y ramas, para el cálculo de volumen y captura de carbono por especie. 🌿



Agradecimientos

A la planta física del ITESM Campus Monterrey y al grupo de trabajo del Dr. Mario Manzano.

Referencias

- Benhamu, M. and Y. Doytsher. 2003. Toward a multispace 3D cadastre in Israel. *Computers, Environment and Urban Systems* 27: 359-374.
- Bergen, K. M., S. J. Goetz, R. O. Dubayah, G. M. Henebry, C. T. Hunsaker, M. L. Imhoff, R. F. Nelson, G. G. Parker and V.C. Radeloff. 2009. Remote sensing of vegetation 3-D structure for biodiversity and habitat: Review and implications for LIDAR and RADAR spaceborne missions. *Journal of Geophysical Research* 114(2): 1-13.
- Bradley, G. A. 1984. *Land use and forest resources in a changing environment: the urban/forest interface*. University of Washington Press. Seattle, WA, USA. 222 p.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). 2003. ArcGIS 9.3. Redlands, CA, USA. s/p.
- Hengl, T. and H. I. Reuter. 2008. *Geomorphometry: Concepts, software and applications*. Developments in Soil Science. Ed. Elsevier. Budapest, Hungary. Vol. 33. 772 p.
- Jones, T. G., N. C. Coops and T. Sharma. 2011. Exploring the Utility of Hyperspectral Imagery and LIDAR Data for Predicting *Quercus garryana* Ecosystem Distribution and Aiding in Habitat Restoration. *Restoration Ecology* 19(201): 245-256.
- Kauffman, J. and D. Steudler. 1998. *Cadastre 2014. A vision for a Future Cadastral System*. Rüdlingen, Bern, Switzerland. 38 p.
- Kwak, D. A., W. K. Lee, J. H. Lee, G. S. Biging and P. Gong. 2007. Detection of individual trees and estimation of tree height using LIDAR data. *Journal of Forest Research* 12:425-434.
- Larsson, G. 1991. *Land Registration and Cadastral Systems: tools for Land Information Management*. Longman Scientific and Technical. Harlow, Essex, England. 175 p.
- Lefsky, M. 1997. *Application of lidar remote sensing to the estimation of forest canopy and stand structure*. PhD Thesis. Department of Environmental Science. University of Virginia. Charlottesville, VA, USA. 185p.
- Linn, J. 1983. *Cities in the Developing World: Policies for Their Equitable and Efficient Growth*. Oxford University Press. New York, NY, USA. 230p.
- Magnussen, S., P. Eggemon and V. N. LaRiccia. 1999. Recovering tree heights from airborne laser scanner data. *Journal of Forest Science* 45: 407-422.
- Meng, X., N. Currit and K. Zhao. 2010. Ground filtering algorithms for airborne LIDAR data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 75: 427-442.
- Moll, G. and S. Ebenreck. 1989. *Shading our cities: A resource guide for urban and community forests*. Island Press. Washington, DC, USA. 333p.
- Naest, E. 1997. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 61:246-253.
- Parker, G. 1995. Structure and microclimate of forest canopies. In: Nadkarni, M. L. (eds.). *Forest canopies: a review of research on a biological frontier*. Academic Press. San Diego, CA, USA. 73-106p.
- Renaud M. R., J. Aryal and A. K. Chong. 2007. Object-Based Classification of Ikonos Imagery for Mapping Large-Scale Vegetation Communities in Urban Areas. *Sensors* 7: 2860-2880.
- Small, C. 2001. Estimation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis. *International Journal of Remote Sensing* 22:1305-1334.
- Stoler, J. 2000. Needs, possibilities and constraints to develop a 3D cadastral registration system. *Proceedings 22nd Urban Data Management Symposium 'Urban and Rural Data Management Common Problems—Common Solutions*. Delft, The Netherlands. pp. 43-58.
- Stoler, J. E. and M. A. Salzmann. 2003. Towards a 3D cadastre: where do cadastral needs and technical possibilities meet? *Computers, Environment and Urban Systems* 27: 394-410.
- Tookea, T. R., N. C. Coops, N. R. Goodwin and J. A. Voogt. 2009. Extracting urban vegetation characteristics using spectral mixture analysis and decision tree classifications. *Remote Sensing of Environment* 113 (2): 398-407.
- Zhangab, X., X. Fengb and H. Jiangac. 2010. Object-oriented method for urban vegetation mapping using IKONOS imagery. *International Journal of Remote Sensing* 31: 177-196.

