

# Precision of remote sensors to estimate aerial biomass parameters: portable LIDAR and optical sensors

## Precisión de los sensores remotos para la estimación de parámetros de biomasa aérea: LIDAR portátil y sensores ópticos

Roberto E. Huerta-García<sup>1</sup>; Nelly L. Ramírez-Serrato<sup>1,2</sup>;  
Fabiola D. Yépez-Rincón<sup>1,2</sup>; Diego F. Lozano-García<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Tecnológico de Monterrey, Laboratorio de Sistemas de Información Georreferenciada. Av. Eugenio Garza Sada núm. 2501 Sur, col. Tecnológico. C. P. 64849. Monterrey, Nuevo León, México.

<sup>2</sup>Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil. Av. Pedro de Alba s/n, Cd. Universitaria. C. P. 66451. San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

\*Corresponding author: [dflozano@itesm.mx](mailto:dflozano@itesm.mx), tel.: +52 81 8358 1400 ext. 5288

### Abstract

**Introduction:** Aerial biomass estimation using the traditional forestry method is laborious, expensive and time consuming. An alternative to solve this problem is the use of remote sensing. **Objective:** To evaluate the precision of portable LIDAR technology and photogrammetry (photo-reconstruction) in the generation of point clouds to estimate aerial biomass.

**Materials and methods:** A total of 26 *Quercus* L. trees were analyzed from an urban forest in the south of Monterrey, Mexico. Diameter at breast height (DBH), total height and crown diameter were obtained with six methods: 1) traditional forest, 2) portable LIDAR at ground level, 3) normal color photo-reconstruction (PR) at ground level, 4) infrared color PR at ground level, 5) PR of normal color aerial image and 6) PR of infrared aerial image. Aerial biomass was estimated and the precision of each method was evaluated taking as reference the traditional forest method.

**Results and discussion:** Portable LIDAR offers more accurate information to estimate the aerial biomass ( $R^2 = 0.945$ ), followed by normal color PR at ground level ( $R^2 = 0.824$ ), when compared with that obtained by the traditional forest method. PR of normal color aerial images showed the poorest results ( $R^2 = 0.653$ ), due to the impossibility to measure the DBH. Data collection with sensors was faster (>80 %) with respect to the TFM.

**Conclusion:** Remote sensing techniques have the potential to obtain forest parameters in large-scale projects.

**Keywords:** aerial biomass; *Quercus*; photo-reconstruction; unmanned aerial vehicle; remote sensing.

### Resumen

**Introducción:** La estimación de biomasa aérea mediante el método tradicional forestal es laboriosa, costosa y demanda tiempo. Una alternativa para resolver esta problemática es el uso de la teledetección.

**Objetivo:** Evaluar la precisión de la tecnología LIDAR portátil y la fotogrametría (fotorreconstrucción) en la generación de nubes de puntos para la estimación de biomasa aérea.

**Materiales y métodos:** Se analizaron 26 árboles del género *Quercus* L. de un bosque urbano en el sur de Monterrey, México. El diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total y diámetro de copa se obtuvieron con seis métodos: 1) tradicional forestal, 2) LIDAR portátil a nivel de suelo, 3) fotorreconstrucción (FR) de color normal a nivel de suelo, 4) FR de color infrarrojo a nivel de suelo, 5) FR de fotografía aérea de color normal y 6) FR de fotografía aérea de color infrarrojo. La biomasa aérea se calculó y la precisión de cada método se evaluó tomando como referencia el tradicional forestal.

**Resultados y discusión:** LIDAR portátil ofrece información más precisa para estimar la biomasa aérea ( $R^2 = 0.945$ ), seguido por la FR de color normal a nivel de suelo ( $R^2 = 0.824$ ), cuando se comparan con la obtenida por el método tradicional forestal. La FR de fotografía aérea de color normal mostró los resultados más pobres ( $R^2 = 0.653$ ), debido a la imposibilidad de medir el DAP. La toma de datos con los sensores fue más rápida (>80 %) con respecto al MTF.

**Conclusión:** Las técnicas de teledetección tienen potencial para la obtención de parámetros forestales en proyectos de gran escala.

**Palabras clave:** biomasa aérea; *Quercus*; fotorreconstrucción; vehículo aéreo no tripulado; teledetección.

## Introduction

Forest inventories are one of the tools capable of evaluating the condition of forest ecosystems and of helping decision-making regarding actions or policies for the adaptation or mitigation of climate change effects.

Qualitative and quantitative data collection provides inputs for the estimation of aerial biomass and stored carbon. In this sense, biomass estimation parameters have traditionally been obtained by collecting data *in situ* by manually measuring distinctive characteristics of the physiognomy of trees, such as diameter at breast height, total height and crown diameter.

As technology and new knowledge have evolved in areas such as remote sensing and geographic information systems, we have tried to complement parameters through digital data capture techniques to facilitate the collection and management of information (Calders et al., 2014; Liang et al., 2014a; Yépez & Lozano, 2014).

The objective of this contribution was to evaluate the accuracy of portable LIDAR technology and photogrammetry (photo-reconstruction) in the generation of point clouds, to estimate aerial biomass in an urban forest. The study was carried out under the assumption that these techniques are useful to extract forest parameters efficiently and accurately, with values similar to those obtained with the traditional forest method.

## Materials and methods

### Study area and field data collection

The experiment was conducted in an urban forest at the Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Nuevo León, Mexico. The forest consists mainly of ash (*Fraxinus americana* L.) trees and evergreen oak (*Quercus fusiformis* Small). The polygon comprises an area of 3 500 m<sup>2</sup> (Figure 1), which was selected based on the concentration of *Quercus* trees with diameter at breast height greater than 7 cm and trying to avoid the “noise” generated by people or vehicles in the point clouds.

### Obtaining data using the traditional forest method

Total height (TH), crown diameter (CD) and diameter at breast height (DBH) of each tree were obtained using laser rangefinder (LaserAce 3D model), measuring tape and diametric tape, respectively. The north-south and east-west measurements of the CD were averaged and DBH was measured at a height of 1.3 m.

## Introducción

Los inventarios forestales son una de las herramientas capaces de evaluar la condición de los ecosistemas forestales y de ayudar a la toma de decisiones respecto a las acciones o políticas para la adaptación o mitigación de los efectos del cambio climático.

El levantamiento de datos cualitativos y cuantitativos provee insumos para la estimación de biomasa aérea y carbono almacenado. En este sentido, los parámetros de estimación de biomasa se han obtenido tradicionalmente colectando datos *in situ* mediante la medición manual de características distintivas de la fisionomía de los árboles, tales como el diámetro a la altura del pecho, la altura total y el diámetro de la copa.

Con el avance de la tecnología y los nuevos conocimientos en áreas como la percepción remota y los sistemas de información geográfica, se ha tratado de complementar la obtención de los parámetros mediante técnicas de captura de datos digitales para facilitar la toma y el manejo de la información (Calders et al., 2014; Liang et al., 2014a; Yépez & Lozano, 2014).

El objetivo de esta contribución fue evaluar la precisión de la tecnología LIDAR portátil y la fotogrametría (fotorreconstrucción) en la generación de nubes de puntos, para la estimación de biomasa aérea contenida en un bosque urbano. El trabajo se realizó bajo el supuesto de que estas técnicas son útiles para extraer parámetros forestales de manera eficiente y precisa, con valores similares a los obtenidos con el método tradicional forestal.

## Materiales y métodos

### Área de estudio y colecta de datos en campo

El experimento se realizó en el bosque urbano del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Nuevo León, México. El bosque está conformado principalmente por árboles de fresno (*Fraxinus americana* L.) y encino siempre verde (*Quercus fusiformis* Small). El polígono comprende un área de 3 500 m<sup>2</sup> (Figura 1), la cual se seleccionó con base en la concentración de árboles del género *Quercus* con diámetro a la altura del pecho mayor de 7 cm y tratando de evitar el “ruido” generado por personas o vehículos en las nubes de puntos.

### Obtención de datos con el método tradicional forestal

Los parámetros altura total (AT), diámetro de la copa (DC) y diámetro a la altura del pecho (DAP) de cada



**Figure 1.** Study area (3 500 m<sup>2</sup>) in an urban forest at the Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (Nuevo León, Mexico) and *Quercus* species to evaluate remote sensors in the estimation of aerial biomass parameters.

**Figura 1.** Área de estudio (3 500 m<sup>2</sup>) en el bosque urbano del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (Nuevo León, México) y especies presentes del género *Quercus*, para la evaluación de sensores remotos en la estimación de parámetros de biomasa aérea.

#### Obtaining data with portable LIDAR

We used a portable LIDAR (GeoSlam model Zeb-1) that has a maximum range of 30 m and accuracy of  $\pm 0.1\%$  with a scanning rate of 43 200 points·s<sup>-1</sup>. LIDAR is a sensor that emits a laser beam towards a target and measures the return time to estimate the distance between the instrument and the object; if the position of the instrument is known with precision, it is possible to build a point cloud that represents the illuminated object in three dimensions (Dassot, Constant, & Fournier, 2011). Bosse, Zlot, and Flick (2012) present details of the design and operation of the sensor. The survey consisted of six transects with a total distance of 910 m (Figure 2). The existing infrastructure in the area was avoided in the trajectory.

#### Obtaining data using photogrammetric technique

Normal (RGB) and infrared (IR) color images at ground and aerial level with overlap of 70 % were captured. Two optical sensors were used for ground level: 1) an 18.1 megapixel digital camera with focal length adjustment (FOV) of 73.7, CMOS sensor and NIKKOR glass lens, and 2) a 12-megapixel action camera, FOV of 94.4, CMOS sensor with the adaptation of a 5 megapixel lens that allows the sensor of the action camera to

individuo se obtuvieron utilizando telémetro láser (LaserAce modelo 3D), cinta métrica y cinta diamétrica, respectivamente. Las mediciones norte-sur y este-oeste del DC se promediaron y el DAP se midió a una altura de 1.3 m.

#### Obtención de datos con LIDAR portátil

Se utilizó un equipo LIDAR portátil (GeoSlam modelo Zeb-1) que cuenta con un rango máximo de 30 m y precisión de  $\pm 0.1\%$  con una tasa de escaneo de 43 200 puntos·s<sup>-1</sup>. LIDAR es un sensor que emite un rayo láser hacia un objetivo y mide el tiempo de retorno para estimar la distancia entre el instrumento y el objeto; si la posición del instrumento se conoce con precisión, es posible construir una nube de puntos que represente el objeto iluminado en tres dimensiones (Dassot, Constant, & Fournier, 2011). Bosse, Zlot, y Flick (2012) presentan detalle del diseño y funcionamiento del sensor. El levantamiento consistió en seis transectos con distancia total de 910 m (Figura 2). En la trayectoria se esquivó la infraestructura existente en la zona.

#### Obtención de datos con técnica fotogramétrica

Se capturaron fotografías de suelo y aéreas en color normal (RGB) y color infrarrojo (IR) con traslape de



**Figure 2. Portable LIDAR route in an urban forest at the Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (Nuevo León, Mexico) to obtain aerial biomass parameters.**

**Figura 2. Recorrido de LIDAR portátil en el bosque urbano del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (Nuevo León, México) para la obtención de parámetros de biomasa aérea.**

detect the electromagnetic energy of the near infrared. The transmittance of the lens is in the ranges of 400 to 560 nm and 688 to 740 nm. In total, 577 RGB and 526 IR images were obtained. The routes for capturing images were made in two phases shown in Figures 3a and 3b for RGB, and Figures 3c and 3d for IR. For aerial images, the action camera was placed on a drone with a stabilization system to ensure vertical images. Two flights were scheduled; one with RGB lens and other with IR lens. Prior to the flight, the plan was designed (Figure 3e) regarding a period of 1 s between each image (overlap of 70 %) and flight height of 40 m. A total of 861 RGB aerial images were taken and 490 IR images.

#### Generation and post-process of point clouds

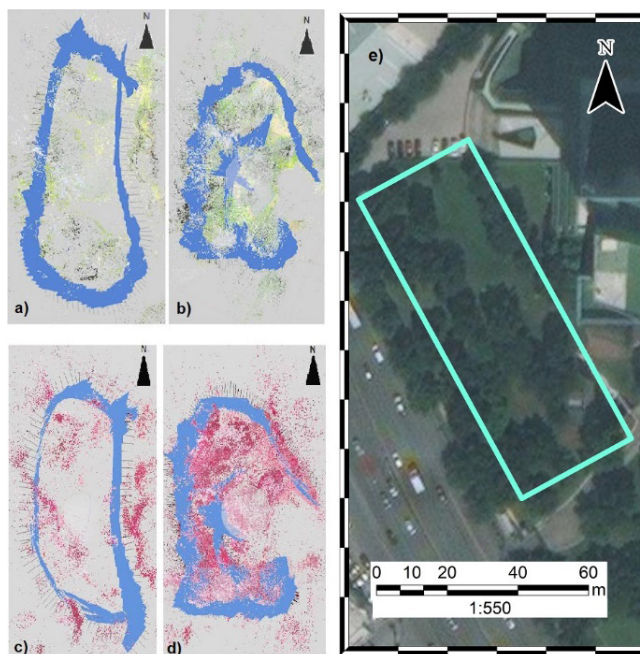
The process was carried out using the following: 8 Gb RAM, Intel Core i7 processor, Windows 7, Nvidia GeForce 9600 video card, with the Agisoft PhotoScan™ photoreconstruction program. This application allows to generate three-dimensional objects, from images with different points of orientation (Li, Chen, Zhang, & Jia, 2016). The structure-from-motion (SFM) technique was used with high alignment precision and medium quality geometry detail. The groups of images were aligned by common points, determining the position of the cameras in each image, which generated a dense cloud of points for each sensor and data type. Georeferencing was carried out using a differential GPS (Ashtech, model ProMark500), obtaining four geodetic points. These were corrected with the local station Mty2 of the National Active Geodetic Network (RGNA,

70 %. Para el nivel de suelo se utilizaron dos sensores ópticos: 1) una cámara digital de 18.1 megapíxeles con ajuste de distancia focal (FOV) de 73.7, sensor CMOS y lente de cristal NIKKOR, y 2) una cámara de acción de 12 megapíxeles, FOV de 94.4, sensor CMOS con la adaptación de un lente de 5 megapíxeles que permite que el sensor de la cámara de acción detecte la energía electromagnética del infrarrojo cercano. La transmitancia del lente se encuentra en los rangos de 400 a 560 nm y 688 a 740 nm. En total se obtuvieron 577 fotografías RGB y 526 en IR. Los recorridos para la captura de las fotografías se hicieron en dos fases mostradas en las Figuras 3a y 3b para RGB, y Figuras 3c y 3d para IR. Para las fotos aéreas se acopló la cámara de acción a un vehículo aéreo no tripulado (VANT) con un sistema de estabilización para asegurar la obtención de fotografías verticales. Se programaron dos vuelos; uno con lente RGB y otro con lente IR. Previo al vuelo se diseñó el plan (Figura 3e) considerando un periodo de 1 s entre cada fotografía (traslape de 70 %) y altura de vuelo de 40 m con respecto al suelo. Se tomaron 861 fotografías aéreas en RGB y 490 en IR.

#### Generación y postproceso de nubes de puntos

El proceso se realizó en equipos de 8 Gb RAM, procesador Intel Core i7, Windows 7, tarjeta de video Nvidia GeForce 9600, usando el programa de fotorreconstrucción Agisoft PhotoScanMR. Esta aplicación permite generar objetos de tres dimensiones, a partir de fotografías con puntos distintos de orientación (Li, Chen, Zhang, & Jia, 2016). Se utilizó la técnica *structure-from-motion* (SFM)





**Figure 3.** Routes in an urban forest at the Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (Nuevo León, Mexico), to obtain aerial biomass parameters using the photogrammetric technique: normal color photo-reconstruction (PR) at ground level (a and b), infrared color PR at ground level (c and d) and PR of normal and infrared color aerial image (e).

**Figura 3.** Recorridos en el bosque urbano del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (Nuevo León, México), para la obtención de parámetros de biomasa aérea con la técnica fotogramétrica: fotorreconstrucción (FR) de color normal a nivel de suelo (a y b), FR de color infrarrojo a nivel de suelo (c y d) y FR de fotografía aérea de color normal e infrarrojo (e).

Red Geodésica Nacional Activa). From these data, the point cloud record of the portable LIDAR was recorded and used as a reference in the alignment of the photo-reconstructed clouds.

The isolated points of the main cloud were removed semi-automatically for scanning and photo-reconstruction (PR) techniques. The cloud was divided into two classes (trees and soil) detecting geometric features such as linear (1D), flat (2D) or three-dimensional (3D) through 10 scales, from 5 cm to 50 cm in diameter. In this way, the points were discriminated by comparing all the scales, generating a dichotomous classification (Brodu & Langué, 2012).

#### Forest parameters

Once the point clouds were segmented into the two classes of interest (trees and soil), the points corresponding to the category “trees” were isolated to proceed with the generation of forest parameters required for the comparison of the procedures (Trochta, Krůček, Vrška, & Král, 2017).

When extracting the points corresponding to the trees, an information vacuum was generated, so the Inversed

con una precisión alta de alineamiento y calidad media de detalle de geometría. Los grupos de fotografías se alinearon por puntos en común, determinando la posición de las cámaras en cada fotografía, con lo cual se generó una nube de puntos densa para cada sensor y tipo datos.

La georreferenciación se hizo con un receptor GPS diferencial (Ashtech, modelo ProMark500), con el cual se obtuvieron cuatro puntos geodésicos. Estos fueron corregidos con la estación local Mty2 de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA). A partir de estos datos se realizó el registro de la nube de puntos del LIDAR portátil y se usó como referencia en el alineamiento de las nubes fotorreconstruidas.

Los puntos aislados de la nube principal se eliminaron de forma semiautomática para las técnicas escaneo y fotorreconstrucción (FR). La nube se segmentó en dos clases (árboles y suelo) detectando las características geométricas como la forma lineal (1D), plana (2D) o tridimensional (3D) a través de 10 escalas, desde 5 cm hasta 50 cm de diámetro. De esta forma, los puntos se discriminaron mediante la comparación de todas las escalas, generando una clasificación dicotómica (Brodu & Langué, 2012).

Distance Weighted (IDW) interpolation algorithm was used, which uses the position of the existing points around the gaps to predict the position of new points. IDW assumes that positions of the existing points will have more influence on a new predicted point and that it will decrease as the points are farther away.

#### Establishing the central coordinates of trees

For the assignment of the central points of tree bases, their positions on the XY axes were first determined, using the median of the coordinates of all the points present in a cross section at 60 cm above the ground level. The Z axis was assigned in the coordinate determined by the median of the five points closest to the point cloud corresponding to the land.

#### Obtaining total height, crown diameter and diameter at breast height

Total height (TH) was determined automatically with each point cloud, from the vertical distance between the lowest point and the highest part of the tree. On the other hand, using a flat convex projection, the area that enveloped the tree crown from an orthogonal projection was estimated using the convex envelope algorithm (Trochta et al., 2017). Subsequently, the crown diameter (CD) was estimated using the convex area (A) in the following equation:

$$CD = (\sqrt{A/\pi})^2$$

The automatic estimation of DBH was done through tree point subsamples located between the heights of 1.25 m and 1.35 m above the base. The random transformation of Hough (Chen & Chung, 2001) was used to search the center of each point that makes up the subsample, where the center of the most frequent circle is selected through interactions as the resulting center (Xu & Oja, 1993). In the FR point clouds from a UAV, due to the absence of information from the DBH (the tree canopy obstructed the vision of the trunk) an indirect estimation was made from the photogrammetric parameters of TH and CD. For this operation the equation of sessile oak (*Quercus petraea* L.), developed by Balenović, Seletković, Pernar, Ostrogović, and Jazbec (2012), was applied:

$$DBH = (-6.85 + 2.68CD + 1.13TH) * 100$$

#### Aerial biomass

*Quercus* allometric equations studied in the literature, are shown in Table 1. The databases consulted corresponded to the measurement, reporting and verification system (MRV) of the Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), as well as to the base data from

#### Parámetros forestales

Una vez que las nubes de puntos se segmentaron en las dos clases de interés (árboles y suelo), los puntos correspondientes a la categoría “árboles” se aislaron para proceder con la generación de los parámetros forestales requeridos para la comparación de los procedimientos (Trochta, Krůček, Vrška, & Král, 2017).

Al extraer los puntos correspondientes a los árboles se generó un vacío de información, por lo que se utilizó el algoritmo de interpolación *Inversed Distance Weighted* (IDW) que usa la posición de los puntos existentes alrededor de los vacíos para predecir la posición de nuevos puntos. El IDW supone que las posiciones de los puntos existentes tendrán más influencia sobre un punto predicho y que esta disminuirá conforme los puntos se alejen.

#### Determinación de las coordenadas centrales de los árboles

Para la asignación de los puntos centrales de las bases de los árboles se determinaron primero sus posiciones en los ejes XY, empleando la mediana de las coordenadas de todos los puntos presentes en un corte transversal a 60 cm sobre el nivel del suelo. El eje Z se asignó en la coordenada determinada por la mediana de los cinco puntos más cercanos a la nube de puntos correspondiente al terreno.

#### Obtención de altura total, diámetro de la copa y diámetro a la altura del pecho

La altura total (AT) se determinó de manera automática con cada nube de puntos, a partir de la distancia vertical entre el punto más bajo y la parte más alta del árbol. Por otra parte, utilizando una proyección convexa plana, el área que envolvía la copa de los árboles desde una proyección ortogonal se calculó a través del algoritmo de envoltura convexa (Trochta et al., 2017). Posteriormente, el diámetro de la copa (DC) se calculó utilizando el área convexa (A) en la siguiente ecuación:

$$DC = (\sqrt{A/\pi})^2$$

El cálculo automático del DAP se hizo mediante submuestras de puntos de los árboles ubicados entre las alturas de 1.25 m y 1.35 m sobre la base. La transformación aleatoria de Hough (Chen & Chung, 2001) se utilizó para buscar el centro de cada punto que compone la submuestra, donde el centro del círculo más frecuente es seleccionado mediante interacciones como el centro resultante (Xu & Oja, 1993). En las nubes de puntos de FR desde un VANT, debido a la ausencia de información del DAP (el dosel del árbol obstruía la visión del tronco) se procedió a realizar

the Mexican Carbon Program (Rojas-García, De Jong, Martínez-Zurimendí, & Paz-Pellat, 2015). The equations corresponding to the species of the region such as oak, oak-pine and pine-oak forests, and with a high value of  $R^2$  ( $>0.85$ ) were considered for this study. Afterwards, the aerial biomass was estimated using the values obtained automatically by DBH generated by the use of LIDAR, PR at ground and aerial level (UAV). We detected the cases in which the difference between the traditional forest method (TFM) and the methods studied was greater than 25 %, and manual measurements were made to reduce errors caused by noise. The relationship between the measurements acquired through the different methods, with respect to the data collection by TFM *in situ* ( $P = 0.05$ ), was obtained through regression models.

una estimación indirecta a partir de los parámetros fotogramétricos de AT y DC. Para esta operación se aplicó la ecuación de encino sésil (*Quercus petraea* L.), desarrollada por Balenović, Seletković, Pernar, Ostrogović, y Jazbec (2012):

$$DAP = (-6.85 + 2.68DC + 1.13AT) * 100$$

#### Biomasa aérea

Las ecuaciones alométricas del género *Quercus*, investigadas en la literatura, se muestran en el Cuadro 1. Las bases de datos consultadas correspondieron al sistema de medición, reporte y verificación (MRV) de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), así como a la base del Programa Mexicano del Carbono (Rojas-García,

**Table 1. Allometric equations to estimate the aerial biomass of *Quercus* in northern Mexico.**

**Cuadro 1. Ecuaciones alométricas para el cálculo de biomasa aérea de *Quercus* en el norte de México.**

Species / Especie	Equation / Ecuación	Author / Autor
<i>Quercus polymorpha</i>	$[0.092(DBH^{2.448})] / [0.092(DAP^{2.448})]$	Rojas-García et al. (2015)
<i>Quercus</i> spp.	$[0.089(DBH^{2.5226})] / [0.089(DAP^{2.5226})]$	Návar (2009)
<i>Quercus</i> spp.	$[e^{-2.874}(DBH^{2.631})] / [e^{-2.874}(DAP^{2.631})]$	Návar-Cháidez (2010)
<i>Quercus</i> spp.	$[e^{-2.754}(DBH^{2.574})] / [e^{-2.754}(DAP^{2.574})]$	Návar-Cháidez (2010)
<i>Quercus</i> spp.	$[0.010702(DBH^{3.05082})] / [0.010702(DAP^{3.05082})]$	Rodríguez, Jiménez, Aguirre, Treviño, and Razo (2009)
<i>Quercus</i> spp.	$[0.038424(DBH^{2.82139})] / [0.038424(DAP^{2.82139})]$	Rodríguez et al. (2009)
<i>Quercus</i> spp.	$[0.45534(DBH^2)] / [0.45534(DAP^2)]$	Aguirre and Jiménez (2011)
<i>Quercus</i> spp.	$[0.0202(DBH^{2.6480})] / [0.0202(DAP^{2.6480})]$	Návar (2009)
<i>Quercus</i> spp.	$[0.0768(DBH^{2.4416})] / [0.0768(DAP^{2.4416})]$	Návar (2009)

## Results and discussion

A total of 26 *Quercus* trees were sampled. The dominant species was *Q. fusiformis* with 15 trees (57.7 %), followed by *Q. vaseyana* Buckl. (23.1 %), *Q. shumardii* Buckl. (15.4 %) and *Q. polymorpha* Schltldl. & Cham. (3.8 %).

### Point clouds generated

DBH, TH and CD by the TFM measurements were made in 3 h. With portable LIDAR, the number of points generated amounted to 39.4 million (Figure 4); the time of data collection in the field was 40 minutes.

The number of cloud points generated with photo-reconstruction (Figure 5) varied from 6 to 22 million depending on the size and number of images obtained by each type of sensor (RGB and IR) and by type of sampling (at ground and aerial level) (Table 2). The estimated time of collection averaged 30 minutes at ground level and 5 to 10 minutes at aerial level.

The time spent in data collection decreased by 90 % with the portable LIDAR, 83 % with the optical sensors at ground level and 97 % when placing the sensors on a UAV.

The level of cloud geolocation, in which the portable LIDAR was taken as reference, averaged 0.05 m of spatial accuracy in XYZ. Table 2 shows the mean square errors reported by each type of point cloud.

De Jong, Martínez-Zurimendí, & Paz-Pellat, 2015). Se consideraron las ecuaciones que correspondieran a las especies de la región tales como bosques de encino, encino-pino y pino-encino, y que contaran con un valor alto de  $R^2$  ( $>0.85$ ). Después, la biomasa aérea se estimó con los valores obtenidos automáticamente mediante el DAP generado por el uso de tecnología LIDAR, FR al nivel del suelo y aéreo (VANT). Se detectaron los casos en que la diferencia entre el método tradicional forestal (MTF) y los métodos evaluados fuera mayor de 25 %, y se realizaron mediciones manuales para reducir errores ocasionados por ruido. La relación existente entre las mediciones adquiridas a través de los distintos métodos, con respecto al levantamiento de datos mediante el MTF *in situ* ( $P = 0.05$ ), se obtuvo a través de modelos de regresión.

## Resultados y discusión

Se muestrearon 26 árboles del género *Quercus*. La especie dominante fue *Q. fusiformis* con 15 individuos (57.7 %), seguida por *Q. vaseyana* Buckl. (23.1 %), *Q. shumardii* Buckl. (15.4 %) y *Q. polymorpha* Schltldl. & Cham. (3.8 %).

### Nubes de puntos generados

Las mediciones de DAP, AT y DC mediante el MTF se realizaron en un lapso de 3 h. Con LIDAR portátil, el número de puntos generados ascendió a 39.4 millones (Figura 4); el tiempo del levantamiento de datos en campo fue de 40 minutos.

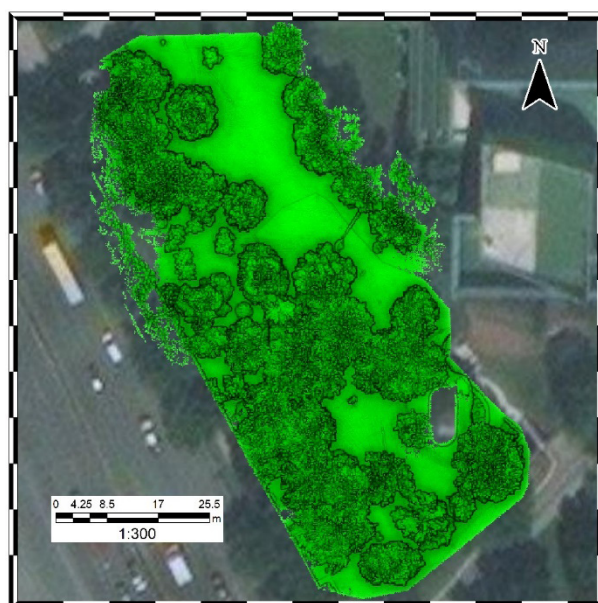


Figure 4. Point cloud from portable LIDAR, for the measurement of forest parameters in an urban forest.

Figura 4. Nube de puntos de LIDAR portátil, para la medición de parámetros forestales en un bosque urbano.



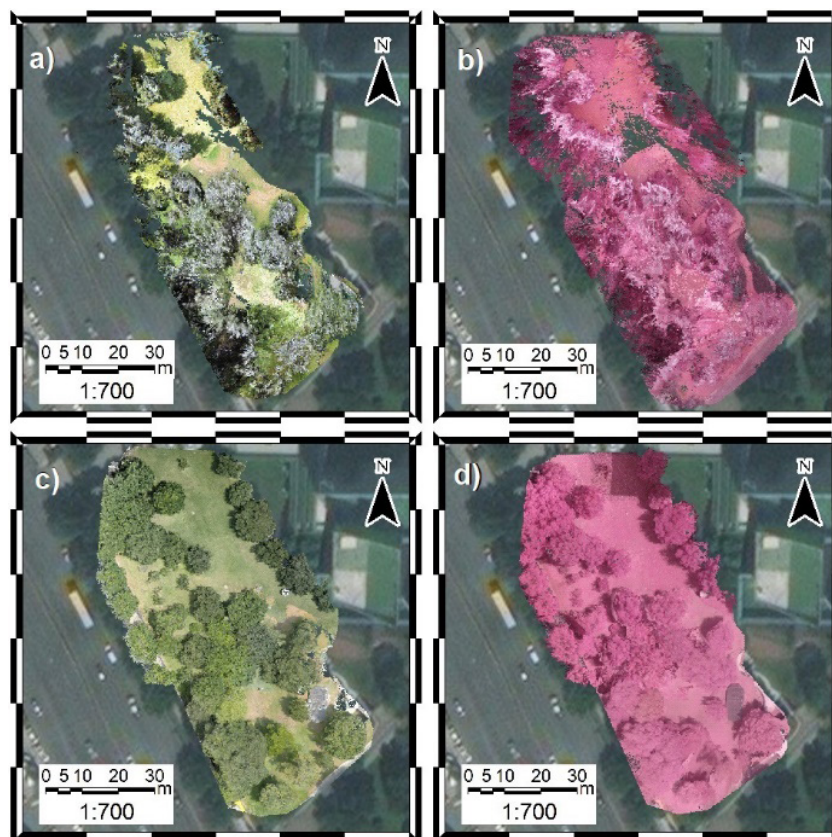


Figure 5. Point clouds for the measurement of forest parameters in an urban forest: a) Normal color photo-reconstruction (PR) at ground level, b) Infrared color PR at ground level, c) PR of normal color aerial image and d) PR of infrared color aerial image.

Figura 5. Nubes de puntos para la medición de parámetros forestales en un bosque urbano: a) Fotorreconstrucción (FR) de color normal a nivel de suelo, b) FR de color infrarrojo a nivel de suelo, c) FR de fotografía aérea de color normal y d) FR de fotografía aérea de color infrarrojo.

Table 2. Number of points generated with the methods of photo-reconstruction (PR) and mean squared error (MSE). Cuadro 2. Número de puntos generados con los métodos de fotorreconstrucción (FR) y error cuadrático medio (ECM) de registro.

Point cloud/Nube de puntos	Number of points/Número de puntos	MSE/ECM
Normal color PR at ground level/ FR de color normal a nivel de suelo	22 405 651	0.13
Infrared color PR at ground level/ FR de color infrarrojo a nivel de suelo	9 887 539	0.20
PR of normal color aerial image/ FR de fotografía aérea de color normal	12 138 416	0.08
PR of infrared color aerial image/ FR de fotografía aérea de color infrarrojo	6 332 972	0.10

The precision balance for the generation of the classification filter between soil and trees was 98.34 %. An example is shown in Figure 6. When making the test classification, 1.12 % of the 10 000 points belonging to the soil class actually corresponded to the class of trees; while 1.66 % of the 10 000 test points of the tree class were misclassified. Results of this filter were used for all the point clouds since they had geometric characteristics similar to the cloud with which it was generated.

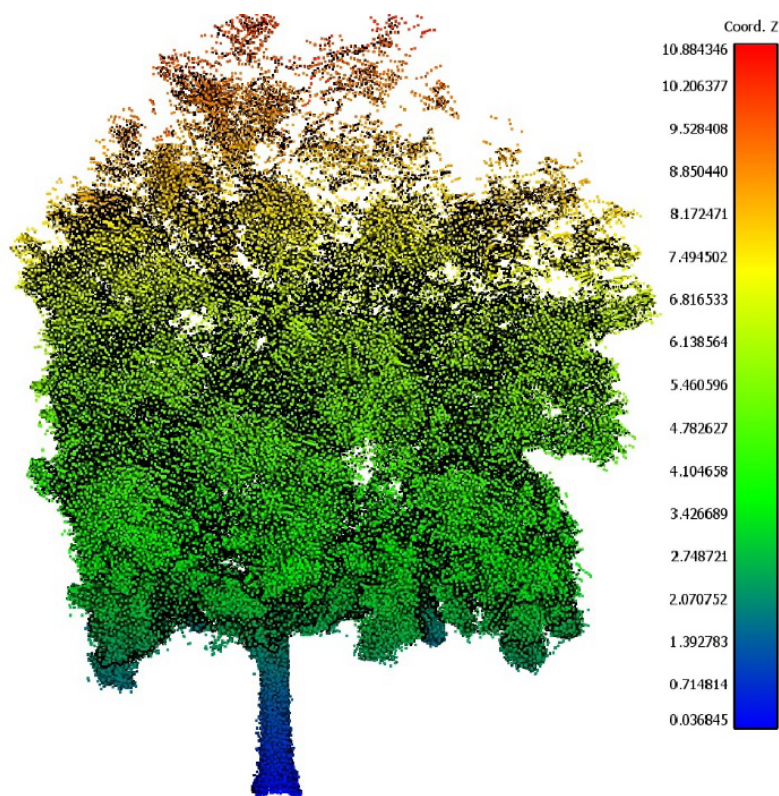
As for the PR at ground level, values of  $R^2 = 0.824$  were obtained in RGB and  $R^2 = 0.745$  in IR. The reduction in the accuracy of these methods lies in four main factors. The first is the difficulty of the algorithm to identify the variations of intensity that define tree crowns on the images. This occurs because trees, unlike solid objects, have a large number of holes between their leaves and branches, which are covered by bottom objects such as fences, buildings and, in most cases, the sky. To reduce the noise of this source, semi-automatic masks were created for each image; that is, the areas not corresponding to the area of interest for PR were delimited in order to minimize the noise caused by these pixels. Secondly, the shadows caused by the density of the canopy make it difficult to identify and classify points (to the category of interest) automatically. Another factor is the presence of trees

El número de puntos de las nubes generadas con fotorreconstrucción (Figura 5) varió de 6 a 22 millones dependiendo del tamaño y número de fotografías obtenidos por cada tipo de sensor (RGB e IR) y por tipo de muestreo (a nivel de suelo y aéreo) (Cuadro 2). El tiempo estimado de recolección promedió 30 min a nivel de suelo y 5 a 10 min en el aéreo.

El tiempo invertido en el levantamiento de datos disminuyó 90 % mediante el LIDAR portátil, 83 % con los sensores ópticos a nivel de suelo y 97 % al montar los sensores en un VANT.

El nivel de geoposicionamiento de las nubes, en el que el LIDAR portátil se tomó como referencia, promedió 0.05 m de precisión espacial en XYZ. En el Cuadro 2 se observan los errores cuadráticos medios reportados por cada tipo de nube de puntos.

El balance de precisión para la generación del filtro de clasificación entre suelo y árboles fue de 98.34 %. Un ejemplo se muestra en la Figura 6. Al realizar la clasificación de prueba, 1.12 % de los 10 000 puntos pertenecientes a la clase de suelo en realidad correspondieron a la clase de árboles; mientras que 1.66 % de los 10 000 puntos de prueba de la clase de árboles se clasificaron erróneamente. Los resultados de



**Figure 6. Point cloud (isolated) of a tree. The points were obtained from the classification of the entire cloud. Colors indicate elevation above the ground.**

**Figura 6. Nube de puntos (aislada) de un árbol. Los puntos se obtuvieron de la clasificación de la nube completa. Los colores indican elevación sobre el suelo.**

smaller than 7 cm of DBH and shrubs, which produced a lot of noise points. Finally, the variation of the distance between the camera and the target generates different densities of points along the cloud, which improves or worsens the results in variable areas depending on the positions to obtain the images.

The PR on a drone had the lowest  $R^2$  values of the study ( $R^2 = 0.653$  for RGB and  $R^2 = 0.667$  for IR). The main limitation of this methodology was the lack of information for an adequate reconstruction of DBH to derive the missing parameters due to occlusion.

The development of algorithms and computer programs for the automatic detection of forest parameters from 3D point clouds is recent (Liang et al., 2014a; Liang et al., 2014b; Moskal & Zheng, 2012; Seidel, Albert, Ammer, Fehrmann, & Kleinn, 2013) and is in constant improvement. Its application has proven to be efficient with the corresponding validation of the traditional methodology (Yépez & Lozano, 2014).

#### Forest parameters of remote sensors

DBH, TH and CD values were obtained for each tree, and semi-automatically, with the portable LIDAR and PR methods, both at ground level and on a UAV. Results are shown in Table 3. The DBH generated with remote sensors that showed greater difference with those obtained through TFM were PR of normal color aerial image (8.74 cm) and PR of infrared color image (8.60 cm); the minor differences were recorded with the infrared color PR at ground level (0.03 cm) and portable LIDAR (0.24 cm). With respect to TH, the greatest differences in measurement were for normal color PR at ground level (0.60 m) and portable LIDAR (0.36 m), and the smallest difference was obtained with the infrared color PR at ground level (0.08 m). For CD, the greatest differences were found for normal color and infrared color PR at ground level with 0.99 and 0.65 m, respectively, while the PR measurement of infrared color aerial image was the same as that obtained with the TFM.

In Mexico, the presence of equations that allow the estimation of the DBH from TH and CD, for *Quercus*, it is non-existent; therefore, the use of equations obtained from measurements in other parts of the world was used (Balenić et al., 2012). This is reflected in a low precision of the estimation, which generated an underestimation of the aerial biomass estimated by means of data obtained from the UAV.

#### Estimation of aerial biomass

Aerial biomass was estimated with TFM data through the eight allometric equations existing in the region

este filtro se utilizaron para todas las nubes de puntos ya que poseían características geométricas similares a la nube con la cual fue generado.

En cuanto a las FR a nivel del suelo se obtuvieron valores de  $R^2 = 0.824$  en RGB y  $R^2 = 0.745$  en IR. La reducción en la precisión de estos métodos radica en cuatro factores principales. El primero es la dificultad del algoritmo para identificar las variaciones de intensidad que delimitan las copas en las fotografías. Esto ocurre debido a que los árboles, a diferencia de los objetos sólidos, presentan gran cantidad de huecos entre sus hojas y ramas, los cuales son cubiertos por objetos del fondo como cercas, edificaciones y, en la mayoría de los casos, por el cielo. Para disminuir el ruido de esta fuente se crearon máscaras semiautomáticas para cada fotografía; es decir, las zonas no correspondientes al área de interés para la FR se delimitaron con el fin de minimizar el ruido ocasionado por estos píxeles. En segundo lugar, las sombras ocasionadas por la densidad del dosel dificultan el proceso de identificación y clasificación de puntos (a la categoría de interés) de manera automática. Otro factor es la presencia de árboles menores de 7 cm de DAP y arbustos, los cuales produjeron gran cantidad de puntos de ruido. Por último, la variación de la distancia entre la cámara y el objetivo genera densidades diferentes de puntos a lo largo de la nube, lo cual mejora o empeora los resultados en zonas variables dependiendo de las posiciones de la obtención de las fotografías.

Las FR desde VANT presentaron los valores de  $R^2$  más bajos del estudio ( $R^2 = 0.653$  para RGB y  $R^2 = 0.667$  para IR). La principal limitante de esta metodología fue la falta de información para una reconstrucción adecuada del DAP para derivar los parámetros faltantes por occlusión.

El desarrollo de algoritmos y programas computacionales para la detección automática de parámetros forestales a partir de nubes de puntos 3D es reciente (Liang et al., 2014a; Liang et al., 2014b; Moskal & Zheng, 2012; Seidel, Albert, Ammer, Fehrmann, & Kleinn, 2013) y se encuentra en mejora constante. Su aplicación ha demostrado ser eficiente con la correspondiente validación de la metodología tradicional (Yépez & Lozano, 2014).

#### Parámetros forestales de sensores remotos

Los valores de DAP, AT y DC se lograron obtener para cada árbol, y de forma semiautomática, con los métodos de LIDAR portátil y las FR, tanto a nivel del suelo como desde un VANT. Los resultados se muestran en el Cuadro 3. Los DAP generados con sensores remotos que presentaron mayor diferencia con los obtenidos a través de MTF fueron FR de fotografía aérea de color normal (8.74 cm) y FR de fotografía aérea de color infrarrojo



for *Quercus*. A comparison was made by student t-tests ( $P = 0.01$ ), to determine if there were statistically significant differences between the results of each equation. Based on this analysis, the equation of greater similarity with the rest was found. According to Table 4, the formulas of Aguirre and Jiménez (2011) and Rojas-García (2015) had the highest number of coincidences.

(8.60 cm); las menores diferencias se registraron con la FR de color infrarrojo a nivel de suelo (0.03 cm) y LIDAR portátil (0.24 cm). Con respecto a la AT, las mayores diferencias de medición se presentaron en la FR de color normal a nivel de suelo (0.60 m) y LIDAR portátil (0.36 m), y la menor diferencia se obtuvo con la FR de color infrarrojo a nivel de suelo (0.08 m). Para el DC, las mayores diferencias se encontraron en las FR

**Table 3. Forest parameters of 26 *Quercus* trees, obtained with the traditional forest method and remote sensing.**  
**Cuadro 3. Parámetros forestales de 26 árboles de *Quercus*, obtenidos con el método tradicional forestal y sensores remotos.**

Method / Método	DBH (cm) / DAP (cm)	Total height (m) / Altura total (m)	Crown diameter (m) / Diámetro de la copa (m)
Traditional forest method / Tradicional forestal	36.76	8.28	9.51
Portable LIDAR / LIDAR portátil	37.00	7.92	9.18
Normal color PR at ground level / FR de color normal a nivel de suelo	35.73	8.88	8.52
Infrared color PR at ground level / FR de color infrarrojo a nivel de suelo	36.73	8.37	8.86
PR of normal color aerial image / FR de fotografía aérea de color normal	28.02	8.46	9.45
PR of infrared color aerial image / FR de fotografía aérea de color infrarrojo	28.16	8.42	9.51

DBH: diameter at breast height, PR: photo-reconstruction.  
DAP: diámetro a la altura del pecho, FR: fotorreconstrucción.

**Cuadro 4. Characteristics of allometric equations used in the estimation of aerial biomass of the genus *Quercus*.**  
**Cuadro 4. Características de ecuaciones alométricas empleadas en la estimación de biomasa aérea del género *Quercus*.**

Species / Especie	State / Estado	Ecosystem / Ecosistema	R <sup>2</sup>	Sample size / Tamaño de muestra	Author / Autor
<i>Quercus polymorpha</i>	Nuevo León	Pine-oak forest / Bosque de pino-encino	0.90	16	Rojas-García et al. (2015)
<i>Quercus</i> spp.	Nuevo León	Oak-pine forest / Bosque de encino-pino	0.95	32	Aguirre and Jiménez (2011)



Aerial biomass values obtained with each of the remote sensing methods were compared against TFM values through simple, quadratic and cubic linear regressions; the simple linear regression model was selected since it offered better adjustment and was the only method that had significance ( $P < 0.001$ ). Results are shown in Table 5. Portable LIDAR had the best relation with 94.53 % followed by the normal color PR at ground level with 82.48 %. On the other hand, according to Table 6, there is an important variation in the calculation of aerial biomass, since the values at ground level determinations were doubled compared to those obtained in the aerial PR (379 t in the PR of

de color normal e infrarrojo a nivel de suelo con 0.99 y 0.65 m, respectivamente, mientras que la medición con FR de fotografía aérea de color infrarrojo fue igual que la obtenida con el MTF.

En México, la presencia de ecuaciones que permitan la estimación del DAP a partir de la AT y DC, para el género *Quercus*, es inexistente; por ello se recurrió al uso de ecuaciones obtenidas de mediciones en otras partes del mundo (Balenović et al., 2012). Esto se refleja en una baja precisión de la estimación, lo cual generó una subestimación de la biomasa aérea calculada mediante datos obtenidos desde el VANT.

**Table 5. Simple linear regression of the different methods compared to the traditional forest method, to obtain the aerial biomass of *Quercus* trees.**

**Cuadro 5. Regresión lineal simple de los diferentes métodos comparados con el método tradicional forestal, para la obtención de la biomasa aérea de árboles del género *Quercus*.**

Method/Método	Equation/Ecuación	R <sup>2</sup> (adjusted %)/ R <sup>2</sup> (% ajustado)	Standard deviation of waste/ Desviación estándar de residuos
Portable LIDAR/LIDAR portátil	$y = -20.90 + 1.041 x$	94.53	62.55
Normal color PR at ground level/ FR de color normal a nivel de suelo	$y = 45.43 + 0.8378 x$	82.48	95.04
Infrared PR at ground level/ FR de color infrarrojo a nivel de suelo	$y = -95.49 + 1.112 x$	74.55	140.69
PR of normal color aerial image/ FR de fotografía aérea de color normal	$y = -47.74 + 0.6594 x$	65.30	117.84
PR of infrared color aerial image/ FR de fotografía aérea de color infrarrojo	$y = -29.85 + 0.6496 x$	66.76	112.46

PR: photo-reconstruction. The  $P$  values of the model and the linear term, for each method, were less than 0.001.

FR: fotorreconstrucción. Los valores  $P$  del modelo y el término lineal, para cada método, fueron menores de 0.001.

**Table 6. Aerial biomass (averages of 26 *Quercus* trees) estimated with the six methods evaluated.**

**Cuadro 6. Biomasa aérea (promedios de 26 árboles del género *Quercus*) estimada con los seis métodos evaluados.**

Method/Método	Biomass (t)/Biomasa (t)
Traditional forest method/Tradicional forestal	637.92
Portable LIDAR/LIDAR portátil	650.03
Normal color PR at ground level/FR de color normal a nivel de suelo	621.64
Infrared color PR at ground level/FR de color infrarrojo a nivel de suelo	616.37
PR of normal color aerial image/FR de fotografía aérea de color normal	379.35
PR of infrared color aerial image/FR de fotografía aérea de color infrarrojo	384.56

normal color aerial image up to 650 t with portable LIDAR); at ground level, the biomass also varied from 13 to 30 t with respect to the TFM.

### Limitations of the data collection route design

One of the key aspects for obtaining quality results in the estimation of aerial biomass is a good planning of the route to be traveled, for which, depending on the sensor to be used, specific factors must be considered: 1) the distance between the sensor and the sample, 2) the overlap of images to have an effective PR and 3) the spatial location of the trees. The results indicated that, due to the design of the route followed with portable LIDAR and the PR at ground level (RGB and IR), data could not be obtained (points in the case of the LIDAR or images in the case of PR) of all the faces of the trunks of the trees studied, since the conditions of the land and the objects obstructed the visualization. In addition, to ensure the desired overlap between images, there were differences in the distance between one shot and another, in the height and angle that were caused by the irregularity of the land.

The use of optical sensors at ground level generated greater obstruction in the upper parts of tree crowns, especially in areas where the information needed to generate the 3D structure could not be obtained, due to the position of the camera and the angle when taking pictures. A similar effect occurred in the central zone of the study area, where the lateral faces of the tree crowns were not distinguished because of a higher density of contiguous trees. Another factor that caused errors in the reconstructions of the trunks were tree canopy shadows and the presence of trees with DBH < 7 cm and shrubs.

A positive aspect of aerial images is the cost reduction and its simplicity of use; however, the measurement of tree trunks is difficult, so the estimate is made from TH and CD.

### Limitations of optical sensors

The resolution of each sensor affected the quality and density of points. Such effect was observed in the images captured with the infrared lens. Due to the characteristics of the lens, at ground level, the maximum resolution with IR represented a reduction of 60 % of the total number of points in comparison with the RGB data, while in the 3D reconstruction generated on a UAV, the resolution with IR was reduced 50 % (Table 2). The resolution of the cameras for obtaining the color and infrared images impacted on the amount of data generated in the point clouds when carrying out the photogrammetric process; denser clouds were obtained with the color images compared to those obtained with the infrared camera.

### Cálculo de biomasa aérea

La biomasa aérea se calculó con datos del MTF a través de las ocho ecuaciones alométricas existentes en la región para el género *Quercus*. Se hizo una comparación por medio de pruebas t de student ( $P = 0.01$ ), para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre los resultados de cada ecuación. Con base en este análisis se encontró la ecuación de mayor similitud con el resto. De acuerdo con el Cuadro 4, las fórmulas de Aguirre y Jiménez (2011) y Rojas-García (2015) tuvieron el mayor número de coincidencias.

Los valores de biomasa aérea obtenida con cada uno de los métodos de sensores remotos se compararon contra los valores del MTF a través de regresiones lineales simples, cuadráticas y cúbicas; el modelo de la regresión lineal simple se seleccionó ya que ofreció mejor ajuste y fue el único método que presentó significancia ( $P < 0.001$ ). Los resultados se muestran en el Cuadro 5. LIDAR portátil presentó la mejor relación con 94.53 % seguido de la FR de color normal a nivel de suelo con 82.48 %. Por otro lado, de acuerdo con el Cuadro 6, hay una variación importante en el cálculo de la biomasa aérea, ya que los valores en las determinaciones a nivel de suelo se duplicaron en comparación con los obtenidos en las FR aéreas (379 t en la FR de fotografía aérea de color normal hasta 650 t con LIDAR portátil); a nivel de piso, la biomasa también varió de 13 a 30 t respecto al MTF.

### Limitantes del diseño de levantamiento

Uno de los aspectos clave para la obtención de resultados de calidad en la estimación de biomasa aérea es una buena planeación de la ruta a recorrer, para lo cual, dependiendo del sensor a utilizar se deben considerar ciertos factores: 1) la distancia entre el sensor y la muestra, 2) el traslape de imágenes para realizar una FR efectiva y 3) la ubicación espacial de los árboles. Los resultados indicaron que, debido al diseño de la ruta seguida con LIDAR portátil y las FR a nivel de suelo (RGB e IR), no se pudieron obtener datos (puntos en el caso del LIDAR o fotografías en las FR) de todas las caras de los troncos de los árboles analizados, ya que las condiciones del terreno y los objetos obstruían la visualización. Además, para asegurar la sobreposición deseada entre las fotografías, hubo diferencias en la distancia entre una toma y otra, en la altura y en el ángulo que fueron ocasionadas por la irregularidad del terreno.

El uso de los sensores ópticos al nivel del suelo generó mayor oclusión en las partes superiores de las copas de los árboles, en especial en áreas donde no se pudo obtener la información necesaria para generar la estructura 3D, debido a la posición de la cámara y el

## Extensive use of the terrestrial LIDAR

One of the advantages of using the portable LIDAR was to obtain the three-dimensional structure of the trees. Regarding the use of this method in more extensive or complex areas, the most important factor in this study was the design of the data collection route to obtain a point cloud of all facets of the trees. Another important element is time of data collection; the presence of a very dense canopy with a large number of leaves may limit data record beyond the trunk and the main branches of the trees, although this will depend on the objectives of the study.

All systems have their limitations, the portable LIDAR only measures the distance from the sensor to the object; it does not measure the intensity of the signal that returns to the sensor or the number of returns of the signal, conditions that would facilitate the classification of the point cloud. The technical aspects of LIDAR (distance to objects and resolution of the point cloud) are beyond the control of the analyst because they are fixed characteristics of the system used. Terrestrial sensors (both normal and infrared color) do not allow obtaining information from the top of tree crowns, while sensors on a drone cannot obtain data on the dimensions of the main trunk. Some of these limitations are relatively easy to correct; we can design a mission that obtains land and air data simultaneously and generate a more complete point cloud.

## Conclusions

Height, crown diameter and diameter at breast height (DBH) of each tree were obtained semi-automatically with the portable LIDAR and photo-reconstruction (PR) methods, both at ground level and from an unmanned aerial vehicle (UAV). Portable LIDAR was the most accurate alternative ( $R^2 = 0.945$ ) to estimate the aerial biomass, taking as reference the estimation through the traditional forest method (TFM). In contrast, PR of normal color aerial image showed the poorest results ( $R^2 = 0.653$ ), due to the impossibility of measuring the DBH. The time spent in data collection with sensors decreased more than 80 % in relation to the TFM. Portable LIDAR technology and optical sensors are low cost alternatives for obtaining point clouds and have the potential to generate forest application data.

## Acknowledgments

The authors thank the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for the scholarship granted to Roberto E. Huerta to perform his Master.

ángulo al momento de las tomas. Un efecto similar se dio en la zona central del área de estudio, donde las caras laterales de las copas no se distinguieron a causa de una mayor densidad de árboles contiguos. Otro factor que ocasionó errores en las reconstrucciones de los troncos fueron las sombras del dosel arbóreo y la presencia de árboles de DAP < 7 cm y arbustos.

Un aspecto positivo de la fotografía aérea es el abaratamiento de costos de la tecnología de VANT y su sencillez de uso; sin embargo, la medición de troncos de árboles se dificulta, por lo cual la estimación se hace partir de la AT y DC.

## Limitantes de los sensores ópticos

La resolución de cada sensor repercutió en la calidad y la densidad de puntos. Tal efecto se observó en las fotografías capturadas con la integración del lente infrarrojo. Debido a las características del lente, a nivel del suelo, la resolución máxima con IR representó una reducción de 60 % del número total de puntos en comparación con los datos RGB, mientras que en la reconstrucción 3D generada a partir de VANT, la resolución con IR se redujo 50 % (Cuadro 2). La resolución de las cámaras para la obtención de las fotografías a color e infrarrojas impactó en la cantidad de datos generados en las nubes de puntos al llevar a cabo el procesamiento fotogramétrico; se obtuvieron nubes más densas con las fotografías a color en comparación con obtenidas con la cámara infrarroja.

## Uso extensivo del LIDAR terrestre

Una de las ventajas del uso del LIDAR portátil fue el poder obtener la estructura tridimensional de los árboles. Considerando el uso de este método en áreas más extensas o complejas, el factor más importante que se determinó en este trabajo fue el diseño de la ruta de levantamiento de datos para obtener una nube de puntos de todas las facetas de los árboles. Otro elemento relevante es la época de la toma de datos; la presencia de un dosel muy denso con gran cantidad de hojas puede limitar el registro de datos más allá del tronco y las ramas principales de los árboles, aunque esto dependerá de los objetivos del levantamiento.

Todos los sistemas tienen sus limitaciones, el LIDAR portátil únicamente mide la distancia del sensor a objeto; no mide la intensidad de la señal que regresa al sensor ni el número de retornos de la señal, condiciones que facilitarían la clasificación de la nube de puntos. Los aspectos técnicos del LIDAR (distancia hacia los objetos y resolución de la nube de puntos), están fuera del control del analista pues son características fijas del sistema utilizado. Los sensores terrestres (tanto el color normal como el infrarrojo)

*End of English version*

## References / Referencias

- Aguirre, C. O. A., & Jiménez, P. J. (2011). Evaluación del contenido de carbono en bosque del sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(6), 73–84. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-11322011000400007](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322011000400007)
- Balenović, I., Seletković, A., Pernar, R., Ostrogović, M. Z., & Jazbec, A. (2012). Regression models of DBH estimation for photogrammetric measurement. *Journal of Forestry Society of Croatia*, 136(3–4), 129–139. Retrieved from [https://hrcaj.srce.hr/index.php?id\\_clanak\\_jezik=120571&show=clanak](https://hrcaj.srce.hr/index.php?id_clanak_jezik=120571&show=clanak)
- Bosse, M., Zlot, R., & Flick, P. (2012). Zebedee: Design of a spring-mounted 3-D range sensor with application to mobile mapping. *IEEE Transactions on Robotics*, 28(5), 1104–1119. doi: 10.1109/TRO.2012.2200990
- Brodu, N., & Lague, D. (2012). 3D Terrestrial LIDAR data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 68, 121–134. Retrieved from <https://arxiv.org/pdf/1107.0550.pdf>
- Calders, K., Newnham, G., Burt, A., Murphy, S., Raunonen, P., Herold, M., ...Kaasalainen, M. (2014). Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(2), 198–208. doi: 10.1111/2041-210X.12301
- Chen, T. C., & Chung, K. L. (2001). An efficient randomized algorithm for detecting circles. *Comput Vis Image Und*, 83(2), 172–191. doi: 10.1006/cviu.2001.0923
- Dassot, M., Constant, T., & Fournier, M. (2011). The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges. *Annals of Forest Science*, 68(5), 959–974. doi: 10.1007/s13595-011-0102-2
- Li, X., Chen, Z., Zhang, L., & Jia, D. (2016). Construction and accuracy test of a 3D model on non-metric camera images using Agisoft PhotoScan. *Procedia Environmental Sciences*, 36, 84–190. doi: 10.1016/j.proenv.2016.09.031
- Liang, X., Hyypä, J., Kukko, A., Kaartinen, H., Jaakkola, A., & Yu, X. (2014a). The use of a mobile laser scanning system for mapping large forest plots. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 11(9), 1504–1508. doi: 10.1109/LGRS.2013.2297418
- Liang, X., Jaakkola, A., Wang, Y., Hyypä, J., Honkavaara, E., Liu, J., & Kaartinen, H. (2014b). The use of a hand-held camera for individual tree 3d mapping in forest sample plots. *Remote Sensing*, 6(7), 6587–6603. doi: 10.3390/rs6076587
- Moskal, M., & Zheng, G. (2012). Retrieving forest inventory variables with terrestrial laser scanning (tls) in urban heterogeneous forest. *Remote Sensing*, 4(1), 1–20. doi: 10.3390/rs4010001
- Návar, J. (2009). Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management*, 257, 427–434. doi: 10.1016/j.foreco.2008.09.028
- no permiten obtener la información de la parte alta de las copas de los árboles, mientras que los sensores montados en un VANT no pueden obtener datos de las dimensiones del tronco principal. Algunas de estas limitaciones son relativamente fáciles de subsanar; se puede diseñar una misión que obtenga datos terrestres y aéreos simultáneamente y generar una nube de puntos más completa.

## Conclusiones

La altura, diámetro de copa y diámetro a la altura del pecho (DAP) de cada árbol se lograron obtener de forma semiautomática con los métodos LIDAR portátil y fotorreconstrucción (FR), tanto a nivel del suelo como desde un vehículo aéreo no tripulado (VANT). LIDAR portátil representó la alternativa más precisa ( $R^2 = 0.945$ ) para realizar el cálculo de la biomasa aérea, tomando como referencia la estimación a través del método tradicional forestal (MTF). En contraste, la FR de fotografía aérea de color normal mostró los resultados más pobres ( $R^2 = 0.653$ ), debido a la imposibilidad de medir el DAP. El tiempo invertido en el levantamiento de datos con los sensores disminuyó más de 80 % con relación al MTF. La tecnología LIDAR portátil y los sensores ópticos son alternativas de bajo costo para la obtención de nubes de puntos y tienen potencial para la generación de datos de aplicación forestal.

## Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada a Roberto E. Huerta para realizar sus estudios de maestría.

*Fin de la versión en español*



- Návar-Cháidez, J. J. (2010). Biomass allometry for tree species of northwestern Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 12(3), 507–519. Retrieved from <http://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/391/393>
- Rodríguez, R., Jiménez, J., Aguirre, Ó. A., Treviño, E. J., Razo, R. (2009). Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. *Ra Ximhai*, 5(3) 317–327. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/461/46111817006.pdf>
- Rojas-García, F., De Jong, B. H. J., Martínez-Zurimendí, P., & Paz-Pellat, F. (2015). Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science*, 72, 835–864. doi: 10.1007/s13595-015-0456-y
- Seidel, D., Albert, K., Ammer, C., Fehrmann, L., & Kleinn, C. (2013). Using terrestrial laser scanning to support biomass estimation in densely stocked young tree plantations. *International Journal of Remote Sensing*, 34, 8699–8709. doi: 10.1080/01431161.2013.848308
- Trochta, J., Krůček, M., Vrška, T., & Král, K. (2017). 3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR. *PLoS ONE*, 12(5), e0176871. doi: 10.1371/journal.pone.0176871
- Xu, L., & Oja, E. (1993). Randomized Hough Transform (RHT): Basic mechanisms, algorithms, and computational complexities. *CVGIP: Image understandings*, 57(2), 131–154. doi: 10.1006/ciun.1993.1009
- Yépez, F. D., & Lozano, D. F. (2014). Mapeo del arbolado urbano con LIDAR aéreo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5, 58–75. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63439016005>