

Análisis de posiciones y densidades TLS (*Terrestrial Laser Scanning*) para optimizar la estimación de parámetros forestales

Torrallba, J., Ruiz, L.A., Carbonell-Rivera, J.P., Crespo-Peremarch, P.

Geo-Environmental Cartography and Remote Sensing Group (CGAT), Department of Cartographic Engineering, Geodesy and Photogrammetry, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España.
jetorpe@upv.es

Resumen: En las últimas décadas se ha investigado la viabilidad y eficiencia del uso del TLS (*Terrestrial Laser Scanning*) en la realización de inventarios forestales. La adquisición de las nubes de puntos en campo implica definir los puntos de ubicación del sensor para registrar la mayor proporción de parámetros forestales en la parcela. En este estudio se realizó un análisis de 31 combinaciones de posiciones de escaneo TLS, considerando desde un escaneo simple en el centro de la parcela hasta un escaneo múltiple de 9 escaneos en 28 parcelas de bosque Mediterráneo. Se generaron modelos de regresión lineal múltiple para la obtención de la altura dominante de la parcela y la biomasa aérea total, a partir de las métricas de distribución de alturas de las nubes de puntos en cada combinación. También se analizó la evolución de la precisión de los modelos seleccionados al reducir aleatoriamente la densidad de puntos. En el análisis del número de escaneos TLS se observa que el aumento del número de tomas no implica una mejora en los modelos para ninguna de las dos variables. Por otro lado, el estudio de la reducción de densidad de puntos muestra para ambas variables forestales que la precisión del modelo de regresión no comienza a decrecer significativamente hasta reducir la nube a una centésima parte de la densidad original de puntos.

Palabras clave: láser escáner terrestre (TLS), estructura forestal, escaneo múltiple, submuestra aleatoria.

Analyzing the position and density distributions of the Terrestrial Laser Scanning (TLS) to retrieve forest parameters

Abstract: *In the last decades, the feasibility and efficiency of using TLS (Terrestrial Laser Scanning) in forest inventories have been studied. Data acquisition requires defining the scan locations to register the largest proportion of forest parameters in the plot. In this study, 31 location combinations of TLS scanners, from a single scan in the center of the plot to nine scans, were analyzed in 28 plots in a Mediterranean forest. Multiple linear regression models were generated to estimate mean height and aboveground biomass (AGB) from point cloud elevation metrics from each combination of scan locations. Additionally, the accuracy variation of the selected models by randomly reducing the point density was also analyzed. The analysis of the number of TLS scans shows that an increment in the number of scans does not necessarily mean an improvement in the statistical models for either variable. Results show for both variables that the influence of the point density on the accuracy of the regression model is significant when its value drops below one hundredth part of the initial point density.*

Keywords: *Terrestrial Laser Scanner (TLS), forest structure, multi-scan, random subsample.*

1. INTRODUCCIÓN

El láser escáner terrestre (TLS; *Terrestrial Laser Scanner*) permite la obtención de una nube de puntos 3D de los objetos localizados a su alrededor, basándose para ello en el tiempo que el haz láser tarda en interceptar un objeto y volver al instrumento. Este dispositivo ha sido empleado en diferentes disciplinas, en concreto en la medición rápida y no destructiva del entorno forestal.

El TLS posee la capacidad de registrar en detalle la estructura vertical y horizontal de una parcela de bosque, lo que le confiere una gran utilidad en la realización de inventarios forestales (Wilkes et al., 2017). Sin embargo, la precisión alcanzada por el TLS en la parcela dependerá tanto de las especificaciones técnicas del sensor (frecuencia de pulso, precisión, ángulo de escaneo, etc.) como de los atributos del bosque y del número de escaneos que se realicen.

Dentro de una parcela existen zonas de oclusión pues- to que la vegetación existente por detrás de los elementos

en la dirección de barrido del láser no queda registrada. Esta ausencia de registro de información aumenta cuanto más densa sea la vegetación, más cerca esté del sensor y menor sea el número de escaneos. De la misma manera se produce oclusión en el perfil vertical del bosque, donde la morfología del árbol, su desarrollo de copa y la altura mínima a la que comiencen las ramas, determinará el grado de detalle y la altura máxima que registrará el sensor.

Para abordar el efecto de oclusión en los datos TLS en parcelas forestales se emplea el escaneo múltiple. Este enfoque implica un diseño previo de la distribución de escaneos y establecer puntos de referencia artificiales para el co-registro de las diferentes exploraciones láser, reduciendo la rentabilidad de esta tecnología (Bauwens et al., 2016), por lo que optimizar el número de tomas y su densidad puede disminuir el tiempo y costes de adquisición.

En este documento se analiza el efecto de (i) la distribución y el número de escaneos y (ii) la densidad de

puntos, sobre la estimación de dos parámetros forestales: la altura dominante y la biomasa. Para ello, se realizaron distintas combinaciones de escaneos TLS y se redujo la densidad de puntos de forma aleatoria para evaluar su influencia. Los modelos se generaron mediante regresión lineal múltiple con datos obtenidos en 28 parcelas forestales sobre la altura dominante (H_{dp}) y la biomasa aérea total (B_{ta}/ha), utilizando métricas de distribución de alturas de las nubes de puntos como variables independientes.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Las 28 parcelas de estudio se enmarcan en el Parque Natural de la Sierra de Espadán en la vertiente Este de la península Ibérica, provincia de Castellón. El área de estudio está dominada por masas heterogéneas de bosque mediterráneo, cuyas principales especies arbóreas son *Pinus halepensis*, *P. pinaster*, *Quercus suber* y *Q. ilex*, acompañadas de sotobosque diverso (Torralba et al., 2018).

En cada parcela circular de 15 m de radio (706 m²) se identificaron las especies arbóreas, y de cada individuo se midió el diámetro normal (D_n) a 1,30 m de la base del tronco en árboles mayores de 5 cm, la altura dominante de la parcela (altura de los 7 árboles más gruesos) y la altura de la base de la copa para los mismos pies.

Con las mediciones de campo se estimó para cada parcela: (i) la altura dominante (H_{dp}) a partir de la media de las mediciones y (ii) la biomasa aérea total (B_{ta}/ha) aplicando las funciones alométricas de árbol completo (parte aérea) de Montero et al., (2005).

2.1. Adquisición y procesamiento de los datos TLS

Los datos TLS fueron adquiridos de forma simultánea a la medición de los parámetros forestales, con un escáner Faro Focus 3D 120, con un rango operacional de 0,6 a 120 m, una precisión de ± 2 mm a 25 m, una frecuencia de pulso de 97 Hz, un ángulo de escaneo horizontal de 300° y vertical de 360°, una longitud de onda de 905 nm y una divergencia del haz de 0,19 rad.

Para minimizar la oclusión y recopilar la variabilidad estructural de las parcelas, en cada una se estacionó el escáner en 9 posiciones (Figura 1) generando una nube de puntos por cada posición.

El preprocesado de los datos TLS se realizó con el programa *LAStools* (Version 180409). En las nubes de puntos se identificaron los puntos del suelo con los que se generó el modelo digital del terreno (MDT). Posteriormente, el MDT se empleó en la normalización de las alturas de la nube de puntos.

Para analizar la distribución y el número de posiciones TLS se intercalaron entre sí las diferentes nubes de puntos de una parcela, desde un escaneo simple en el centro de la parcela hasta combinar en un escaneo múltiple 9 nubes de puntos.

Se descartó el análisis de todas las posibles combinaciones ($9! = 362\,880$) y se optó por seleccionar las 31 combinaciones que reflejasen la estructura de la parcela cubriendo la totalidad del área y reduciendo la oclusión. Por tanto, se prescindió de los escaneos únicos excepto el central, y en las combinaciones con 2 posiciones del escáner se optó por eliminar el estacionamiento central

y combinar los escaneos situados en extremos opuestos a 15 y a 7,5 m. de distancia. De las combinaciones con 3 posiciones se seleccionaron las 20 combinaciones más representativas y sencillas de ejecutar en campo. Con 4 escaneos sólo se seleccionaron los puntos cardinales principales y secundarios sin la posición central, con 5 escaneos se seleccionaron los mismo que con 4, pero añadiendo la nube adquirida desde la posición central. En la combinación con 8 estaciones se eligieron todas las posiciones de escáner menos la central, y la última combinación fue agrupando todas las nubes de puntos adquiridas en la parcela (9 escaneos). Se descartó realizar pruebas con 6 y 7 posiciones del escáner puesto que operativamente en campo no se optimiza el tiempo de adquisición y registra menos información de la estructura de la parcela en comparación con la ejecución de 8 o 9 estacionamientos.

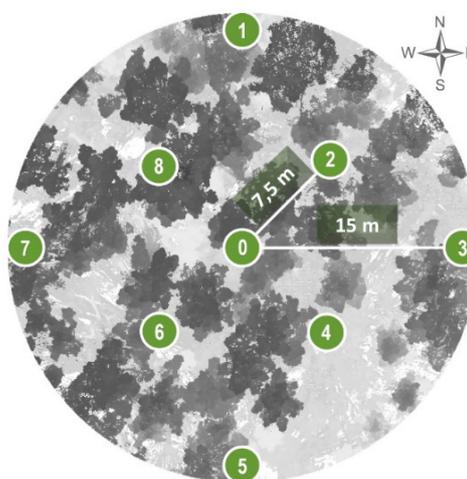


Figura 1. Representación de las 9 posiciones del escáner TLS sobre la vista cenital de una parcela donde se observa la cobertura de copa.

2.2. Cálculo de métricas y generación de modelos estadísticos

Mediante el programa *Fusion/LDV* se obtuvieron las métricas de distribución de alturas (elevación: máx., mín., media, desviación estándar, varianza, distancia intercuartil, desviaciones absolutas, L-Momentos, percentiles (P05, P10, ..., P95) entre otras) para las 31 combinaciones en cada una de las 28 parcelas.

Las métricas de distribución de alturas se emplearon como variables independientes en los modelos predictores de los parámetros forestales. Se descartó el empleo de métricas de intensidad ya que no se realizó la calibración radiométrica de los datos TLS. En la extracción de métricas sólo se consideraron los puntos por encima de 10 cm, descartando así los puntos pertenecientes al suelo.

Antes de generar los modelos de regresión se realizó una selección de las métricas de altura TLS obtenidas para una misma combinación en las 28 parcelas mediante el criterio de información de Akaike (AIC, por sus siglas en inglés) (Akaike, 1973) para todos los modelos posibles, con un máximo de tres métricas por combinación. Se generaron los modelos de regresión lineal múltiple para cada combinación de posiciones del escáner, donde las

variables dependientes fueron H_{Dp} y B_{Ta} . La evaluación de los modelos se realizó comparando el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el RMSE normalizado (nRMSE), entendido como el RMSE dividido por la media de los valores observados, todos ellos obtenidos mediante validación cruzada (*Leave-one-out cross-validation* (LOOCV)).

2.3. Reducción de la densidad de puntos de la nube TLS

A las 2 combinaciones con mayor R^2_{adj} , una para H_{Dp} y otra para B_{Ta} , se les aplicó una reducción progresiva del número de puntos de la nube TLS mediante submuestreo aleatorio, teniendo todos los puntos de la nube las mismas opciones de ser considerados en la muestra. La reducción de la densidad se implementó con el programa *CloudCompare* (cloudcompare.org), sustrayendo sucesivamente el 10% de los puntos en la nube. A continuación, se evaluó la densidad en otras 24 variaciones, reduciendo la nube en intervalos discontinuos hasta obtener una densidad de puntos TLS respecto de la densidad original de: 0,9%; 0,5%; 0,1%; 0,09%; 0,05%; 0,01%; 0,009%; 0,008%; ... 0,001%; 0,0009%; 0,0008%; ... 0,0001%.

Para cada parámetro forestal se obtuvieron así 38 sub-nubes de densidad de puntos decreciente (en la figura 2 se representan 3 de los porcentajes implementados), a partir de las cuales se calcularon las métricas de distribución de alturas siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. Del conjunto de métricas obtenidas, sólo se seleccionaron las tres métricas con las que fue construido el modelo de regresión en el paso anterior, determinándose nuevamente los pesos de los coeficientes de las variables explicativas. Finalmente, la evaluación de los modelos se realizó comparando R^2_{adj} , RMSE y nRMSE utilizando LOOCV.

3. RESULTADOS

En la tabla 2 se muestran los índices de evaluación y las métricas seleccionadas para las 31 combinaciones de nubes de puntos TLS con sus correspondientes valores de R^2_{adj} , RMSE y nRMSE.

El valor de R^2_{adj} para la altura dominante alcanzó 0,854 con la combinación 417 y un RMSE de 0,9 metros. Esta combinación obtuvo una mejora en el R^2_{adj} del 11,8% y un 14,4% con respecto a emplear un único escaneo central o las 9 posiciones del escáner. Para la biomasa aérea total, el estadístico R^2_{adj} alcanzó 0,828 en la combinación 24680, con un error medio de 22,8 t/ha. Esta combinación obtuvo un 12,8% más de R^2_{adj} respecto a la obtenida con un único escaneado simple y un 2% respecto a la combinación de 9 posiciones. El nRMSE de la variable altura está por debajo del 10% mientras que para la biomasa se encuentra en torno al 20%.

La figura 3 muestra la evaluación de la reducción de densidad de puntos, donde se observa que la fiabilidad de las predicciones para ambas variables no comienza a decrecer significativamente hasta reducir la nube a una o dos centésimas partes de la densidad de puntos original, en concreto, el estadístico R^2_{adj} descendió por debajo de 0,75 cuando se analizó la milésima parte de la densidad de puntos original.

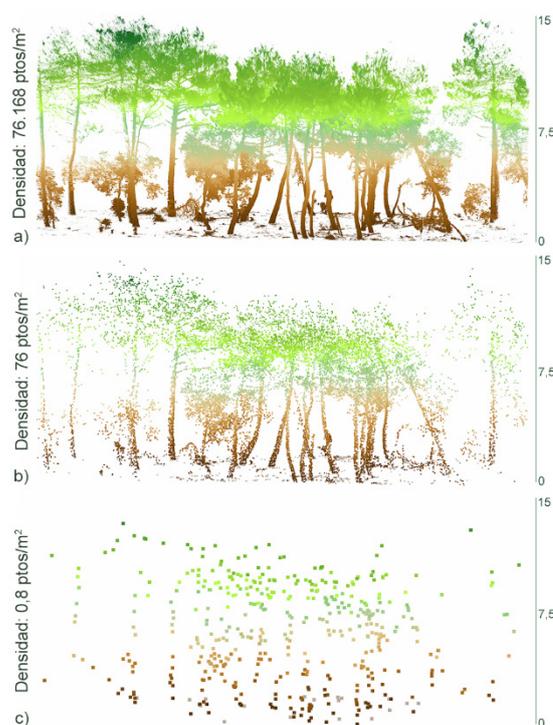


Figura 2. Efecto de la reducción progresiva y aleatoria de los puntos de la nube TLS para una sección de una parcela de bosque mixto. Porcentaje de puntos en la nube: a) 100; b) 0,1; c) 0,001.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En esta investigación hemos analizado cómo influyen el número de escaneos y la densidad de puntos de la nube TLS en la precisión de los modelos de estimación de H_{Dp} y B_{Ta} en parcelas forestales. Los modelos de regresión para la altura muestran un resultado óptimo con una distribución triangular de 2 escaneos periféricos y otro vértice a 7,5 m. Esta disposición de estaciones permite registrar información de toda la parcela, minimizando la oclusión y sin necesidad de realizar 9 estaciones. El RMSE para la altura es aproximadamente 1 m, razonable si se considera la oclusión que tiene el TLS en el estrato superior de la parcela, en particular en la detección del ápice. El nRMSE de la variable altura evidenció que el conjunto de alturas de las 28 parcelas es homogéneo, a pesar de ser parcelas de bosque puro y mixto.

Para la variable biomasa la combinación de 4 estacionamientos simétricos, situados a 7,5 m, más el escaneo central obtuvo el mejor resultado. A pesar de alcanzar un R^2_{adj} de 0,82, se obtiene un RMSE elevado (aproximadamente 22,8 t/ha) lo que equivale aplicando los valores modulares para *Pinus halepensis* de Montero et al., (2005) a 100 pies de 30 cm de D_n . La heterogeneidad de la biomasa en la muestra de 28 parcelas genera un nRMSE más elevado que para la altura.

Como se refleja en la figura 2, la estructura de la distribución de la vegetación en la parcela se mantiene a lo largo de la reducción aleatoria de la densidad de puntos en las nubes TLS, lo que ayuda a entender por qué el estadístico R^2_{adj} para la altura se mantiene con valores superiores a 0,80 hasta reducir la nube de puntos a densidades inferiores de 1,5 ptos/m².

