

Baissero García, A.; García, M.; Oliva, P. Reconstrucción de la Geometría de Adquisición en Nubes de Puntos de Láser Terrestre Multi-Escaneo mediante Indexación Angular Adaptativa

# Reconstrucción de la Geometría de Adquisición en Nubes de Puntos de Láser Terrestre Multi-Escaneo mediante Indexación Angular Adaptativa

**Baissero García, Adrián Enrico**<sup>1</sup> **García, Mariano**<sup>1</sup> **Oliva, Patricia**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Alcalá (UAH), Colegios 2, Madrid, España.

ORCID: Baissero García [0009-0004-9431-1869](https://orcid.org/0009-0004-9431-1869) García [0000-0001-6260-5791](https://orcid.org/0000-0001-6260-5791) Oliva [0000-0001-5051-3662](https://orcid.org/0000-0001-5051-3662)

Correspondencia: [adrian.baissero@uah.es](mailto:adrian.baissero@uah.es) [mariano.garcia@uah.es](mailto:mariano.garcia@uah.es) [patricia.oliva@uah.es](mailto:patricia.oliva@uah.es)

## RESUMEN

El Escaneo Láser Terrestre (TLS) permite estimar la distribución en el dosel de variables estructurales forestales como LAI y LAD. Sin embargo, la fusión de múltiples escaneos puede eliminar la perspectiva original de adquisición, limitando modelos basados en ángulos. Este trabajo propone un enfoque geométrico que reconstruye las posiciones de escaneo mediante el cono ciego del trípode, combinado con indexación angular adaptativa (AIX) y trazado angular con propagación kNN 3D. El método posicionó el escaneo con un RMSE medio de 2 cm y redujo el espacio de búsqueda al  $0,055 \pm 0,01\%$  de la nube, acelerando las consultas de búsqueda angular hasta 1157 veces.

**Palabras clave:** *Escaneo Láser Terrestre (TLS); Estructura forestal; Procesamiento de nubes de puntos; Indexado angular.*


Fecha de recepción: 19 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 19 febrero 2026

# Reconstrucción de la Geometría de Adquisición en Nubes de Puntos de Láser Terrestre Multi-Escaneo mediante Indexación Angular Adaptativa

Baissero García, Adrián Enrico <sup>(1)</sup>, García, Mariano <sup>(1)</sup>, Oliva, Patricia <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Universidad de Alcalá (UAH), Colegios 2, España.

 0009-0004-9431-1869, adrian.baissero@uah.es ;  0000-0001-6260-5791, mariano.garcia@uah.es.

 0000-0001-5051-3662, patricia.oliva@uah.es.

**Resumen:** El Escaneo Láser Terrestre (TLS) permite estimar la distribución en el dosel de variables estructurales forestales como LAI y LAD. Sin embargo, la fusión de múltiples escaneos puede eliminar la perspectiva original de adquisición, limitando modelos basados en ángulos. Este trabajo propone un enfoque geométrico que reconstruye las posiciones de escaneo mediante el cono ciego del trípode, combinado con indexación angular adaptativa (AIX) y trazado angular con propagación kNN 3D. El método posicionó el escaneo con un RMSE medio de 2 cm y redujo el espacio de búsqueda al  $0,055 \pm 0,01\%$  de la nube, acelerando las consultas de búsqueda angular hasta 1157 veces.

**Palabras clave:** Escaneo Láser Terrestre (TLS); Estructura forestal; Procesamiento de nubes de puntos; Indexado angular

## ***Reconstructing acquisition geometry in multi-scan terrestrial laser scanning point clouds through Adaptive Angular Indexing***

**Abstract:** Terrestrial Laser Scanning (TLS) enables the estimation of canopy structural distribution of forest variables such as LAI and LAD. However, merging multiple scans may remove the original acquisition perspective, limiting angle-based models. This study proposes a geometric framework that reconstructs scan positions using tripod shadow detection, combined with Adaptive Angular Indexing (AIX) and angular tracing with 3D kNN propagation. The method positioned the scan stations with a mean RMSE of 2 cm and reduced the search space to  $0.055 \pm 0.01\%$  of the point cloud, accelerating angular search queries by up to 1157x.

**Keywords:** Terrestrial Laser Scanning (TLS); Forest structure; Point cloud processing; Angular indexing

## 1. INTRODUCCIÓN

Los bosques desempeñan un papel esencial en el ciclo global del carbono, y la estimación precisa de su biomasa y estructura es fundamental para cuantificar el balance de carbono (Da Conceição Bispo *et al.*, 2016). Entre las variables estructurales más relevantes se encuentran el índice de área foliar (LAI) y la distribución vertical de área foliar (LAD), cuya estimación requiere una descripción geométrica detallada del dosel. En este contexto, el Escaneo Láser Terrestre (TLS) ha transformado la ecología forestal al proporcionar reconstrucciones tridimensionales de alta resolución de la arquitectura arbórea, permitiendo derivar métricas de inventariado tradicional (Calders *et al.*, 2020; Newnham *et al.*, 2015).

Sin embargo, el TLS se enfrenta al problema crítico de la oclusión. Los elementos vegetales más cercanos interceptan el haz láser, reduciendo la visibilidad de capas internas o superiores del dosel (Béland & Kobayashi, 2021; Zhao *et al.*, 2015). Para mitigar este efecto, es habitual realizar múltiples escaneos desde distintas posiciones y fusionarlos posteriormente mediante procesos de registro (Calders *et al.*, 2020). El proceso de registro puede implicar una pérdida parcial o

total de metadatos asociados a cada punto, como el identificador de estación o la posición original del escáner (Eickeler & Borrmann, 2020).

Esta pérdida supone una limitación crítica para los métodos basados en el dominio angular como aquellos fundamentados en la probabilidad de huecos (gap probability) y en la reconstrucción del camino óptico del pulso requieren conocer la geometría relativa entre sensor y objeto (Béland *et al.*, 2011; Hosoi & Omasa, 2006). Sin esta relación vectorial, las estimaciones de LAD y otras funciones estructurales dependientes del ángulo pueden presentar sesgos sistemáticos (Eickeler & Borrmann, 2020).

Adicionalmente, las nubes de puntos TLS forestales suelen alcanzar tamaños de cientos de millones de puntos por parcela, lo que plantea un desafío computacional significativo.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un enfoque geométrico que permita recuperar la perspectiva de adquisición a partir de nubes fusionadas sin información de origen.

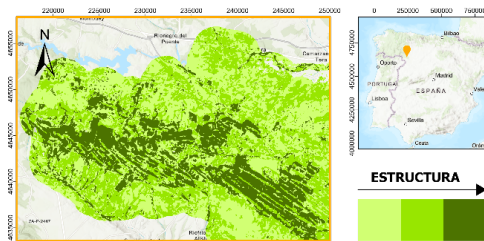
## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Área de estudio

El estudio se desarrolló en dos áreas forestales de la Península Ibérica con condiciones climáticas y estructurales diferentes. Ambas zonas fueron muestreadas tras incendios severos, sin embargo, en el marco de este estudio solo se considerarán las parcelas fuera del perímetro incendiado.

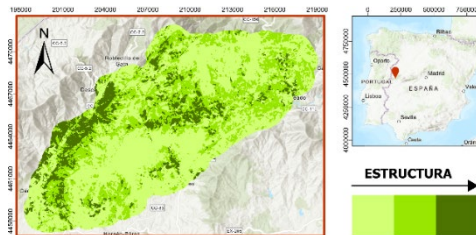
Los mapas (Figs. 1 y 2) muestran la clasificación estructural obtenida mediante K-means a partir de datos LiDAR aerotransportado PNOA, en tres clases — masas dispersas ( $H_{media} < 4$  m), masas abiertas ( $H_{media} \approx 5$  m) y masas cerradas ( $H_{media} \approx 10$  m) —; los tonos más oscuros corresponden a clases de mayor desarrollo estructural.

Sierra de la Culebra (Fig. 1) presenta un clima mediterráneo templado (Csb). La cobertura arbórea está dominada por *Pinus sylvestris* L. y *Pinus pinea* L., con presencia dispersa de *Quercus* (MITECO, 2008).



**Figura 1.** Clasificación estructural de la biomasa en la S. de la Culebra, Zamora, a partir de datos PNOA LiDAR (2015-2021).

Sierra de Gata (Fig. 2) presenta un clima mediterráneo cálido (Csa). La vegetación dominante incluye *Quercus ilex* L., *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. y *Pinus pinaster* Ait., con un sotobosque caracterizado por especies del género *Cistus* y *Erica* (MITECO, 2008).



**Figura 2.** Clasificación estructural de la biomasa en la S. de Gata, Cáceres, a partir de datos PNOA LiDAR (2015-2021).

### 2.2. Datos

Las parcelas fueron adquiridas mediante TLS Leica RTC360 en modo de alta resolución, empleando cinco posiciones de escaneo por parcela con el fin de reducir efectos de oclusión. Se utilizaron un total de 7 parcelas para la reconstrucción de la geometría de adquisición (5 en Sierra de la Culebra y 2 en Sierra de Gata). Las posiciones fueron registradas en el programa Leica Cyclone. Inferencia geométrica de las posiciones de escaneo TLS

La localización de las posiciones originales del escáner se estimó a partir de los puntos clasificados como suelo en la nube de puntos registrada, explotando dos rasgos geométricos característicos en TLS: (i) un incremento local de la densidad de retornos en el entorno inmediato del instrumento y (ii) el “anillo” circular asociada a la sombra derivada del cono ciego bajo el tripode.

Para reducir el coste computacional, se colapsó la coordenada Z de los puntos, reduciendo una dimensión en los datos. Se calculó una medida local de densidad mediante distancia al k vecino más cercano,  $d_k$ . Se seleccionó el subconjunto más denso, conservando los puntos con  $d_k$  inferior al cuantil 5%.

La detección del anillo se realiza mediante una implementación de RANSAC, incorporando un término de penalización por ocupación interior. Para cada hipótesis de circunferencia  $(c_x, c_y, r)$  se computó un conjunto de *inliers* en el anillo y un recuento de puntos dentro del círculo, generados por otras posiciones de escaneo. Se maximizó la puntuación:

$$S(c_x, c_y, r) = N_{inlier} - \lambda N_{int} \quad (1)$$

Donde  $N_{inlier}$  es el número de puntos compatibles con el anillo y  $N_{int}$ , siendo  $\lambda$  el peso de penalización. Cada detección inicial se refinó estimando el borde interno del anillo: a partir del centroide estimado, se seleccionó el punto más cercano al centro en ángulos azimutales discretos de  $1^\circ$ , ejecutando un segundo RANSAC para obtener  $(c_x, c_y, r)$  refinados. Los puntos involucrados en la detección se retiran para permitir la detección iterativa de múltiples estaciones.

Para estimar la altura efectiva del sensor, se utiliza el semiángulo del cono ciego del instrumento ( $\beta$ ), aproximándose a partir del radio del anillo ( $r$ ):

$$h \sim \frac{r}{\tan(\beta)} \quad (2)$$

Este modelo asume terreno plano; en zonas con pendiente, la proyección del cono sobre el suelo se deforma, y el ajuste circular constituye una aproximación.

### 2.3. Indexación Angular Adaptativa (AIX)

Para reasignar puntos a estaciones TLS reconstruidas es necesario recuperar, de forma eficiente, la estructura angular implícita del escaneo a partir de nubes XYZ. Con este objetivo se desarrolló AIX (Adaptive Angular Index), un índice híbrido que combina: (i) una partición espacial jerárquica del espacio de puntos (hojas) y (ii) una discretización angular por estación que permite resolver consultas y filtrados angulares sin recorrer la nube completa. El índice se genera como un archivo auxiliar con extensión AIX, generado junto a un archivo original LAS o LAZ.

La nube se divide recursivamente en subconjuntos (hojas) mediante particiones conceptualmente derivadas de estructuras jerárquicas Octree (Meagher, D., 1982) y particiones por eje tipo k-d tree (Bentley, 1975). En cada hoja  $l$  se almacena su caja envolvente “axis-aligned

bounding box" (AABB),  $b_l^{min}$  y  $b_l^{max}$ , calculada a partir de los puntos contenidos en la hoja.

Posteriormente, se genera una proyección angular para cada estación  $s$  (posición  $c_s = (c_x, c_y, c_z)$ ), se define el vector relativo a un punto  $p$  como  $v = p - c_s$ . Los ángulos esféricos se obtienen como:

$$\alpha(p, s) = atan2(v_y, v_x) \quad (3)$$

$$\varepsilon(p, s) = atan2(v_z, \sqrt{v_x^2 + v_y^2}) \quad (4)$$

Dónde  $\alpha$  es el azimut y  $\varepsilon$  la elevación. AIX no necesita almacenar  $(\alpha, \varepsilon)$  por punto: en su lugar, calcula para cada hoja  $l$  un rango angular conservador  $[\alpha_{l,s}^{min}, \alpha_{l,s}^{max}]$ ,  $[\varepsilon_{l,s}^{min}, \varepsilon_{l,s}^{max}]$  a partir de la AABB de la hoja, garantizando que cualquier punto de la hoja proyecta dentro de dicho rango.

Para cada estación se define una rejilla angular gruesa  $(N_\alpha, N_\varepsilon)$  y se asigna cada hoja a la rejilla  $(i, j)$ , que interseca su rango angular:

$$i = \left\lfloor N_\alpha \frac{\alpha \bmod 2\pi}{2\pi} \right\rfloor, j = \left\lfloor N_\varepsilon \frac{\varepsilon + \pi/2}{\pi} \right\rfloor \quad (5)$$

El archivo AIX genera una función inversa por estación:

$$L_s(i, j) \rightarrow \{l\} \quad (6)$$

Dónde  $L_s(i, j)$  representa el conjunto de hojas espaciales potencialmente visibles desde la estación  $s$  en la rejilla angular  $(i, j)$ .

Este diseño reduce drásticamente el número de puntos evaluados, generando una consulta angular más eficiente. Dada una ventana angular  $W = [\alpha_0, \alpha_1] \times [\varepsilon_0, \varepsilon_1]$  para una estación  $s$ , AIX obtiene primero las hojas candidatas uniendo las rejillas angulares que cubren  $W$ , y luego aplica un filtrado punto a punto sobre esas hojas.

Finalmente, la nube se reorganiza mediante un proceso denominado *repacking*, en el que los puntos se reordenan en disco, agrupados por hoja espacial, reduciendo el coste de acceso secuencial durante las consultas.

#### 2.4. Asignación de puntos a estaciones reconstruidas

La asignación se fundamenta en reconstruir, para cada estación  $s$ , una representación lo más fiel posible de la adquisición original del TLS en el dominio angular. En lugar de tratar la nube fusionada como un conjunto discreto de puntos, el método define una rejilla esférica de direcciones  $(\alpha, \varepsilon)$  que cubre el campo de visión completo del escáner y cuya densidad está determinada por la resolución angular instrumental. Esta rejilla se modela como continua para absorber tanto el ruido geométrico de la nube, evitando que pequeñas desviaciones angulares excluyan retornos que son compatibles con la dirección del pulso.

Por cada dirección en la rejilla, se busca el retorno más cercano a la estación, replicando el "primer retorno". Los

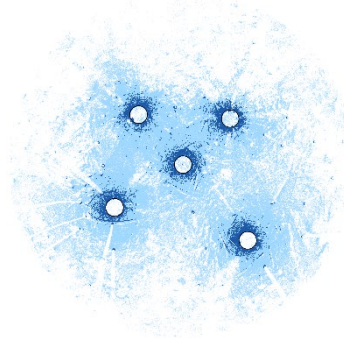
retornos observados se identifican con el escáner de origen.

Tras esta fase, pueden persistir puntos sin asignación o zonas de conflicto entre la estación de origen. Sobre estos puntos, se aplica una propagación iterativa basada en kNN tridimensional.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La inferencia geométrica permitió identificar de forma consistente las posiciones de las estaciones. En todos los casos analizados se obtuvo una solución estable con un RMSE promedio de 2 centímetros, con una desviación estándar de 0,5 centímetros. La detección es robusta ante oclusiones parciales del anillo; no obstante, una oclusión severa por vegetación densa en el entorno inmediato del instrumento puede impedir una detección fiable.

La Fig. 3 muestra un ejemplo representativo de parcela, donde pueden observarse los anillos detectados. Los puntos de color azul oscuro representan los puntos conservados tras filtrar mediante la densidad de  $k$  vecinos más cercanos.



**Figura 3.** Inferencia geométrica de las posiciones originales de las estaciones.

Para evaluar el rendimiento del archivo AIX se tomaron nubes desde 300 millones de puntos hasta tamaños inferiores a 20 millones de puntos. El índice introduce un coste fijo aproximado de 2 MB, más un término proporcional de 0,01% ( $\pm 0,004\%$ ) del tamaño del archivo LAS/LAZ correspondiente.

El mecanismo de indexado angular limitó de forma consistente el número de candidatos que debían analizarse en cada consulta a  $0,055 \pm 0,01\%$  del total de puntos en la nube, independientemente del tamaño, lo que supone una reducción de tres órdenes de magnitud.

Generar el archivo AIX supone un tiempo de construcción, que muestra un comportamiento lineal al normalizar según el número de puntos. En el rango analizado, el tiempo medio de construcción fue de 2,916 segundos por cada millón de puntos, con una desviación estándar de 0,344 segundos. En la fase de *repacking*, el tiempo promedio fue de 1,093 segundos, con una desviación estándar de 0,040 segundos.

En cuanto al rendimiento por consulta, excluyendo los costes de construcción y *repacking*, AIX superó de

manera consistente la búsqueda exhaustiva. Para 200.000 consultas por instancia, la aceleración observada osciló entre 833x y 1157x, sin variaciones sistemáticas del tamaño de la nube. La Tabla 1 resume los tiempos medios por consulta con y sin AIX, junto al tiempo total de construcción para distintos tamaños de nube.

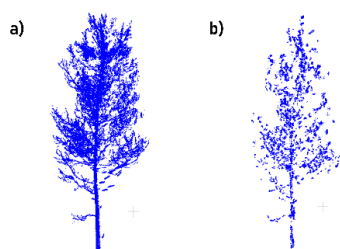
**Tabla 1.** Tiempo promedio por consulta con y sin el índice AIX para distintos tamaños de nube de puntos.

Puntos (Millón)	Tiempo de construcción total AIX (s)	Tiempo por consulta sin AIX (s)	Tiempo por consulta con AIX (s)
300	1182,1	13,7	0,015
150	609,1	8,1	0,007
75	299,8	4,4	0,005
37,5	167,3	2,5	0,003
18,7	67,3	1,3	0,0014

Al considerar los costes de construcción y consulta, el punto de equilibrio (Q\*), definido como el número de consultas necesarias para que el tiempo acumulado de AIX iguale al de la búsqueda exhaustiva, mostró una dependencia lineal con el tamaño de la nube. Normalizado por tamaño, el umbral se sitúa entre 3,4 y 4,4 consultas por millón de puntos.

La asignación de puntos se realizó mediante trazado angular continuo replicando la resolución original del escáner (62"). La asignación inicial requirió aproximadamente 182 millones de consultas por posición de escáner y permitió asignar el 91,3%  $\pm$  4,1% de los puntos. De los puntos asignados, menos del 7,8% presentaron conflicto, los cuales, junto con los puntos no asignados, fueron completados mediante propagación KNN tridimensional.

Si tratamos de reducir el número de consultas angulares, aumentando la dependencia de la reconstrucción por kNN, la plausibilidad visual se degrada muy rápidamente. La Figura 4 muestra la comparación de un árbol en la parcela, entre a) la reconstrucción con muestreo completo para una sola posición de escaneo (37,8% de los puntos totales del árbol) y b) la reconstrucción con paso angular reducido (calculando 1 de cada 3 pulsos). Los resultados visuales indican que el método parece estable cuando la rejilla angular reproduce la resolución del sensor, pero se degrada rápidamente al depender en mayor medida en la reconstrucción mediante kNN.



**Figura 4.** Inspección visual de la reconstrucción con a) paso angular completo y b) paso angular reducido.

#### 4. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la beca FPU de la Universidad de Alcalá (FPU-UAH/23, Adrián Baissero) y el contrato Beatriz Galindo (BG20/00084, Patricia Oliva).

#### 5. REFERENCIAS

- Béland, M., Widlowski, J. L., Fournier, R. A., Côté, J. F., & Verstraete, M. M. (2011). *Estimating leaf area distribution in savanna trees from terrestrial LiDAR measurements*. 151(9), 1252–1266. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.05.004>
- Béland, M., & Kobayashi, H. (2021). *Mapping forest leaf area density from multiview terrestrial lidar*. *Methods in Ecology and Evolution*. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13550>
- Bentley, J. L. (1975). *Multidimensional Binary Search Trees Used for Associative Searching*.
- Calders, K., Adams, J., Armston, J., Bartholomeus, H., Bauwens, S., Bentley, L. P., Chave, J., Danson, F. M., Demol, M., Disney, M., Gaulton, R., Krishna Moorthy, S. M., Levick, S. R., Saarinen, N., Schaaf, C., Stovall, A., Terryn, L., Wilkes, P., & Verbeeck, H. (2020). *Terrestrial laser scanning in forest ecology: Expanding the horizon*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112102>
- Da Conceição Bispo, P., Dos Santos, J. R., De Morisson Valeriano, M., De Alencastro Graça, P. M. L., Balzter, H., França, H., & Da Conceição Bispo, P. (2016). *Predictive models of primary tropical forest structure from geomorphometric variables based on SRTM in the Tapajo's region, Brazilian Amazon*. *PLoS ONE*, 11(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0152009>
- Eickeler, F., & Borrmann, A. (2020). *Retracing Positions of Terrestrial Laser Scanners to Reinstatate Legacy Point Clouds*. Technical University of Munich.
- Hosoi, F., & Omasa, K. (2006). *Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning lidar*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(12), 3610–3618. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.881743>
- Meagher, D. (1982). *Geometric Modeling Using Octree Encoding*. In *COMPUTER GRAPHICS AND IMAGE PROCESSING* (Vol. 19).
- MITECO (2008). *Cuarto Inventario Forestal Nacional*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.
- Newnham, G. J., Armston, J. D., Calders, K., Disney, M. I., Lovell, J. L., Schaaf, C. B., Strahler, A. H., & Mark Danson, F. (2015). *Terrestrial laser scanning for plot-scale forest measurement*. *Current Forestry Reports*, 1(4), 239–251. <https://doi.org/10.1007/s40725-015-0025-5>
- Zhao, K., García, M., Liu, S., Guo, Q., Chen, G., Zhang, X., Zhou, Y., & Meng, X. (2015). *Terrestrial lidar remote sensing of forests: Maximum likelihood estimates of canopy profile, leaf area index, and leaf angle distribution*. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.03.008>