

Estimación de parámetros forestales en *Pinus halepensis* Mill. a partir de nubes de puntos TLS, UAV y fusión TLS-UAV

Jesús Torralba, Juan P. Carbonell-Rivera, Luis A. Ruiz, Pablo Crespo-Peremarch, Jaime Almonacid-Caballer
Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022, Valencia, España. jetorpe@upv.es, juacarri@upv.es, laruiz@upv.es, pabcrepe@cgf.upv.es, jaialca@upvnet.upv.es

Resumen: Las nubes de puntos generadas con láser escáner terrestre (TLS), a partir de imágenes adquiridas con drones (UAV) o combinando ambos conjuntos de datos se han aplicado con éxito en la estimación de parámetros forestales. No obstante, las incertidumbres de los gestores forestales hacia estas tecnologías ralentizan su aplicación en la gestión del bosque. El objetivo principal de este trabajo es comparar la sustitución de las mediciones de inventario tradicional por datos adquiridos con TLS y UAV. Para ello se midió en campo el diámetro normal (dn), la altura máxima (h) y la posición de 40 *Pinus halepensis*, se realizó la captura de datos TLS y un vuelo fotogramétrico con UAV. Los datos TLS y UAV se fusionaron creando un tercer conjunto de datos. Las medidas de campo se compararon con las estimaciones de h , dn , biomasa aérea total (BT) y volumen maderable con corteza (VCC) generadas mediante dos métodos: (i) con modelos de regresión múltiple basados en las métricas de distribución de alturas de las nubes de puntos, y (ii) aplicando funciones alométricas tradicionales a partir del dn y la h estimados. Los resultados muestran que los tres conjuntos de datos estimaron la h con R^2_{adj} cercano al 0,90. El dn obtuvo un R^2_{adj} de 0,91 utilizando la medición directa con TLS, este mismo R^2_{adj} se obtuvo para la biomasa aplicando el mismo dn derivado de TLS en una ecuación alométrica. Por último, el VCC obtuvo un R^2_{adj} de 0,92 utilizando la fusión de datos TLS y UAV. Estos resultados sugieren que las nubes TLS, UAV y la fusión de ambas pueden sustituir a las técnicas de inventariado tradicional en ciertos entornos.

Palabras clave: láser escáner terrestre, RPAS/drones, inventario forestal, bosque mediterráneo, árbol individual.

Forest parameter estimation in Pinus halepensis from TLS, UAV, and TLS-UAV fused point clouds

Abstract: Point clouds generated with terrestrial laser scanning (TLS), derived imagery from drones (UAV) or combining both data sets have been successfully applied in the estimation of forest parameters. However, the uncertainties of forest managers towards these technologies slow down their application in forest management. The main objective of this work is to compare the substitution of traditional inventory measurements by data acquired with TLS and UAV. For this purpose, the diameter at breast height (DBH), maximum height (h) and position of 40 *Pinus halepensis* were measured in the field. TLS data capture and UAV photogrammetric flight were also performed. TLS and UAV data were merged creating a third dataset. The field measurements were compared with estimates of h , DBH, aboveground biomass (AGB) and volume over bark (VOB) generated by two methods: (i) multiple regression models based on point cloud height distribution metrics; and (ii) applying traditional allometric functions from the estimated DBH and h . The results show that all three data sets estimated h with R^2_{adj} close to 0.90. The DBH obtained a R^2_{adj} of 0.91 using the direct measurement of the TLS; the same R^2_{adj} was obtained for AGB by applying the same DBH of the TLS in an allometric equation. Finally, the VOB obtained a R^2_{adj} of 0.92 using TLS and UAV data fusion. These results suggest that TLS, UAV clouds and the fusion of both can replace traditional inventory techniques in specific environments.

Keywords: terrestrial laser scanner, unmanned aerial vehicles, forest inventory, Mediterranean forest, individual tree.

1. INTRODUCCIÓN

La recopilación precisa de información dendrométrica es esencial para mejorar la confianza en las decisiones de los gestores forestales y apoyar los posibles avances en la planificación forestal. Quizás los parámetros más importantes en el inventario forestal sean la biomasa aérea total (BT) y el volumen maderable del árbol, que se modelan y predicen a partir de otras variables como el diámetro normal (dn) y la altura máxima (h). Sin embargo, el inventario tradicional es un proceso laborioso, que puede durar años y generar incertidumbre sobre la forma en la que se realizan las mediciones (McRoberts y Tomppo, 2007).

En los últimos años, el láser escáner terrestre (TLS), las nubes de puntos generadas a partir de imágenes adquiridas con UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) o la combinación de ambos conjuntos de datos están permitiendo la extracción de parámetros de estructura de la vegetación forestal (Tian et al., 2019). El TLS capta la fina estructura vertical del bosque, pero debido al limitado campo de visión del escáner en la dirección vertical, así como la oclusión de otros objetos en la dirección de transmisión de los haces láser, la información de la parte superior del dosel es difícilmente registrada (van Leeuwen y Nieuwenhuis, 2010). Por otro lado, la fotogrametría aplicada a imágenes

obtenidas a partir de UAV puede generar nubes de puntos del dosel forestal para completar la información del TLS. Por ello, la fusión de ambos conjuntos de datos, siempre que se lleve a cabo un registro geométrico adecuado de las nubes de puntos, puede resultar complementaria para el análisis de parámetros forestales.

Existen diferentes métodos para determinar la *h* de los árboles a partir de las nubes de puntos adquiridas con TLS y con UAV, pero la gran mayoría se basa en el análisis del retorno de máxima altura o en la relaciones estadísticas inferidas a partir de las métricas de distribución de alturas de los retornos (van Leeuwen y Nieuwenhuis, 2010). Con respecto a la extracción del *dn*, se pueden emplear varios modelos matemáticos, ya sean algebraicos o geométricos, que aproximan el tronco del árbol a un cilindro, un cono o una elipse. Uno de los métodos más implementados es el consenso de muestra aleatoria RANSAC (Schnabel et al., 2007).

El objetivo de este estudio es contribuir a la caracterización de los árboles individuales a partir de nubes de puntos TLS, UAV y la fusión de ambos, comparando las medidas de campo con: (1) las estimaciones de la *h*, el *dn*, la *BT* y volumen maderable con corteza (*VCC*) generadas a partir de modelos de regresión múltiple basados en las métricas de distribución de alturas; (2.a) el *dn* medido automáticamente con el algoritmo RANSAC; y (2.b) la *BT* y *VCC* aplicando en las funciones alométricas el *dn* y la *h* estimados en los procesos (1) y (2.a).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se enmarca en el Parque Natural de la Sierra Calderona en la vertiente este de la península Ibérica, situado entre las provincias de Valencia y Castellón. El área de interés es una franja de monte de 260×35 m y está dominada por individuos de *P. halepensis* dispersos con un sotobosque conformado por individuos de *Pistacia lentiscus* L., *Salvia rosmarinus* L., *Juniperus oxycedrus* L., *Cistus albidus* L. y *Rhamnus lycioides* L. En la Tabla 1 se recopilan las características generales de los árboles.

Tabla 1. Resumen de estadísticas de los árboles presentes en el área de estudio, donde: *dn*, es el diámetro normal; *h*, es la altura total del árbol; *BT*, es la biomasa aérea total; y *VCC*, es el volumen maderable con corteza.

| | <i>dn</i> (cm) | <i>h</i> (m) | <i>BT</i> (kg) | <i>VCC</i> (dm ³) |
|-------------------|----------------|--------------|----------------|-------------------------------|
| Mínimo | 9,0 | 3,6 | 16,0 | 15,0 |
| Máximo | 49,6 | 15,2 | 695,7 | 513,1 |
| Media | 29,4 | 7,6 | 246,1 | 221,7 |
| Desviación típica | 9,2 | 2,3 | 147,9 | 132,3 |

2.1. Datos de inventario manual, UAV y TLS

El trabajo de campo consistió en la identificación de 40 individuos de *P. halepensis*, y la medición del *dn* con forcípula y la *h* con hipsómetro VERTEX. Al mismo tiempo se registró la posición de cada árbol con un GPS Leica 1200 RTK cuya precisión nominal horizontal fue de ± (10 mm + 1 ppm) y vertical de ± (20 mm + 1 ppm). En gabinete se estimaron 2 variables forestales: la *BT* de cada árbol empleando las ecuaciones de Montero *et al.* (2005) para *P. halepensis*; y el *VCC* aplicando la ecuación

modelo 11 (Ecuación 1) para *P. halepensis* con forma de cubicación 2, 3 y 5 descrita en la tabla 401 del Tercer Inventario Forestal Nacional para la provincia de Valencia (MAPA, 2007). La forma de cubicación se determinó mediante una inspección visual de las nubes de puntos TLS individualizadas para cada árbol, siguiendo los criterios descritos en el MAPA (2007).

$$VCC = p \cdot dn^q \cdot h^r \tag{1}$$

donde *p*, *q* y *r* son parámetros ajustados para la provincia, especie y forma de cubicación.

El trabajo de campo con el UAV consistió en un vuelo utilizando un dron *DJI Inspire 2* equipado con una cámara *Zenmuse X5S*. La duración del vuelo fue de 7 minutos en el que se tomaron 144 imágenes en una extensión de 1 ha, realizando pasadas longitudinales a una altitud media de 50 m, con un solape del 75%, y un ángulo de adquisición de 65°. También se adquirieron 6 puntos de control (GCPs, *Ground Control Points*) con el mismo GPS RTK.

Los datos TLS fueron adquiridos de forma simultánea a la medición de los parámetros forestales con un escáner *Trimble TX8*, con un rango operacional de 0,6 a 120 m, un error sistemático de alcance menor a 2 mm y una precisión angular de 80 microradianes. Este sensor tiene un ángulo de escaneo horizontal de 360° y vertical de 317°, y una longitud de onda de 1500 nm. Para minimizar la oclusión y recopilar información de todos los árboles del área se estacionó el sensor en 11 posiciones en zigzag como se observa en la Figura 1. En cada posición se generó una nube de puntos en aproximadamente 3 minutos. También se emplazaron 18 esferas para realizar el registro, con el fin de que en cada escaneo se identificaran al menos 4 objetivos esféricos comunes con los escaneos adyacentes. Estos objetivos esféricos se georreferenciaron con el mismo GPS RTK.

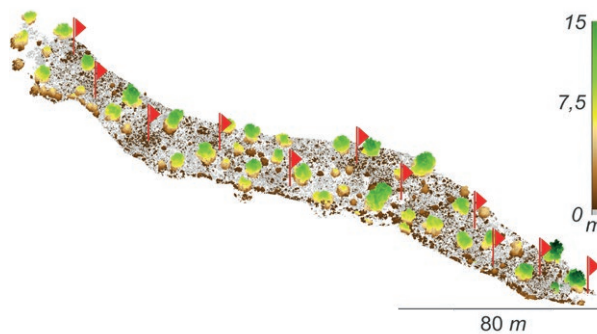


Figura 1. Área de estudio representada con la nube TLS. Las banderas rojas representan las posiciones del escáner TLS.

2.2. Procesado de los datos

El proceso fotogramétrico para obtener las nubes de puntos a partir de las imágenes adquiridas con UAV se realizó en *AgiSoft Metashape*®. Este proceso tiene 3 pasos clave: (i) la calibración radiométrica de las imágenes compensando el nivel de negro, ajustando la ganancia, exposición y sensibilidad del sensor, y corrigiendo del efecto de viñeteado del objetivo; (ii) la alineación de las imágenes

para reconstruir la escena de vuelo considerando los parámetros de orientación interna y externa de la cámara y los GCPs, empleando también estos últimos para escalar el bloque fotogramétrico y dotarlo de coordenadas absolutas; y (iii) la densificación de la nube de puntos mediante el cálculo de mapas de profundidad (Carbonell-Rivera et al., 2022).

Las 11 nubes de puntos TLS se registraron y georreferenciaron con las 18 esferas de referencia utilizando el software *Trimble RealWorks*®. El proceso de registro consistió en reestablecer la posición de cada escaneo al momento de la adquisición de los datos empleando la técnica de registro basada en objetos, después se georreferenció la nube resultante proporcionándole coordenadas absolutas.

Tras procesar los datos UAV y TLS, se recortaron ambos conjuntos de datos para estudiar solamente las áreas comunes. Las nubes TLS y UAV recortadas y georreferenciadas mediante los *GCPs* se fusionaron, generando un tercer conjunto de datos (TLS-UAV) sin aplicar transformaciones adicionales (Tian et al., 2019). A continuación, se procesaron los tres conjuntos de datos con el programa *LAStools*®: se eliminaron los puntos anómalos, se identificaron los puntos del suelo con los que se calculó el modelo digital del terreno (MDT) y se clasificaron los puntos de vegetación en baja, media y alta. El MDT se empleó en la normalización de las alturas de la nube.

Para aislar los árboles se utilizaron las clases suelo y vegetación alta de la nube de puntos TLS. Con estos conjuntos de puntos se generaron las envolventes cóncavas que encerraban cada una de las copas, obteniendo como resultado un polígono por árbol. A cada polígono se le aplicó un *buffer* de 0,25 m, empleándose para recortar las nubes TLS, UAV y TLS-UAV (Figura 2). Finalmente, en los árboles TLS individualizados se estimó el *dn* con el algoritmo *RANSAC* (Schnabel et al., 2007) (*dn-TLS-Ra*), ajustando la nube de puntos a un cilindro. Para implementar el algoritmo primero se realizó una sección del tronco de 20 cm entre 120 y 140 cm de la altura, calculándose el número de puntos de la sección resultante. Si el número de puntos era superior a 50 se aplicaba el algoritmo, de lo contrario se ampliaba la sección del tronco a 100 cm entre 80 y 180 cm de altura, aplicándose posteriormente el algoritmo.

2.3. Obtención de métricas, modelos estadísticos y aplicación de ecuaciones

Con el empleo del programa FUSION/LDV se obtuvieron las métricas de distribución de alturas. Estas métricas se emplearon como variables independientes en los modelos predictores de los parámetros forestales, utilizando para su selección el criterio de información Akaike (Akaike, 1973) estableciendo un máximo de tres métricas. Una vez seleccionadas las métricas se generaron modelos de regresión lineal múltiple para determinar: (i) la altura de los árboles con TLS (*h-TLS*), UAV (*h-UAV*) y TLS-UAV (*h-Fusión*); (ii) el *dn* con TLS (*dn-TLS-R*) y con UAV (*dn-UAV*); (iii) la biomasa con TLS (*BT-TLS-R*), UAV (*BT-UAV-R*) y TLS-UAV (*BT-Fusión-R*); y (iv) el volumen maderable con TLS (*VCC-TLS-R*), UAV (*VCC-UAV-R*) y TLS-UAV (*VCC-Fusión-R*). Los modelos

generados se evaluaron comparando el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) aplicando validación cruzada (*Leave-one-out cross-validation (LOOCV)*).

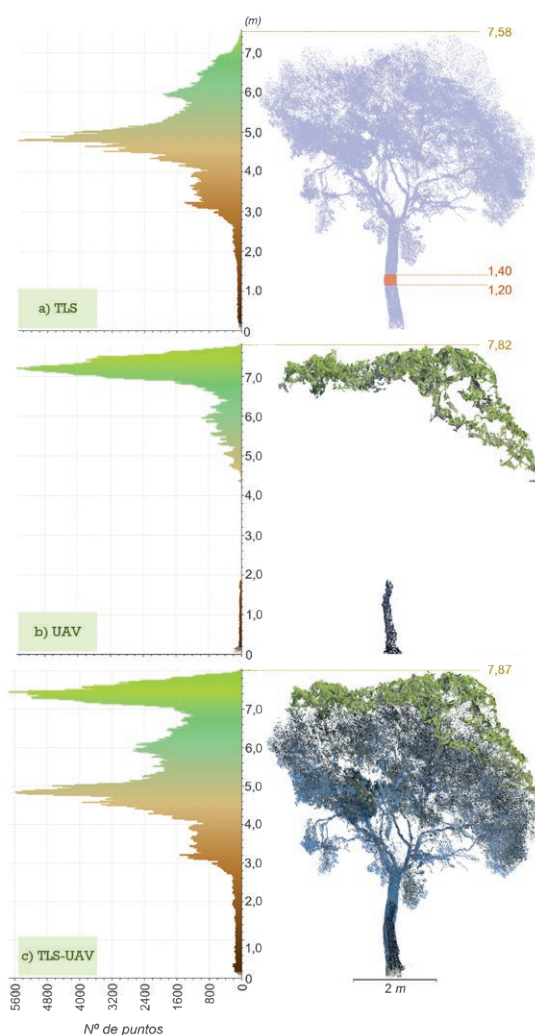


Figura 2. Perfiles de densidad de puntos con respecto a la altura para cada conjunto de datos (izquierda). Nubes de puntos con la *h* y *dn-TLS-Ra* (derecha).

Por otro lado, se aplicaron las ecuaciones de biomasa de Montero et al. (2005) empleando el *dn-TLS-Ra* obtenido con *RANSAC* (*BT-TLS-E*), y el *dn-UAV* obtenido en el modelo de regresión (*BT-UAV-E*). El *VCC* se estimó de tres formas diferentes: (i) con la nube TLS relacionando *dn-TLS-Ra* con *h-TLS* (*VCC-TLS-E*); (ii) con la nube UAV relacionando *dn-UAV* con *h-UAV* (*VCC-UAV-E*); y (iii) con la nube fusionada, donde se empleó el *dn-TLS-Ra* con la *h-Fusión* (*VCC-Fusión-E*). La evaluación se realizó comparando el R^2_{adj} y el RMSE.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra la comparación de la distribución de puntos en cada sensor para un árbol ejemplo. El TLS concentra la mayor cantidad de puntos en la sección intermedia, describiendo en detalle la estructura de la copa de árbol, y el UAV sólo registra puntos en la parte superior

de la copa, en parte debido a que sólo se realizaron pasadas longitudinales y no transversales.

La altura de los árboles fue correctamente estimada por los 3 conjuntos de datos con los modelos de regresión, aunque sin diferencias significativas entre sí. Los tres modelos eligieron la elevación máxima (*Elev.max.*) como variable discriminadora (Tabla 2), a pesar de que existen variaciones considerables en la distribución de puntos respecto a la altura en los tres conjuntos. No obstante, la baja fracción de cabida cubierta y la configuración de posiciones del sensor TLS (Figura 1), permitieron registrar la *h* de los árboles con una precisión similar a la obtenida con la nube de puntos UAV.

Tabla 2. Comparación de R^2_{adj} y RMSE en la estimación de los parámetros forestales altura (*h*), diámetro normal (*dn*), biomasa total del árbol (*BT*), volumen con corteza (*VCC*) con datos TLS, UAV y TLS-UAV.

| Parámetro | Método | R ² | RMSE | Métricas |
|--------------|----------------|----------------|-----------------------|--|
| h-TLS | Regresión | 0,89 | 0,75 m | Elev.max. |
| h-UAV | Regresión | 0,88 | 0,78 m | Elev.max. |
| h-Fusión | Regresión | 0,90 | 0,69 m | Elev.max., Elev.media |
| dn-TLS-R | Regresión | 0,55 | 5,96 cm | Elev.max., Elev.media |
| dn-TLS-Ra | RANSAC | 0,91 | 2,26 cm | - |
| dn-UAV | Regresión | 0,61 | 5,58 cm | Elev.max. |
| BT-TLS-R | Regresión | 0,47 | 103,20 kg | Elev.max., Elev.media |
| BT-UAV-R | Regresión | 0,52 | 99,54 kg | Elev.max., Elev.max., Elev.media |
| BT-Fusión-R | Regresión | 0,54 | 95,22 kg | Elev.media, Elev.moda |
| VCC-TLS-R | Regresión | 0,76 | 62,86 dm ³ | Elev.max., Elev.media |
| VCC-UAV-R | Regresión | 0,80 | 57,32 dm ³ | Elev.max., |
| VCC-Fusión-R | Regresión | 0,81 | 58,07 dm ³ | Elev.max., |
| BT-TLS-E | Ec. Alométrica | 0,91 | 42,23 kg | - |
| BT-UAV-E | Ec. Alométrica | 0,70 | 65,40 kg | - |
| VCC-TLS-E | Ec. Alométrica | 0,91 | 35,92 dm ³ | - |
| VCC-UAV-E | Ec. Alométrica | 0,82 | 54,29 dm ³ | - |
| VCC-Fusión-E | Ec. Alométrica | 0,92 | 32,66 dm ³ | - |

Con el método RANSAC se estimaron el 80% de los *dn*, quedando excluidos los de aquellos árboles donde las ramas bajas impedían la adquisición de puntos del tronco. En este sentido, se alcanzó un R^2_{adj} de 0,91 (RMSE=2,26 cm) mejorando en un 36% y un 30% la precisión con respecto a los modelos de regresión *dn-TLS-R* (RMSE=5,96 cm) y *dn-UAV* (RMSE=5,58 cm), respectivamente.

El empleo de mediciones directas en las nubes de puntos mejoró los resultados en la estimación de *BT* y *VCC* con respecto a los modelos de regresión. Concretamente la estimación de la *BT-TLS-E* con el *dn* medido con RANSAC mejoró en un 44%, 39% y 37% la estimación realizada con los modelos de regresión para el TLS, UAV y Fusión, respectivamente. En el caso de la variable *VCC* la fusión de ambos conjuntos, *VCC-Fusión-E*, alcanzó un 0,92 y un RMSE de 32,66 dm³, mejorando en un 10% los resultados sobre UAV, aunque sin diferencias significativas en relación con el TLS debido a que ambos emplean el mismo *dn* en la estimación.

4. CONCLUSIONES

Los resultados muestran la viabilidad de utilizar datos UAV, TLS y combinar ambos para extraer diferentes características dendrométricas de *Pinus halepensis* en bosques mediterráneos abiertos. Con los modelos de regresión múltiple basados en las métricas de altura se obtuvieron resultados precisos para *h* en los tres conjuntos de datos, aunque cabe esperar errores mayores con TLS en bosques más densos. La medición automática con RANSAC del *dn* en la nube TLS es precisa, no obstante, los principales factores que afectan a la precisión son la oclusión generada por la estructura de las copas y la distancia sensor-árbol, ya que disminuyen considerablemente el número de puntos en el tronco. Ello puede limitar la eficiencia del método en zonas de vegetación densa. El método propuesto de extracción del *dn* a partir de la nube de puntos TLS para estimar la *BT* y el *VCC* con funciones alométricas mejora la precisión respecto a los modelos basados en métricas de alturas. Los resultados también muestran que la fusión de las nubes de puntos TLS y UAV mejoran la estimación del *VCC*. En futuros trabajos se evaluará el rendimiento de la metodología en zonas con mayor densidad arbórea.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el Fondo de Garantía Juvenil en I+D+i del Ministerio de Trabajo y Economía Social de España, por “FSE Invierte en tu futuro” y el proyecto de I+D+I PID2020-117808RB-C21 financiado por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Akaike, H. 1973. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. En *Proceedings of the 2nd International Symposium on Information*, pp. 267-281. Akadémiai Kiadó, Budapest, Hungary.
- Carbonell-Rivera, J.P., Torralba, J., Estornell, J., Ruiz, L.A., Crespo-Peremarch, P. 2022. Classification of Mediterranean Shrub Species from UAV Point Clouds. *Remote Sensing*, 14, 199.
- MAPA. 2007. *Tercer Inventario Forestal Nacional, 1997-2007. Explicaciones y Métodos*. Valencia. Madrid, España.
- McRoberts, R., Tomppo, E. 2007. Remote sensing support for national forest inventories. *Remote Sensing of Environment*, 110, 412-419.
- Montero, G., Ruiz-Peinado, R., Muñoz, M. 2005. *Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles*. INIA, Madrid.
- Schnabel, R., Wahl, R., Klein, R. 2007. Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection. *Computer Graphics Forum*, 26, 214-226.
- Tian, J., Dai, T., Li, H., Liao, C., Teng, W., Hu, Q., Ma, W., Xu, Y. 2019. A Novel Tree Height Extraction Approach for Individual Trees by Combining TLS and UAV Image-Based Point Cloud Integration. *Forests*, 10, 537.