

Comparación de parámetros dendrométricos en almendros utilizando láser escáner terrestre (TLS) y fotogrametría digital automatizada (SfM)

Fernández-Sarría, A. ⁽¹⁾, Estornell, J. ⁽¹⁾, López-Cortés, I. ⁽²⁾, Velázquez-Martí, B. ⁽³⁾, Salazar, D. ⁽²⁾

⁽¹⁾Dpto. Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría. Universitat Politècnica de València.

Camino de Vera s/n 46022 Valencia. España. afernan@upv.es, jaescr@upv.es

⁽²⁾Dpto. Producción Vegetal, Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n, 46022, Valencia. España.

islocor@upv.es, dsalazar@prv.upv.es

⁽³⁾Dpto. de Ingeniería Rural y Agroalimentaria. Universitat Politècnica de València.

Camino de Vera s/n 46022 Valencia España. borvemar@dmta.upv.es

Resumen: El desarrollo de metodologías que permitan obtener parámetros dendrométricos de una manera precisa y eficiente aplicados a la gestión de plantaciones frutales muestra un interés científico en el campo de la agricultura de precisión. En este trabajo se compararon los parámetros altura total (Ht), de copa (Hc), diámetro de tronco (Dt) y de copa (Dc) de 15 almendros en el término municipal de Viver, Castellón, obtenidos a partir de las nubes de puntos registrados mediante un láser escáner terrestre y las derivadas a partir de un conjunto de imágenes tomadas en cada árbol aplicando fotogrametría automatizada. Los resultados mostraron una buena correspondencia entre ambos conjuntos de datos con valores de R^2 en Ht , Hc , Dc y Dt de 0,85, 0,87, 0,88 y 0,91, respectivamente. Los resultados de este estudio demuestran el potencial de las técnicas de fotogrametría digital automatizada partiendo de fotografías sin calibración previa de la cámara para obtener los parámetros principales de almendros, frente a otras técnicas más costosas y más lentas.

Palabras Clave: Structure from Motion (SfM), nube de puntos 3D, láser escáner terrestre (TLS), dendrometría.

Abstract: The development of methodologies to obtain dendrometric parameters in an accurate and efficient way applied to the management of fruit plantations shows a scientific interest in the field of precision agriculture. In this work, the parameters total height (Ht), crown height (Hc), stem diameter (Ds) and crown diameter (Dc) of 15 almond trees in the municipality of Viver, Castellón, were obtained from 3D point clouds measured by a TLS system and derived from a set of images taken in each tree applying automated photogrammetry. The results showed a good correspondence between both data sets with R^2 values in Ht , Hc , Dc and Ds of 0,85, 0,87, 0,91, respectively. The results of this study demonstrate the potential of automated digital photogrammetry techniques based on photographs without prior calibration of the camera to obtain the main parameters of almond trees compared to other techniques more cost-effective.

Keywords: Structure from Motion (SfM), 3D point cloud, terrestrial laser scanning (TLS), dendrometry.

1. INTRODUCCIÓN

La aplicación de herramientas para la optimización del mantenimiento y gestión, en vistas a la reducción de costes y maximizar beneficios en las plantaciones de árboles frutales constituye un ámbito abierto a la investigación. En este sentido el desarrollo de nuevas tecnologías de observación terrestre podría predecir *inputs* necesarios (agua, fertilizantes y plaguicidas) y *outputs* (producción y residuos), lo que permitiría una gestión global y la optimización logística en mano de obra, maquinaria y transporte de productos. Ello mejoraría la competitividad de las áreas productoras.

La tecnología LiDAR (aérea y terrestre) ha sido la principal forma de obtener nubes de puntos 3D de manera masiva. Los avances en el campo de la visión por ordenador (Gosele *et al.*, 2007; Snavely *et al.*, 2008), han permitido la generación de nubes de puntos 3D con detalle derivados no solo de fotografías aéreas, a partir de cámaras utilizadas en fotogrametría, sino también de fotografías tomadas a partir de cámaras no calibradas de bajo coste. Utilizarlas para la reconstrucción de las escenas en 3D difiere fundamentalmente de la fotogrametría

convencional en que la geometría de la escena, las posiciones de la cámara y las orientaciones se resuelven automáticamente sin necesidad de especificar puntos de control con coordenadas tridimensionales. En su lugar, estos parámetros se obtienen de manera automática a través de la identificación de características extraídas en un conjunto de imágenes con recubrimiento y su posterior ajuste en bloque iterativo (Snavely, 2008). Para ello se utilizan algoritmos basados en técnicas fotogramétricas, *Structure From Motion* (SfM) (Wallace *et al.*, 2008), en los que a través de la identificación de manera automática de puntos homólogos en varias imágenes se puede calcular la posición y orientación de la cámara y de cada imagen con solape y ajustar en bloque de manera iterativa el conjunto de imágenes para reconstruir las escenas en 3D. El flujo de procesamiento consta básicamente de 5 fases: (i) detección de características, se examina cada píxel en busca de un determinado patrón; (ii) establecimiento de correspondencias entre puntos en todas las imágenes captadas; (iii) triangulación, para determinar la posición de un punto en el espacio a partir de como mínimo 2 imágenes distintas en las que aparece el punto, y el

conocimiento de la posición de las cámaras para cada una de las imágenes; (iv) ajuste en bloque, se intenta ajustar el grupo de rayos que unen las proyecciones y los puntos físicos de tal forma que el error de reproyección sea el menor posible; (v) creación de modelos 3D densos a partir de la nube de puntos inicial, utilizando técnicas de correlación para expandir las regiones.

Si además se localizan puntos de control con coordenadas medidas con GPS se puede obtener la escala y las coordenadas absolutas de todos los puntos obtenidos. Se obtiene una nube de puntos de alta densidad en 3D, con carácter métrico, la cual se puede triangular, rasterizar, superponer la textura original de las fotografías, exportar en distintos formatos, etc. Sobre la nube de puntos en formato .las se pueden aplicar y analizar los mismos algoritmos de medición que los utilizados sobre datos LiDAR.

Aunque el potencial de esta técnica se ha ensayado en ecosistemas forestales, trabajos previos (Cunliffe *et al.*, 2016) sugieren que existen problemas para definir la estructura de las plantas, debido a las limitaciones en precisión de los modelos de alturas de vegetación, sobre todo los obtenidos mediante cámaras fotográficas en UAVs. Si bien esta forma de capturar el dato puede aportar una información muy valiosa para modelizar copas y alturas, la definición de los troncos es limitada. Por ello, se pretende investigar la modelización de árboles aislados mediante fotografías terrestres, evitando los problemas inherentes a una toma cenital y trabajando con ejemplares individualizados, lo que permite fotografiar con una disposición circular todo el perímetro del árbol. El objetivo de este trabajo es comparar los parámetros geométricos altura total, diámetro de tronco, altura y diámetro de copa en almendros obtenidos a partir de las nubes de puntos 3D observadas mediante un láser escáner terrestre (TLS) y aplicando la técnica SfM sobre un conjunto de fotografías tomadas sobre cada árbol.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio y datos

Se seleccionaron 15 almendros en el municipio de Viver (Castellón), se escanearon utilizando un TLS y se tomaron un conjunto de fotografías de cada uno de ellos. Los datos se tomaron en el mes de noviembre de 2015 periodo en el que el fruto ya ha sido recolectado y el estado fenológico es el BBCH95 coincidente con la senescencia de las hojas observándose la estructura de las ramas de manera clara.

2.2. Procesado de datos TLS

Los almendros se escanearon mediante un FARO® Laser Scanner Focus3D 120 cuyas características principales son: alcance 0,6 a 120 m; precisión en el escaneado 2 mm; velocidad de escaneado hasta 976.000 puntos por segundo; campo de visión 305°; peso 5,2 kg; divergencia del haz 0,19 mrad (0,011°); divergencia del pulso inicial 3,0 mm, circular. Todos los árboles se escanearon desde 4 posiciones y a una distancia similar

en todos ellos de alrededor de 3 m, condicionada por el marco de plantación. De esta manera todos los árboles se escanearon completamente y de manera homogénea. Desde cada posición del TLS se observaron 4 esferas comunes permitiendo realizar el registro y encaje geométrico de las nubes de puntos observados desde cada posición del escáner. El error máximo en este proceso fue de 3 mm considerado aceptable para este estudio. El software utilizado fue Faro Scene Software (version 5.4.4.4) para procesar y manejar datos del láser escáner. Las nubes de puntos se recortaron en cada árbol y los puntos pertenecientes al suelo se eliminaron manualmente generando un fichero para cada árbol. Los datos originales se muestrearon utilizando una distancia de 2 mm. En la Figura 1 (izqda.) se puede observar un árbol representativo de la zona de estudio. A partir de la información contenida en cada fichero se generaron dos ficheros adicionales manualmente, uno con los puntos pertenecientes a las copas y el otro seleccionando los puntos del tronco incluidos hasta la primera bifurcación del mismo. A partir de estos ficheros datos se calcularon para cada árbol la altura total (Ht), la altura de copa (Hc), el diámetro de copa (Dc) y el diámetro de tronco (Dt) aplicando algoritmos desarrollados con Matlab® (versión R2010b, MathWorks, Inc.) y aplicados en otros trabajos (Fernández-Sarría *et al.*, 2013). Los estadísticos de los parámetros arbóreos se pueden ver en la Tabla 2.

2.3. Procesado de fotografías

La cámara réflex digital utilizada fue el modelo DSLR-A330 de Sony, con un sensor CCD de 10,8 megapíxeles, sensibilidad ISO ajustable, siendo el valor ISO-100 el empleado dadas las buenas condiciones de iluminación existentes y el menor ruido radiométrico que introduce este valor. Se fijaron los valores de distancia focal a 18 mm y de factor de apertura focal a $f/16$ y no se cambiaron durante todas las tomas fotográficas para evitar inconsistencias entre fotogramas.

La captura de la información fotográfica se realizó siguiendo las recomendaciones básicas ampliamente difundidas y conocidas, a saber: máxima resolución posible, captura de datos brutos (imágenes en formato RAW y no comprimidas), distancia focal y factor f constantes, distancia al objeto aproximadamente igual, ejes ópticos fotográficos convergentes hacia cada árbol, tomas en disposición circular con un solape entre dos sucesivas de, como mínimo, el 70%, tomas a distintas alturas (si es posible), etc. Para cada almendro se realizaron entre 30 y 60 fotografías a una o dos alturas, dependiendo de cada ejemplar, a una distancia media de unos 4 metros y con una separación entre fotogramas de unos 80 cm. En la Figura 2 se puede ver la disposición de las tomas, así como la nube densa creada para un almendro representativo de la zona de estudio. El proceso fotogramétrico se llevó a cabo en Photoscan Professional versión 1.2.5 (www.agisoft.com). Tras cargar las diferentes imágenes se realiza la autocalibración de la cámara y la alineación de ellas. Los puntos de control tomados con GPS permiten dotar de métrica (coordenadas

y escala) a la nube de puntos, así como determinar los errores cometidos en esta fase. Se puede ver en la Tabla 1 que los errores cometidos son de la magnitud de la precisión del GPS (3,5 cm de promedio).

Tabla 1. Errores (metros) cometidos en la identificación de los puntos GPS en las tomas fotográficas del almendro C1-1-3.

Pto. control	Error	Error en X	Error en Y	Error en Z
2	0.035	-0.034	-0.005	0.009
5	0.047	0.020	-0.040	-0.015
6	0.031	0.019	0.019	0.015
7	0.028	-0.005	0.026	-0.009
Error total	0.036	0.022	0.026	0.013

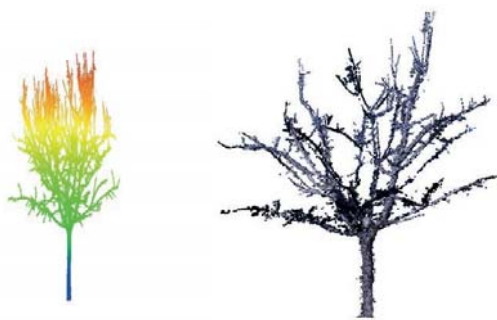


Figura 1. Nubes de puntos obtenidas de un almendro representativo del estudio mediante TLS (izqda.) y a partir de fotografías tomadas con la cámara (dcha.).

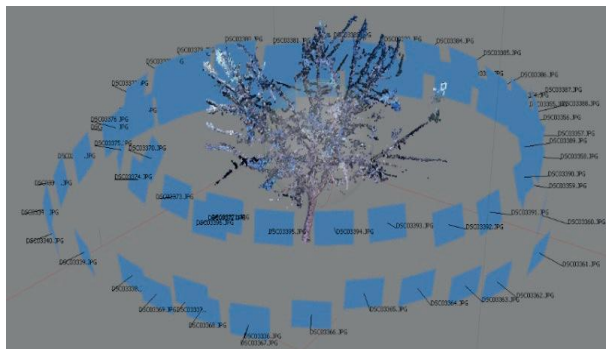


Figura 2. Distribución de las tomas fotográficas para la modelización 3D del árbol anterior.

Una vez calculados los parámetros geométricos H_t , H_c , D_c y D_t , tanto sobre la nube TLS como sobre la nube SfM, se calcularon las diferencias y se analizaron estadísticamente. Para ello en primer lugar se comprobó si las distribuciones de las diferencias seguían una distribución normal. En caso afirmativo se aplicó una prueba t-Student de muestras pareadas para analizar la significancia estadística de las diferencias. En caso contrario se aplicó la prueba de Wilcoxon con un nivel de significación $\alpha=0,05$. Adicionalmente se calcularon modelos ajustados entre los parámetros obtenidos por cada técnica. Por cada ajuste se obtuvieron los valores

del coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se puede observar a partir de las tablas 2 y 3, las diferencias entre los parámetros obtenidos por TLS y SfM fueron bajas siendo para H_t , H_c , D_c y D_t de 0,04 m, 0,06 m, 0,21 m y -0,31 cm, respectivamente. Las diferencias se analizaron estadísticamente y se obtuvo que para los parámetros H_t , H_c y D_t no se observaron diferencias significativas (Tabla 4). En contraste para el caso del diámetro de copa sí que se observaron diferencias estadísticamente significativas. Este resultado puede explicarse teniendo en cuenta la dificultad encontrada para este parámetro en la extracción de la copa aplicando la técnica SfM más teniendo en cuenta que se trata de árboles con poco follaje lo que hace más complejo la reconstrucción 3D a partir de las fotografías tomadas. Es evidente la necesidad de procesos de filtrado y eliminación de puntos anómalos que restan detalle a la nube de puntos. No obstante, los resultados del modelo ajustado entre los valores de este parámetro indican una buena correspondencia con un valor de R^2 y RMSE de 0,88 m y 0,24 m, respectivamente (Figura 3). También se observaron buenos ajustes para el resto de parámetros con valores de R^2 entre 0,85-0,91 (Figuras 4, 5 y 6) y valores RMSE de 0,27 m para la H_t , 0,30 m para la H_c y 0,84 cm para el D_t .

Tabla 2. Estadísticos de los parámetros geométricos derivados a partir de los datos TLS.

Parámetros TLS				
Estadísticos	H_t (m)	H_c (m)	D_c (m)	D_t (cm)
Media	4,04	3,19	3,79	12,6
Desviación T.	0,65	0,57	0,60	2,8
Máximo	5,24	4,32	4,66	17,2
Mínimo	2,97	2,40	2,46	8,5

Tabla 3. Estadísticos de los parámetros geométricos derivados a partir de las nubes de puntos obtenidas aplicando metodología SfM.

Parámetros SfM				
Estadísticos	H_t (m)	H_c (m)	D_c (m)	D_t (cm)
Media	4,00	3,14	3,58	12,9
Desviación T.	0,74	0,75	0,66	2,6
Máximo	5,83	5,01	4,56	18,8
Mínimo	3,09	2,16	2,05	8,9

Tabla 4. Análisis estadístico de las diferencias en los valores H_t , H_c , D_c , D_t obtenidos por TLS y SfM.

Parámetro	Prueba	Estadístico	P-valor
H_t	Wilcoxon	-1,477	0,140
H_c	Wilcoxon	-1,022	0,307
D_c	t-Student	3,637	0,003
D_t	t-Student	-1,407	0,181

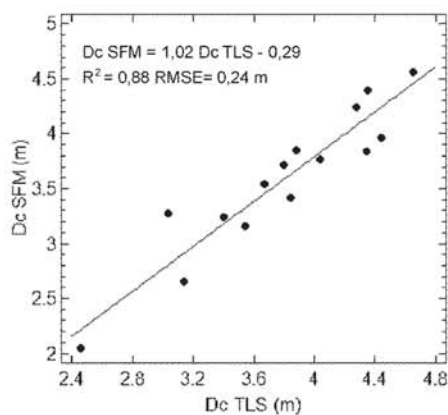


Figura 3. Modelo lineal entre el diámetro de copa (Dc) calculado utilizando los datos TLS y SfM.

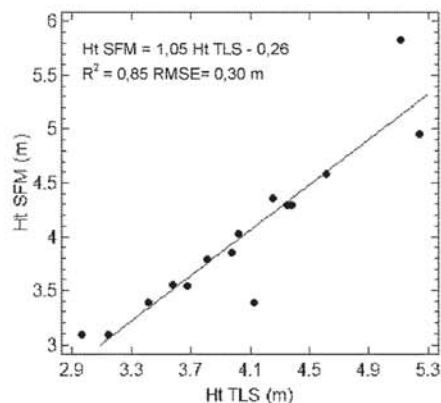


Figura 4. Modelo lineal entre la altura total (Ht) calculada utilizando los datos TLS y SfM.

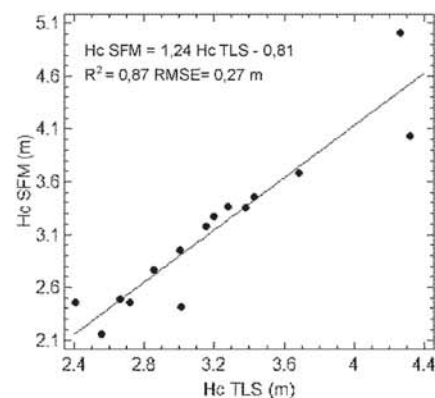


Figura 5. Modelo lineal entre la altura de copa (Hc) calculado utilizando los datos TLS y SfM.

4. CONCLUSIÓN

Los resultados de este estudio indican el potencial de la técnica SfM en la estimación de parámetros estructurales de árboles aislados. Se han obtenido todos los árboles con detalle espacial suficiente, teniendo en cuenta la complejidad de los almendros elegidos en este estudio, aplicando SfM para la reconstrucción 3D de los objetos. Todos los parámetros han sido obtenidos con buena

precisión en comparación a los calculados a partir del sistema TLS. En cuanto a los resultados obtenidos para el diámetro de copa, es necesario ampliar el número de árboles, así como algunas tareas relacionadas con la determinación de la copa, como son el empleo de máscaras de cielo que eviten errores, mejoras en las condiciones de iluminación de los árboles, tomas fotográficas desde distintas alturas, nuevos procesos de filtrado de puntos erróneos, etc.

Cuanto mejor pueda ser aplicada la modelización fotogramétrica mediante esta rápida, sencilla y barata estrategia de trabajo, mayor será el rendimiento en campo y gabinete frente a la técnica TLS, la cual requiere equipos, tiempos, y por extensión, costes, mucho mayores.

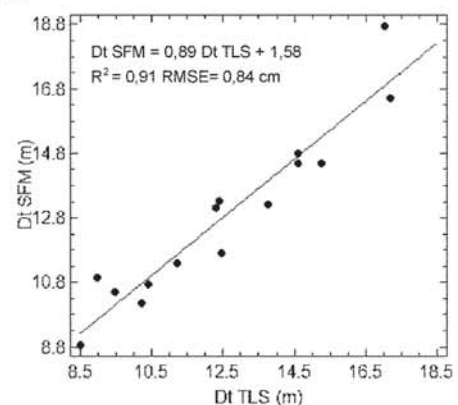


Figura 6. Modelo lineal entre el diámetro de tronco (Dt) calculado utilizando los datos TLS y SfM.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Cunliffe, A.M., Brazier, R.E., Anderson, K. 2016. Ultra-fine grain landscape-scale quantification of dryland vegetation structure with drone-acquired structure from motion photogrammetry. *Remote Sensing of Environment*, 183, 129-143.
- Goesle, M., Snavely, N., Seitz, S. M., Curless, B., Hoppe, H. 2007. Multi-view stereo for community photo collections. *Computer Vision. ICCV 2007. IEEE 11th International Conference*, 2, 265-270.
- Fernández-Sarria, A., Velázquez-Martí, B., Sajdak, M., Martínez, L., Estornell, J. 2013. Residual biomass calculation from individual tree architecture using terrestrial laser scanner and ground-level measurements. *Computers and Electronics in Agriculture*, 93, 90-97
- Snavely, N., Seitz, S.M., Szeliski, R. 2008. Modeling the world from Internet photo collections. *International Journal of Computer Vision*, 80(2), 189-210
- Wallace, L., Lucieer, A., Malenovsky, Z., Turner, D., Vopenka, P. 2016. Assessment of Forest Structure Using Two UAV Techniques: A Comparison of Airborne Laser Scanning and Structure from Motion (SfM) Point Clouds. *Forests*, 7: 62.
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M. 2012. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179: 300-314.