



X Congreso Ibérico de Agroingeniería X Congresso Ibérico de Agroengenharia

Huesca, 3-6 septiembre 2019



Diseño y primeros resultados de una plataforma móvil eléctrica de registro de datos para agricultura de precisión

J. Martínez-Guanter^{1,2}, F. Tucci¹, O. E. Apolo-Apolo¹, J. Agüera³, G. Egea¹, D. Andújar⁴, M. Pérez-Ruiz¹

¹ Dpto. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos. Universidad de Sevilla; manuelperez@us.es

² Agropanning Agricultura Inteligente S.L. Programa Torres-Quevedo 2017 (PTQ-17-09506)

³ Dpto. de Ingeniería Rural. Universidad de Córdoba.

⁴ Centro de Automática y Robótica, CSIC-UPM, 28500 Arganda del Rey, Madrid

Resumen: La monitorización cercana requiere de equipamiento montado a bordo de vehículos agrícolas, implementos o cualquier plataforma que permitan obtener rasgos agrónomicamente relevantes. Las plataformas móviles para el fenotipado de características biofísicas de los cultivos permiten obtener una alta repetibilidad de las mediciones, al tiempo de no ser invasivas sobre las labores normales de cultivo. De la misma forma que el diseño de estas plataformas está condicionado por la variedad de sensores que deben alojar, deberá ser adecuado al tipo de cultivo del que se pretende obtener información precisa, y que su uso no requiera de una intensiva participación humana. Los objetivos se centraron en (i) desarrollar una plataforma móvil eléctrica, sencilla y modular, diseñada para alojar una gran variedad de sensores que permitan la caracterización fenotípica de cultivos, y (ii) probar su rendimiento en campo, la reproducibilidad de los resultados y su capacidad para obtener mediciones sobre el volumen de copa de los naranjos de una parcela comercial. Para este segundo objetivo, y tras unas primeras comprobaciones en laboratorio sobre aspectos como la velocidad, la carga óptima, y la estabilidad, se llevaron a cabo pruebas de campo empleando un sensor LiDAR escaneando de forma lateral y una cámara de profundidad Kinect de Microsoft. En este trabajo se presentan los primeros resultados obtenidos del desarrollo técnico de la plataforma para la caracterización electrónica del volumen de copa de cítricos, con los que se pretende en el futuro generar información de alto valor para el agricultor que le permitan ajustar aspectos como las aplicaciones de agroquímicos o labores como la poda.

Palabras clave: LiDAR, monitorización, fenotipado

1. Introducción

El cultivo de cítricos en el sur de Europa tiene habitualmente lugar en parcelas de un número relativamente grande de hectáreas, consideradas unidades de producción uniformes. En ellas, tradicionalmente las tareas de manejo o las estimaciones de rendimiento no han tenido en cuenta la variabilidad espacial de los mismos. La agricultura de precisión permite un tratamiento diferenciado, monitoreando cada árbol individualmente como una entidad productiva única. Una caracterización precisa de cada uno de los árboles permite realizar tareas de aplicación variable de fertilizante o pesticidas, poda selectiva o predicciones del rendimiento de frutos más ajustadas [1]. Caracterizar la estructura fenotípica del cultivo, y en particular el volumen de la

copa de cada árbol en las diferentes etapas de crecimiento del cultivo resulta de gran interés, ya que proporciona información importante acerca de sus necesidades y potencial producción [2].

La productividad en el cultivo de cítricos tiende a disminuir cuando el tamaño del árbol aumenta y la competición por recursos como el espacio, la luz, el agua o nutrientes se acrecienta [3] [4]. Trabajos como [3] o [5] ponen de manifiesto la estrecha relación entre el volumen medido de los árboles y su rendimiento en fruto, así como la necesidad de un adecuado control de su tamaño y forma. De igual forma, las tareas de aplicación variable de pulverización y fertilización pueden ajustarse a la variabilidad espacial del volumen de la copa. Se ha desarrollado maquinaria capaz de adaptar su geometría y sus elementos aplicadores al tamaño del cultivo [6][7]. Incluso nuevas tecnologías como los UAVs [8] se han desarrollado para aplicar en forma de bajos volúmenes en sistemas productivos, lo que permite un ahorro considerable de inputs y un aumento de los retornos económicos para los productores.

La caracterización del tamaño de los árboles y el volumen de la copa se ha realizado convencionalmente mediante medidas manuales. Estos métodos simples son laboriosos, consumen demasiado tiempo y requieren de muchas muestras para ser representativos [9].

De forma alternativa a la caracterización manual, se han desarrollado numerosos trabajos con diferentes sensores para una mejor cuantificación del volumen de copa. Entre estos sensores, los más utilizados para estas medidas han sido los de ultrasonidos y los escáneres LiDAR.

Los sensores de ultrasonidos funcionan de forma activa mediante el envío de una onda ultrasónica y su posterior recepción, obteniendo mediante la diferencia de tiempo la distancia al objetivo. Las mediciones del volumen del árbol con ultrasonidos se llevan a cabo mediante el uso simultáneo de varios sensores con una disposición vertical [10]. Su uso ha sido ampliamente estudiado en [11][12][3], y se ha incluido en maquinaria comercial desde los inicios de la década de los 2000. Sin embargo, las mediciones de estos sensores se ven afectados por la textura de la superficie, el ángulo y la distancia al sensor.

Los escáneres LiDAR terrestres, mucho más precisos en sus mediciones, funcionan también de forma activa mediante el envío y recepción de un haz de luz, y el cálculo de las distancias mediante su rebote. Los sensores LiDAR se han empleado con éxito notable en la caracterización de las estructuras del cultivo arbóreos [13][14][15] y vegetales [16][17], debido a su versatilidad para ser montados sobre plataformas terrestres y generar nubes de puntos 3D precisas. Además, se han empleado de forma combinada en diferentes orientaciones sobre plataformas robotizadas para generar modelos 3D con mayor densidad y más ajustados a la realidad [18]. En [19] se empleó un sistema basado en LiDAR y se obtuvo un error relativo del 4.4% en la estimación del volumen unitario de árboles. Se ha empleado por [13] para obtener una correlación $R^2=0.97$ sobre las medidas manuales y para calcular índices del cultivo como el LAI [20] Además, se ha empleado tanto en plataformas terrestres como aéreas o drones para realizar tareas de fenotipado de alto rendimiento de cultivos arbóreos y extensivos.

Además de estos dos sensores, números trabajos han explorado el uso de cámaras de profundidad o RGB-D para la generación de modelos de árboles y su caracterización. El uso de estos sensores comerciales ha sido validado en comparación con un LiDAR terrestre para modelar plantas de remolacha azucarera [21]. Se concluyó que los sensores RGB-D podrían reemplazar sistemas láser en algunos de los escenarios de fenotipado. En [22] y [23] se reconstruyeron estructuras arbóreas en viñedo y chopos estimando el Índice de Área Foliar (LAI) y su volumen demostrando el potencial de estos sensores para la reconstrucción tridimensional.

Como ya se ha comentado, el desarrollo de todas estas metodologías de medición del volumen de copa ha ido ligado a diferentes plataformas terrestres o aéreas de fenotipado [24]. Estas plataformas, en muchos casos robóticas, permiten estudiar mayores áreas con repetibilidad, pueden montar un gran número de sensores simultáneamente y aportan una mayor flexibilidad que las mediciones manuales o con estaciones fijas. Además, como en el caso de este trabajo las plataformas terrestres permiten el desplazamiento horizontal de los sensores y la generación de

la tercera dimensión necesaria para la caracterización de los elementos en campo. Por todo lo anterior, el objetivo general de este trabajo es el de desarrollar de forma efectiva una plataforma terrestre móvil de fenotipado, y el empleo de ésta en la caracterización y cuantificación del volumen de copa de un cultivo de naranjos. El objetivo específico dentro de esta caracterización será el de comparar las mediciones del volumen de copa con diferentes métodos de medición empleando dos sensores LiDAR y una cámara RGB-D.

2. Materiales y métodos

2.1. Desarrollo de la Plataforma Terrestre de Fenotipado

Para ser capaces de generar una toma de datos desde un elemento móvil en campo que asegure la fiabilidad de la información obtenida y la repetibilidad de las medidas, se desarrolló una plataforma terrestre capaz de albergar el conjunto de sensores necesarios y su disposición de forma modular.

Se diseñó una plataforma (Figura 1a) fabricada y adaptada para este trabajo, de construcción metálica, con 2 motores eléctricos, con ruedas delanteras directrices y traseras motrices. El diseño modular, ajustable en altura, permite disponer de espacio suficiente para embarcar en ella los diferentes componentes del sistema de alimentación de sensores, sistemas electrónicos de medida y ordenadores. Una barra horizontal regulable en altura se empleó como soporte a los diferentes sensores empleados en este trabajo (Figura 1b). La plataforma se diseñó con un ancho de vía estrecho buscando su versatilidad a la hora de generar datos en no sólo en cultivos con marcos de plantación amplios como el del naranjo, sino también en aquellos cultivos cuyas calles presentan menores distancias (ej. en ensayos de mejora del maíz). Las características técnicas de dicha plataforma se recogen en la tabla 1 a continuación.

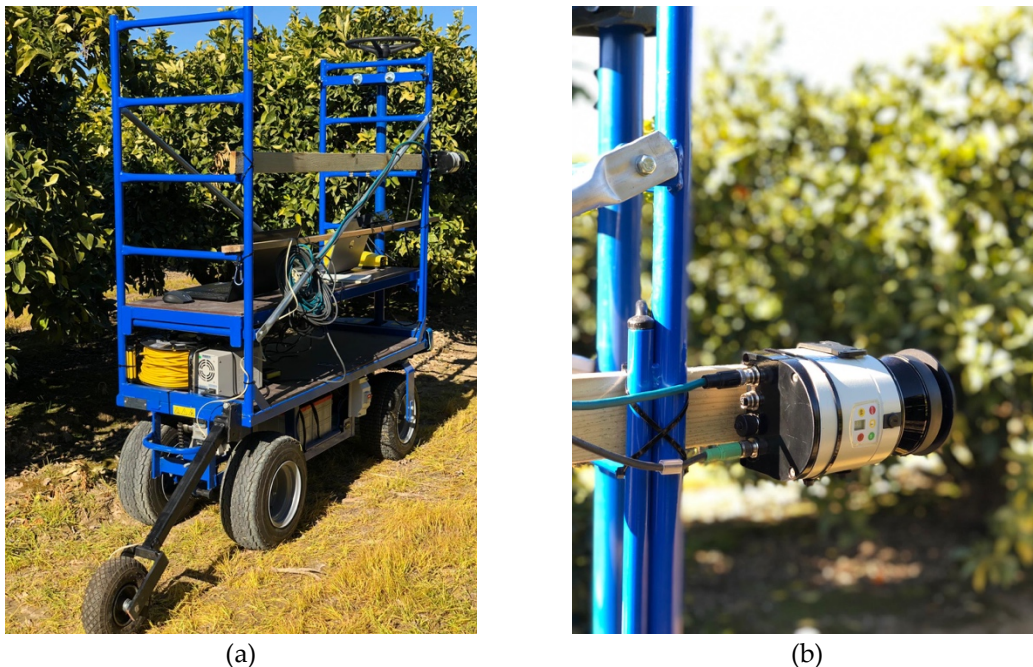


Figura 1. (a) Vista general de la plataforma desarrollada, con montaje de sensores y sistema de odometría en la parte posterior, (b) detalle de montaje del sensor LiDAR en la parte delantera para el registro de nubes de puntos 3D del cultivo.

Tabla 1. Características técnicas de la plataforma de fenotipado

Dimensiones (largo, alto, ancho)	1770, 1910, 550 mm
Ancho de vía y batalla	470 mm, 1200 mm
Velocidad máxima	0.5 m·s ⁻¹
Velocidad mínima	0.1 m·s ⁻¹
Masa total plataforma	200 kg
Diámetro ruedas	400 mm

2.2 Sensores, Instrumentación y Software a bordo de la plataforma

2.2.1. Sensor LiDAR

Un sensor LiDAR (LMS111-10100, SICK, Waldkirch, Alemania) cuyos parámetros técnicos de funcionamiento se resumen en la tabla 2, fue empleado para la caracterización 3D del cultivo. Se instaló de forma fija en la parte delantera de la plataforma con una orientación angular de 90° respecto al suelo, generando escaneos verticales transversales del cultivo. La alimentación del sensor LiDAR se realizó mediante el sistema eléctrico de la plataforma y un convertidor de voltaje.

Tabla 2. Características técnicas del sensor LiDAR LMS 111 empleado

Rango de escaneo óptimo	0.5 a 20 m
Field of View (FOV)	270°
Frecuencia de escaneo	50 Hz
Resolución angular	0.5°
Banda espectral láser	Infrarrojo (905 nm)
Grado de protección	IP67

Como sistema de referencia local se empleó una solución basada en odometría, capaz de aportar la coordenada Z en base al movimiento longitudinal a través de las filas de naranjos. A una rueda independiente con giro libre montada en la parte trasera de la plataforma se le añadió un encoder óptico incremental de alta resolución (modelo 63R256, Greyhill Inc., Chicago, IL, USA) de forma solidaria al eje. La medida del avance basada en odometría se obtuvo mediante el análisis de los pulsos recibidos por medio de un microcontrolador de bajo coste Arduino UNO (Arduino Project, Ivrea, Italy). Para la configuración del sistema y la captura y registro de los escaneos del sensor, se empleó el entorno de software LabVIEW (National Instruments CO., Texas, USA) con una interfaz de Ethernet para su conexión con el ordenador a bordo de la plataforma.

2.2.2. Sensor RGB-D Kinect

El sensor de profundidad o cámara RGB-D empleado fue un sensor comercial Microsoft Kinect V2 (Microsoft, Redmond, USA). Este equipo, lanzado inicialmente para videojuegos, ha demostrado ser de gran utilidad en tareas de investigación ya que incluye en un mismo equipo un sensor infrarrojo, una cámara de profundidad ToF, y un sensor RGB. Las imágenes RGB capturadas por este sensor tienen una resolución de 1920x1080, con un FOV de 84.1°x53.8°. El sensor infrarrojo tiene un FOV de 70°x60°, con una distancia máxima de escaneo de 5.5 m. Aunque el uso de este sensor se ve condicionado por las condiciones de luz, se decidió su uso porque éstas eran adecuadas en un entorno de escaneo con árboles de gran tamaño que mitigaban la luminosidad. El sensor Kinect no depende de un sistema de odometría para la posterior reconstrucción de las nubes de puntos. Al igual que el LiDAR, se dispuso en la parte delantera de la plataforma para realizar los escaneos 3D de los árboles situados a la derecha del avance.

2.3. Localización de los ensayos de campo

El desarrollo de este trabajo se realizó en una explotación comercial de naranjos situada en Alcalá del Río en la provincia de Sevilla (37°30'42.8"N 5°58'12.3"W). La finca tiene una superficie de 4 ha, con una plantación de cítricos de la variedad Navelina, plantados en 1992. Las líneas de los naranjos, dispuestas de Norte a Sur, presentan un marco de plantación de 5,5m x 4 m.

La zona de estudio dentro de la parcela se acotó en 4 filas de árboles, con 5 árboles cada una. En cada una de estas filas se realizaron dos repeticiones con pases de la plataforma desarrollada a izquierda y derecha, obteniéndose en cada caso el escaneo de ambas caras de cada árbol.

2.4. Metodología de análisis de los datos de campo

Una vez registrados los escaneos laterales empleando el LiDAR, y las imágenes RGB y datos de profundidad 3D empleando el sensor RGB-D, se llevó a cabo el análisis offline de dicha información. Para ello, se siguió el flujo de trabajo que se muestra en la figura 2 a continuación.

Para la generación de las nubes de puntos 3D capturadas mediante el sensor LiDAR se empleó una rutina desarrollada en Matlab (MathWorks, MA, USA). El análisis de la información 3D captada por el sensor RGB-D se realizó empleando de forma combinada el software propietario de Kinect Studio (Microsoft, Redmond, USA) y el software de trabajo con nubes de puntos CloudCompare (GNU License, Paris, France). En él se empleó el algoritmo de caracterización de puntos externos denominado α -shape para calcular el volumen de la copa del árbol. En las primeras iteraciones de este trabajo, se ha definido un valor de $\alpha=1$ para el cálculo del volumen. El resultado del cálculo del volumen a partir de estos datos de LiDAR se comparó de forma estadística con el arrojado por la misma metodología de reconstrucción 3D a partir de los datos del sensor RGB-D.

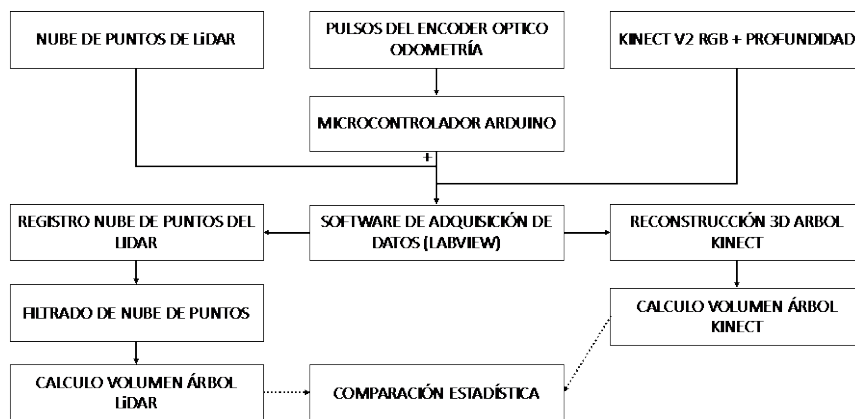


Figura 2. Diagrama de tratamiento y análisis de los datos 3D recogidos por los sensores LiDAR y RGB-D

3. Resultados y discusión

3.1. Desarrollo y primeras pruebas de la plataforma

El desarrollo satisfactorio de la plataforma terrestre para fenotipado, permitió la obtención de los primeros resultados acerca de la caracterización de los árboles de cítricos en la parcela de estudio. En estas primeras pruebas de campo, además de generar dichos datos, se validó el uso de esta plataforma como herramienta modular, flexible y robusta, que permite una repetibilidad de las mediciones que resulta clave a la hora de validarlas en diferentes campañas a lo largo de los próximos años. Se validó su uso, maniobrabilidad y diferentes velocidades de avance para poder ser empleada en sucesivos años, en diferentes cultivos y con diferentes sensores. Una de

las barreras encontradas en este primer año con respecto al desarrollo de la plataforma, es la necesidad de realizar constantes ajustes en la trayectoria mediante el volante que incorpora, incluso a bajas velocidades. Este punto se explorará en próximos trabajos, de forma que se siga una trayectoria rectilínea gracias a la incorporación de un sistema de auto-guiado por GPS RTK.

3.2. Caracterización del volumen de naranjos

Mediante los sucesivos escaneos con la plataforma desarrollada, se obtuvieron las nubes de puntos 3D correspondientes a cada una de las filas estudiadas de naranjos. Las densidades de puntos obtenidas con el sensor LiDAR fueron de una media de 5.79 puntos por vóxel de 1 cm³, lo que indica una alta resolución de la nube de puntos y una alta calidad de los resultados obtenidos. La generación de estas nubes de puntos con el sensor LiDAR correspondieron en todos los casos al trayecto completo entre filas de cultivo, generándose una nube de puntos 3D de la fila completa de naranjos, como muestra la figura 3 a continuación.

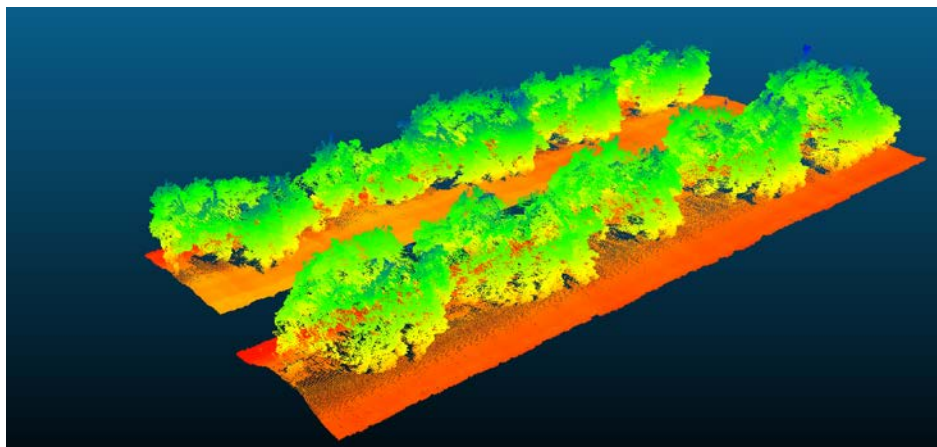


Figura 3. Nubes de puntos 3D obtenidas con el sensor LiDAR a partir de los escaneos de dos filas de naranjos.

El cálculo del volumen individual de cada uno de los árboles de la parcela se realizó aislando en primer lugar cada uno de ellos de forma manual con respecto a la nube de puntos general, (figura 4) y calculando individualmente su volumen mediante la función α -shape descrita anteriormente.

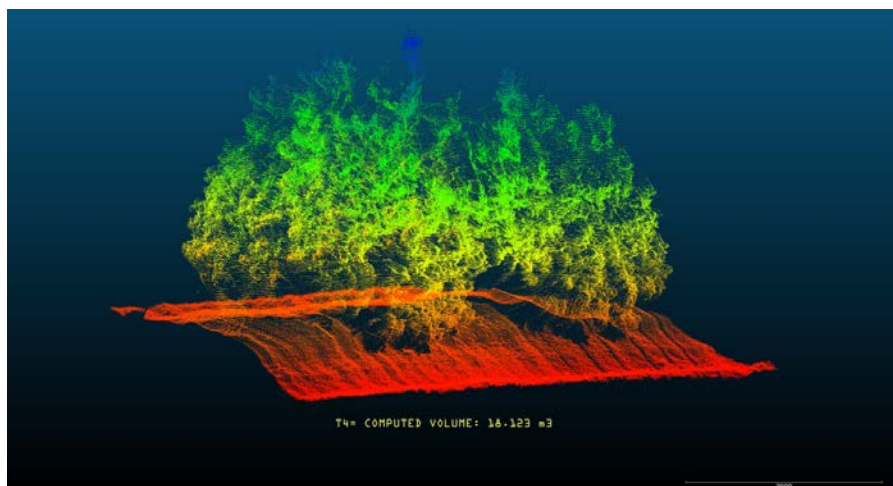


Figura 4. Nube de puntos 3D de un árbol objeto de estudio

Por su parte, los resultados de la generación de nubes de puntos a partir de los registros obtenidos mediante el sensor Kinect se muestran en la figura 5 a continuación.

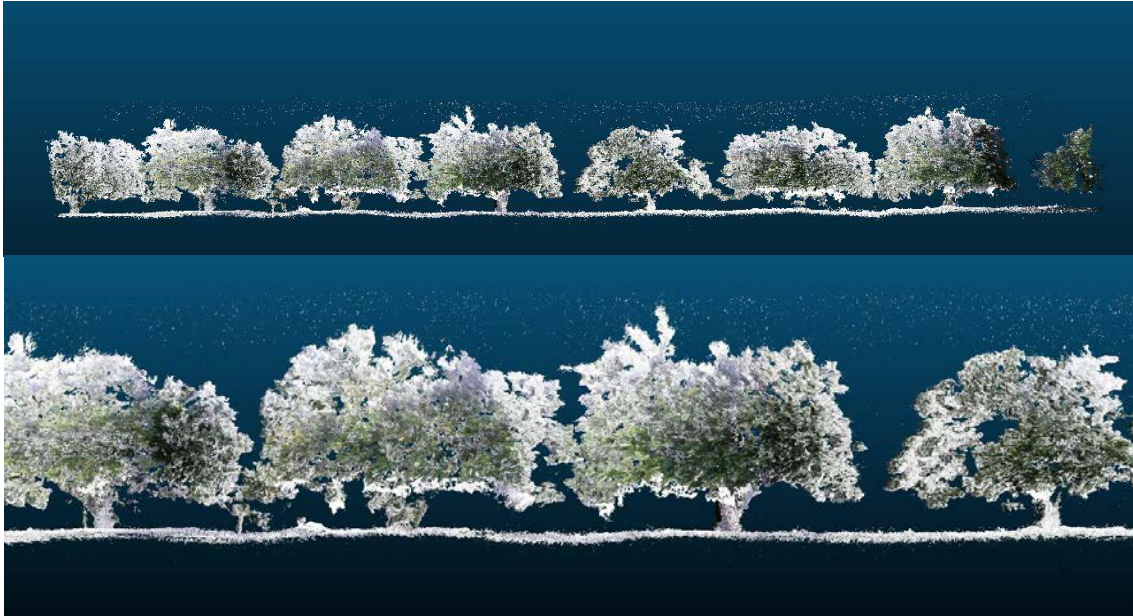


Figura 5. Nube de puntos 3D a partir de sensor RGB-D Kinect de toda la fila (arriba) y detalle de algunos de los árboles objeto de estudio (debajo).

En la comparación de los volúmenes obtenidos mediante la metodología expuesta en el apartado 2.4 se obtuvo, para cada árbol individual un volumen a partir de las nubes de puntos del sensor LiDAR y RGB-D. Los resultados de dicha comparación por cada uno de los árboles estudiados se muestran en la figura 6 a continuación. La diferencia media de volumen calculado con ambos sensores fue de 2.72 m³. Esta diferencia puede ser reducida en sucesivos filtrados de puntos de las nubes 3D correspondientes a ruido o rebotes de otros elementos como el polvo o partículas en suspensión, de forma que se pueda minimizar la diferencia y por tanto el error cometido en la estimación automática de volumen con dos sensores diferentes.

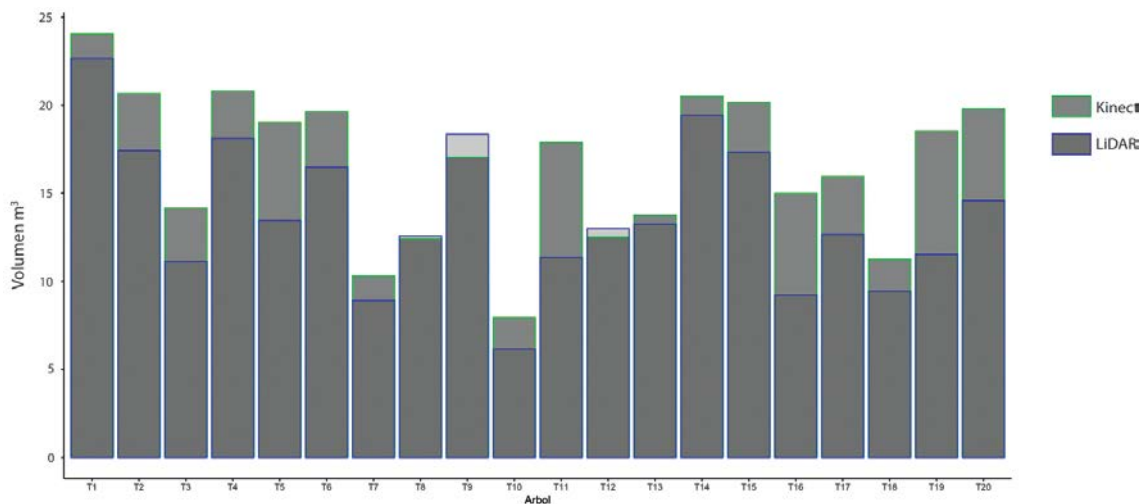


Figura 6. Comparación de los volúmenes de los 20 árboles estudiados en este trabajo mediante el sensor LiDAR y el RGB-D.

4. Conclusiones

En el presente trabajo se han expuesto el desarrollo de una plataforma terrestre de fenotipado y los primeros resultados en su aplicación como herramienta para la determinación del volumen de los árboles de naranjo de una explotación comercial. Sin duda, el desarrollo de plataformas de fenotipado está teniendo un crecimiento notable en los últimos años debido a la miniaturización de los sensores, su versatilidad y la repetibilidad que ofrecen para realizar un seguimiento exhaustivo de los cultivos. Los sensores empleados para determinar el volumen de copa de los árboles en este estudio (LiDAR y Kinect) han demostrado ser efectivos a la hora de realizar dichas mediciones. Pese a que tienen un coste económico diferente (el LiDAR resulta mucho más caro que el sensor RGB-D), los resultados obtenidos no indican gran diferencia en sus mediciones. Esto puede conllevar una más rápida adopción de soluciones de este tipo que permitan al sector caracterizar su cultivo de forma robusta, rápida y sencilla, lo que sin duda tendrá un impacto relevante en la adaptación de las tareas agrícolas de aplicación variable, poda selectiva o predicción de rendimientos en cosecha. El grupo de investigación continuará, en los próximos desarrollos, trabajando en mejorar los resultados y en la obtención de nuevos parámetros fenotípicos desde este tipo de plataformas.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al proyecto *Pressing* (Referencia: AGL2016-78964-R) financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Los autores agradecen el contrato Torres Quevedo (PTQ-17-09506) concedido a JMG y al contrato predoctoral para el desarrollo del programa de I+D+i de la Universidad de Sevilla (IV.3 2017) concedido a OEAA.

Referencias

1. Maja, J. M., & Ehsani, R. Development of a yield monitoring system for citrus mechanical harvesting machines. *Precision agriculture*, (2010) 11 (5), 475-487.
2. Ehsani, R., Hwan, L. E. E. A Measurement System for Quantifying Citrus Foliage Volume and Porosity. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, (2008) 4(4), 333-338.
3. Zamman, Q.U., Schumann, A. W. Performance of an ultrasonic tree volume measurement system in commercial citrus groves. *Precision Agriculture*, (2005) 6 (5), 467-480.
4. Tucker, D. P. H., Wheaton, T. A. and Muraro, R. P. Citrus Tree Spacing and Pruning. Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agriculture Science. (1991) p. 1-15.
5. Wheaton, T. A., Whitney, J. D., Castle, W. S., Muraro, R. P., Browning, H. W. and Tucker, D. P. H.. Citrus Scion and rootstock, topping height, and tree spacing affect tree size, yield, fruit quality, and economic return. *Journal American Society of Horticultural Science* (1995) 120(5), 861-870.
6. Chen, Y., Zhu, H., & Ozkan, H. E.. Development of a variable-rate sprayer with laser scanning sensor to synchronize spray outputs to tree structures. *Transactions of the ASABE*, (2012) 55(3), 773-781.
7. Vieri, M., Lisci, R., Rimediotti, M., & Sarri, D. (2013). The RHEA-project robot for tree crops pesticide application. *Journal of Agricultural Engineering*.
8. Martínez-Guanter, J., Agüera, P., Agüera, J., Pérez-Ruiz, M.; Spray and economics assessment of a UAV-based ultra-low-volume application in olive and citrus orchards, *Precision Agriculture*, 2019, pp 1-18.
9. Colaço, A. F., Trevisan, R. G., Molin, J. P., Rosell-Polo, J. R., Escolà, A. Orange tree canopy volume estimation by manual and LiDAR-based methods. *Advances in Animal Biosciences*, (2017) 8(02), 477-480.
10. Tumbo, S. D., Salyani, M., Whitney, J. D., Wheaton, T. A. and Miller, W. M. Investigation of laser and ultrasonic ranging sensors for measurement of citrus canopy volume. *Applied Engineering in Agriculture* (2002) 18(3), 367-372.
11. Li, B., Whitney, J. D., Miller, W. M. and Wheaton, T. A.; Ultrasonic-based Canopy Volume Measurements of Citrus Trees for Precision Agriculture. *ASAE* (2002) Paper No. 02-021053.

X CONGRESO IBÉRICO DE AGROINGENIERÍA
X CONGRESSO IBÉRICO DE AGROENGENHARIA

3 – 6 septiembre 2019, Huesca - España

12. Gil, E., Escolà, A., Rosell, J. R., Planas, S., & Val, L.; Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors. *Crop Protection*, (2007) 26(8), 1287–1297.
13. Rosell, J. R., Llorens, J., Sanz, R., Arnó, J., Ribes-Dasi, M., Masip, J., ... Palacín, J. Obtaining the three-dimensional structure of tree orchards from remote 2D terrestrial LIDAR scanning. *Agricultural and Forest Meteorology*, (2009). 149(9), 1505–1515
14. Pérez-Ruiz, M., Rallo, P., Jiménez, M., Garrido-Izard, M., Suárez, M., Casanova, L., ... & Morales-Sillero, A. Evaluation of over-the-row harvester damage in a super-high-density olive orchard using on-board sensing techniques. *Sensors*, (2018) 18(4), 1242.
15. Miranda-Fuentes, A., Llorens, J., Gamarra-Diezma, J. L., Gil-Ribes, J. A., & Gil, E. Towards an optimized method of olive tree crown volume measurement. *Sensors (Switzerland)*, (2015) 15(2), 3672–3687.
16. Martínez-Guanter, J., Garrido-Izard, M., Valero, C., Slaughter, D., & Pérez-Ruiz, M. Optical sensing to determine tomato plant spacing for precise agrochemical application: Two scenarios. *Sensors*, (2017) 17(5), 1096.
17. Shi, Y., Wang, N., Taylor, R. K., Raun, W. R. Improvement of a ground-LiDAR-based corn plant population and spacing measurement system. *Computers and Electronics in Agriculture*, (2014) 112, 92–101.
18. Garrido, M., Paraforos, D., Reiser, D., Vázquez Arellano, M., Griepentrog, H., & Valero, C. 3D Maize Plant Reconstruction Based on Georeferenced Overlapping LiDAR Point Clouds. *Remote Sensing*, (2015). 7(12), 17077–17096.
19. Wei, J., & Salyani, M. Development of a laser scanner for measuring tree canopy characteristics: Phase 1. Prototype development. *Transactions of the ASAE*, (2004) 47(6), 2101.
20. Rosell Polo, J. R., Sanz Cortiella, R., Llorens Calveras, J., Arnó Satorra, J., Ribes Dasi, M., Masip Vilalta, J., ... & Val, L. A tractor-mounted scanning LIDAR for the non-destructive measurement of vegetative volume and surface area of tree-row plantations: A comparison with conventional destructive measurements. *Biosystems Engineering*, 2009, vol. 102, núm. 2, p. 128-134.
21. Paulus, S., Behmann, J., Mahlein, A. K., Plümer, L., & Kuhlmann, H. Low-cost 3D systems: suitable tools for plant phenotyping. *Sensors*, (2014) 14(2), 3001-3018.
22. Bengochea-Guevara, J. M., Andújar, D., Sanchez-Sardana, F. L., Cantuña, K., & Ribeiro, A., A low-cost approach to automatically obtain accurate 3D models of woody crops. *Sensors (Switzerland)*, (2018) 18(1), 1–17.
23. Andújar, D., Dorado, J., Fernández-Quintanilla, C., & Ribeiro, A. An Approach to the Use of Depth Cameras for Weed Volume Estimation. *Sensors*, (2016) 16(7), 972.
24. Deery, D., Jimenez-Berni, J., Jones, H., Sirault, X., & Furbank, R. Proximal remote sensing buggies and potential applications for field-based phenotyping. *Agronomy*, (2014) 4(3), 349-379.