

## Estimation of aerial biomass of winter forages in irrigation through a drone

### Estimación de biomasa aérea de forrajes de invierno bajo riego a través de un dron

Botello-Aguillón, César; Gavi-Reyes, Francisco\*; Tijerina-Chávez, Leonardo;  
Galvis-Spíndola, Arturo; Roblero-Hidalgo, Rodrigo

Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Posgrado en Hidrociencias. Km. 36.5 Carretera  
México-Texcoco. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, C.P. 56230

\*Autor para correspondencia: gavi@colpos.mx

#### ABSTRACT

**Objective:** To develop a procedure to estimate biomass with digital images captured from drone and 3D modeling (ID-Dron-3D) applicable in forage alfalfa (*Medicago sativa* L.) and oats (*Avena sativa* L.).

**Design/methodology/approach:** With a digital camera coupled to the drone, images were obtained before harvesting the crops, which were processed with software to then estimate biomass volume. In each crop, height of the plant and harvested area, apparent and real volume of biomass, and weight of fresh and dry biomass were measured.

**Results:** Based on the regression analysis, linear models were obtained at one  $p < 0.05$  to predict: fresh biomass in oats ( $R^2=0.70$ ) and alfalfa ( $R^2=0.47$ ); and dry biomass in oats ( $R^2=0.78$ ) and in alfalfa ( $R^2=0.31$ ) by ID-Dron-3D.

**Limitations on study/implications:** Considering the  $R^2$  of the models obtained, the results in the forage oats were better, compared to those detected in alfalfa, which may be due to the greater variability of the plant cover, since, in some sampling units, the plants of alfalfa did not completely cover the soil.

**Findings/conclusions:** The yield of fresh and dry biomass of both crops was significantly correlated with their respective apparent volume, which was estimated with digital images taken from a drone and its 3D processing (ID-Dron-3D).

**Keywords:** 3D modeling; linear regression; precision agriculture; remote sensing; sensors.

#### RESUMEN

**Objetivo:** Desarrollar un procedimiento para estimar biomasa con imágenes digitales captadas desde un dron y modelación 3D (ID-Dron-3D) aplicable en alfalfa (*Medicago sativa* L.) y avena forrajera (*Avena sativa* L.).

**Diseño/metodología/aproximación:** Con una cámara digital acoplada al dron se obtuvieron imágenes antes de la cosecha de los cultivos, que fueron procesadas con software para luego estimar volumen de biomasa. En cada cultivo se midió altura de la planta y área cosechada, volumen aparente y real de biomasa, y peso de biomasa fresca y seca.

**Resultados:** Con base en el análisis de regresión se obtuvieron modelos lineales a una  $p < 0.05$  para predecir: biomasa fresca en avena ( $R^2=0.70$ ) y alfalfa ( $R^2=0.47$ ); y biomasa seca en avena ( $R^2=0.78$ ) y en alfalfa ( $R^2=0.31$ ) mediante ID-Dron-3D.

**Limitaciones del estudio/implicaciones:** Considerando las  $R^2$  de los modelos obtenidos, los resultados en la avena forrajera fueron mejores, respecto a los detectados en alfalfa, lo cual se puede deber a la mayor variabilidad de la cobertura vegetal, ya que, en algunas unidades de muestreo, las plantas de alfalfa no cubrían completamente el suelo.

**Agroproductividad:** Vol. 12, Núm. 4, abril. 2019. pp: 25-31.

**Recibido:** julio, 2018. **Aceptado:** marzo, 2019.



**Hallazgos/conclusiones:** El rendimiento de biomasa fresca y seca de ambos cultivos se correlacionó significativamente con su respectivo volumen aparente, el cual fue estimado con imágenes digitales tomadas desde un dron y su procesamiento 3D (ID-Dron-3D).

**Palabras clave:** agricultura de precisión; modelado 3D; regresión lineal; sensores; teledetección.

## INTRODUCCIÓN

**Algunos** autores indican que la biomasa es la cantidad total de materia viviente, que se encuentra en un área determinada y se expresa en toneladas por unidad de superficie (Martínez-Romero y Leyva-Galán, 2014).

El método del cuadrante es el más certero para estimar la biomasa (Holchek *et al.*, 2004). Sin embargo, su utilidad práctica está limitada al área de la investigación como herramienta de calibración de otros métodos (Mannetje, 2000).

En la actualidad, la fotografía digital se ha convertido en un método común y económico para documentación y presentación de imágenes por parte de la comunidad científica (Karcher y Richardson, 2003). El análisis computacional de imágenes digitales para la estimación de la cobertura vegetal es relativamente reciente en la literatura agronómica, pero con gran potencial por ser una técnica confiable.

Los rasgos geométricos de un cultivo, tales como altura de la planta y su cobertura entre otros, pueden estimarse con base en un modelo digital de superficie (MDS) o un modelo digital de elevación (MDE) y el análisis de clasificación de imágenes tomadas desde drones (Li *et al.*, 2015). Asimismo, conociendo la altura se puede estimar la producción de biomasa aplicando modelos de regresión.

Nuevas metodologías de caracterización digital, que utilizan modelos digitales 3D, tal como la que emplea laser-escáner, cámaras de profundidad o sistemas basados en luz estructurada, han creado modelos muy cercanos a la realidad que permiten el estudio detallado de las características morfológicas de cada planta (Andújar *et al.*, 2017).

Los modelos 3D de cultivo pueden obtenerse a partir de imágenes superpuestas capturadas desde un dron, también conocido como vehículo aéreo no tripulado (VANT) o de sensores proximales unidos a vehículos terrestres (Schirrmann *et al.*, 2017).

Existe escasa información sobre la determinación de biomasa de forrajes mediante el uso de cámaras digitales montadas en VANT, lo cual puede ser una opción cuando no se cuenta con imágenes multi espectrales o tecnología LiDAR, ya que actualmente tanto los VANT como las cámaras digitales, se usan más debido a que son equipos más baratos que en el pasado. Lo anterior es la motivación del presente estudio, junto con el interés en contribuir con una

metodología alternativa en dicha tarea. El objetivo fue desarrollar un procedimiento para estimar el rendimiento de biomasa de los cultivos forrajeros *Medicago sativa* L. (alfalfa) y *Avena sativa* L. (avena forrajera) bajo riego, mediante imágenes digitales tomadas desde un VANT y su modelación 3D.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La fase de campo se llevó a cabo en las parcelas experimentales del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, ubicado en Carretera México-Texcoco km. 36.5 Montecillo, Texcoco. Los muestreos de *A. sativa* (marzo de 2018) y *M. sativa* (mayo de 2018) se realizaron en n=17 unidades de muestreo 1.05×1.05 m, previamente delimitadas para cada cultivo, tratando de captar la variabilidad del rendimiento a lo largo del dosel.

Se utilizó el dron DJI Phantom 4, equipado con una cámara de 12 Megapíxeles con un tamaño de píxel en el sensor de 0.00156192 mm de ancho por 0.00156192 mm de alto y una distancia focal de 3.61 mm, capaz de producir fotografías de 4000 píxeles de ancho por 3000 píxeles de alto (DJI Technology, 2018). El software empleado fue Agisoft PhotoScan para procesar las imágenes digitales (Agisoft, 2018) y AutoCAD Civil 3D para estimar el volumen de biomasa a partir de los modelos de superficie obtenidos de las imágenes digitales (Autodesk, 2017) (Figura 1).

Para la obtención de imágenes, se programó para cada parcela de forraje el vuelo con el software del VANT. Se inició con la activación de la aplicación, cuya interfaz muestra la vista satelital del terreno donde está la superficie a reconocer

(parcela cultivada con las unidades de muestreo marcadas) y la altura del vuelo (30 m), datos previamente ingresados a la aplicación, considerando el tiempo de vuelo menor a 10 min (duración útil de la batería) y una distancia de muestreo del terreno menor a 1 cm por píxel.

Se verificó la distancia calculada de muestreo del terreno o GSD (por sus siglas en inglés ground sampling distance), con ayuda de una calculadora GSD descargada de internet (Pix4D, 2018.), donde se añadieron los datos de ancho y alto del sensor de la cámara en mm, la altura de vuelo en m, el tamaño en píxeles del ancho y alto de las imágenes. De este modo se obtuvo un GSD de 0.75 cm por píxel que cumplió con las características requeridas para el presente estudio. Las imágenes tomadas por la cámara digital montada en el dron, una vez terminado el vuelo se guardaron en la memoria extraíble del dron y se procesaron estadísticamente (Figura 2).

## Variables

**Volumen aparente.** En cada una de las unidades de muestreo marcadas en las parcelas, se midió la altura de la planta más alta de cada celda con la ayuda de una malla (1.05 m×1.05 m) con celdas de 15 cm×15 cm. La suma de la altura de planta en cada unidad, por el área de ésta, dio como resultado el volumen aparente de la unidad de muestreo, que se expresó en m<sup>3</sup>.

**Biomasa.** Se cortó el forraje de cada unidad de muestreo a 5 cm del nivel del suelo para simular el paso de la cortadora de forraje, y se pesó en una báscula digital

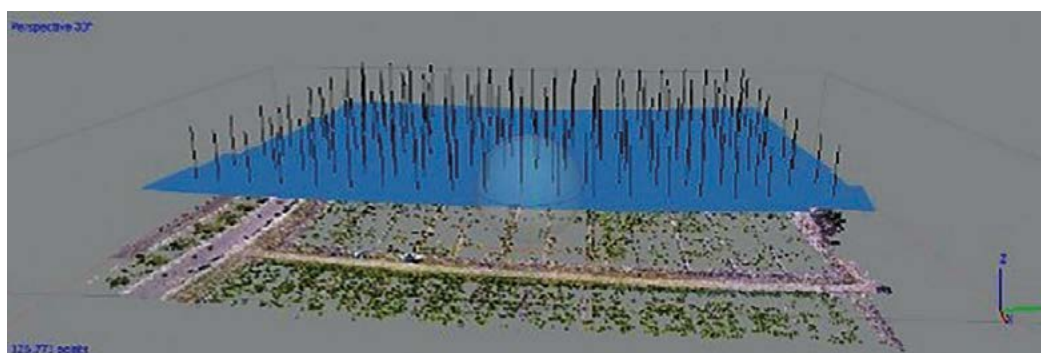


**Figura 1.** Dron DJI Phantom 4, equipado con una cámara de 12 Megapíxeles con un tamaño de píxel en el sensor de 0.00156192 mm de ancho por 0.00156192 mm de alto y una distancia focal de 3.61 mm.

(+1 g), con lo cual se obtuvo la biomasa fresca, que se expresó en kg por unidad de área. De la biomasa fresca se tomó una muestra, que fue pesada y posteriormente secada en un horno de ventilación forzada a 70 °C por 48 h. La muestra seca fue pesada y la fracción de materia seca (MS) se obtuvo al dividir el peso seco entre el peso fresco. La biomasa seca se determinó multiplicando MS por la biomasa fresca.

**Volumen real.** El forraje de cada unidad de muestreo cortado y pesado, se colocó dentro de un recipiente de plástico de 20 L, el cual, previamente se llenó de agua y midió el volumen de agua desplazado (mL). Bajo el principio de Arquímedes que dice que la fuerza flotante sobre un objeto inmerso en un fluido es igual al peso del fluido desplazado por el objeto (Giancoli, 2006), se obtuvo el volumen del forraje sumergido en mL.

**Volumen aparente ID-Dron-3D.** Se utilizaron las imágenes obtenidas por el dron, se creó un fichero en computadora para cada cultivo, se guardaron las imágenes correspondientes y se utilizó Agisoft PhotoScan Pro para construir un ortomosaico y una nube de puntos de la cobertura del forraje. Para esto, en el software se creó un nuevo proyecto por cultivo para hacer la alineación de la cámara que consistió en que PhotoScan encontrara puntos comunes en fotografías y las comparara, así como también encontrara la posición de la cámara en cada imagen, y con ello, generar la nube de puntos dispersos y el conjunto de posiciones de cámara. Posteriormente se creó un ortomosaico de la



**Figura 2.** Proceso fotogramétrico para la generación del mosaico digital.

superficie volada con el dron en el cual estuvieron identificadas las unidades de muestreo. La nube de puntos densa y el ortomosaico se archivaron con extensiones “.las” y “.TIFF”, respectivamente, georreferenciados en coordenadas UTM zona 14 Norte con datum WGS84 (World Geodetic System).

En un nuevo archivo de civilCAD 3D se configuró el mismo sistema de coordenadas de la nube de puntos y ortomosaico para cargar los archivos en él. Con ayuda del ortomosaico se identificaron las unidades de muestreo y delimitaron con un polígono, además se localizaron unos puntos marcados en campo a nivel del suelo que se representaron con puntos en el software, y con ayuda de la nube de puntos densa se creó una superficie de red de triángulos irregulares (TIN) que representó la superficie de la cobertura del cultivo. Con los puntos a nivel del suelo se generó otra superficie TIN, pero esta vez representó la topografía del terreno que ayudó a darle una altura a los polígonos ubicados en las unidades de muestreo. Con la superficie TIN de la cobertura vegetal y los polígonos con la propiedad de altura, se realizó un balance de volumen entre ellos para obtener el volumen aparente en metros cúbicos de cada unidad de muestreo y lo que fue llamado volumen aparente ID-Dron-3D para diferenciarlo del volumen aparente obtenido a partir de las alturas de planta.

Se realizó un análisis de correlación para las variables para determinar si existía correlación significativa entre ellas; en especial del volumen aparente ID-Dron-3D con el volumen real y rendimiento de biomasa de los cultivos bajo estudio. Con base en el análisis de regresión se generó un modelo para predecir rendimientos de biomasa de los cultivos a partir del volumen aparente ID-Dron-3D. Para verificar la validez de los modelos, se revisó que cumplieran los supuestos de Independencia, Homocedasticidad y Normalidad.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La medición de biomasa es una tarea importante durante la cosecha para fines de alimentación del ganado, ya sea mediante el autoconsumo en la granja o para su comercialización. Los procedimientos manuales destructivos en campo han sido muy usados, pero requieren de gran labor y pueden incrementar los costos de producción. Como alternativa a ello se ha propuesto el uso de índices para estimar la biomasa de forma indirecta y sin destruirla (Mónaco *et al.*, 2015, 2017). La correlación de volúmenes de cada cultivo se presenta en el Cuadro 1.

Los valores de correlación resultantes en el presente estudio pueden compararse con aquellos obtenidos con otros procedimientos más complejos y que ocupan drones e imágenes con mayor información espectral (Bendig *et al.*, 2015; Yue *et al.*, 2017; Christiansen *et al.*, 2018).

### Volumen contra Biomasa

Para la creación de un modelo, donde a partir de una variable independiente (volumen aparente ID-Dron-3D) se conozca el valor de una variable dependiente (rendimientos de biomasa fresca o seca) se necesita verificar si existe una correlación entre estas dos variables (Cuadro 2).

### Modelos de regresión para estimar biomasa

Los datos estadísticos de los modelos de regresión lineal obtenidos se presentan en el Cuadro 3.

Considerando las  $R^2$  de los modelos obtenidos en materia fresca, los resultados en la avena forrajera (Figura 3) fueron mejores, respecto a los detectados en alfalfa (Figura 4), lo cual se puede deber a la mayor variabilidad de la cobertura vegetal, ya que, en algunas unidades de muestreo, las plantas de alfalfa no cubrían completamente el suelo; en otros estudios se ha reportado esto como un factor de interferencia en las estimaciones (Castañeda-Ibáñez *et al.*, 2015).

**Cuadro 1.** Correlación entre volúmenes obtenidos en los cultivos de alfalfa (*Medicago sativa* L.) y avena forrajera (*Avena sativa* L.).

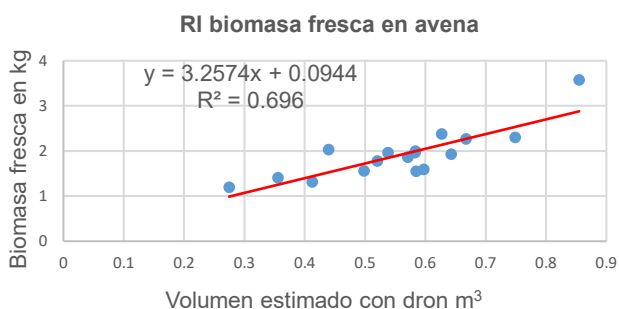
Cultivo	Variable 1	Variable 2	R	P Value
Avena	Volumen Real	Volumen Aparente	0.89	1.90E-06
Avena	Volumen aparente ID-Dron-3D	Volumen Real	0.82	4.56E-05
Avena	Volumen Aparente	Volumen aparente ID-Dron-3D	0.90	9.69E-07
Alfalfa	Volumen Real	Volumen Aparente	0.68	0.0055
Alfalfa	Volumen Dron	Volumen Real	0.75	0.0014
Alfalfa	Volumen Aparente	Volumen Dron	0.81	0.0002

**Cuadro 2.** Correlación entre el volumen aparente ID-Dron-3D y biomasa fresca y seca en los cultivos de alfalfa (*Medicago sativa* L.) y avena forrajera (*Avena sativa* L.).

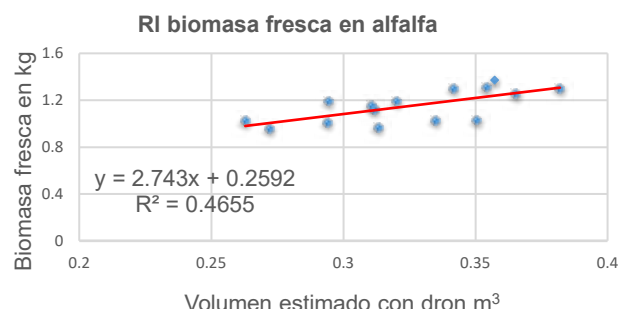
Cultivo	Variable 1	Variable 2	R <sup>2</sup>	P value
Avena	Biomasa Fresca	Volumen aparente ID-Dron-3D	0.83	3.14E-05
Avena	Biomasa Seca	idem	0.88	2.72E-06
Alfalfa	Biomasa Fresca	idem	0.68	5.10E-03
Alfalfa	Biomasa Seca	idem	0.56	0.0309

**Cuadro 3.** Características de regresión de volumen aparente ID-Dron-3D en comparación a biomasa fresca y seca.

Cultivo	Regresión Lineal	n	R <sup>2</sup>	P Value
Biomasa Fresca				
Avena	Y=3.257xVolumen+0.0944	17	0.70	3.14E-05
Alfalfa	Y=2.743xVolumen+0.259	15	0.46	0.0051
Biomasa Seca				
Avena	Y=0.748xVolumen+0.0540	17	0.78	2.72E-06
Alfalfa	Y=0.577xVolumen+0.093	15	0.31	0.0309



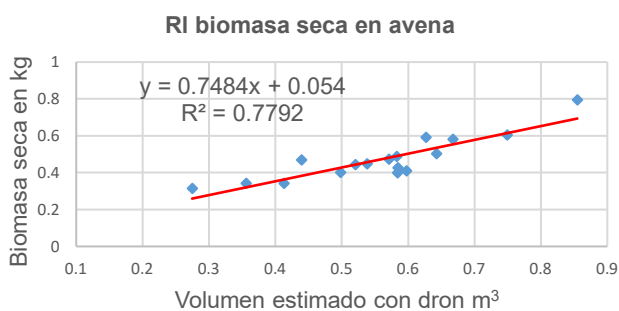
**Figura 3.** Modelo para estimar biomasa fresca en avena (*Avena sativa* L.) a partir del volumen aparente ID-Dron-3D.



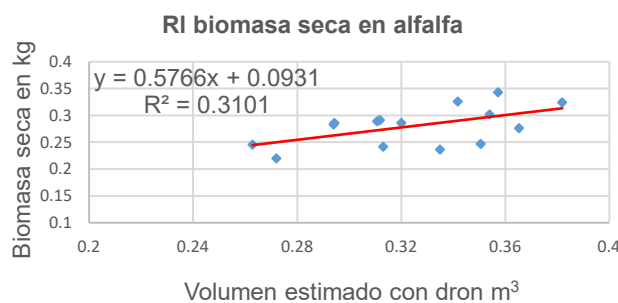
**Figura 4.** Modelo para estimar biomasa fresca en alfalfa (*Medicago sativa* L.) a partir del volumen aparente ID-Dron-3D.

Las mismas observaciones se presentaron en el caso de los modelos de regresión en materia seca; El modelo de la avena (Figura 5) registró mayor correlación respecto al modelo de la alfalfa (Figura 6).

Las pruebas necesarias para garantizar que se cumplieran los supuestos del modelo fueron la prueba de Shapiro-Wilk; prueba de Durbin-Watson, y la prueba de conteo de varianza no constante (Cuadro 4).



**Figura 5.** Modelo para estimar biomasa seca en avena (*Avena sativa* L.) a partir del volumen aparente ID-Dron-3D.



**Figura 6.** Gráfica del modelo para estimar biomasa seca en alfalfa (*Medicago sativa* L.) a partir del volumen aparente ID-Dron-3D.

**Cuadro 4.** Pruebas realizadas para verificar supuestos de los modelos obtenidos.

Variable	Independencia		Normalidad		Homocedasticidad	
	Durbin-Watson	P- Value	Shapiro-Wilk	P- Value	Non-Constant Variance Score	P- Value
Avena						
Biomasa Fresca	1.8735	0.421	0.9553	0.546	3.4085	0.065
Biomasa Seca	1.5068	0.619	0.9618	0.665	0.99692	0.325
Alfalfa						
Biomasa Fresca	1.6257	0.185	0.9341	0.314	0.3562	0.551
Biomasa Seca	1.5068	0.1269	0.9200	0.192	0.575	0.448

Este método de estimación de rendimiento de biomasa, que usa drones, imágenes digitales y modelación 3D, en la medida que el equipo aéreo, cámara digital y software sea más accesibles económicamente, será más fácil de adoptar, con un grado de precisión aceptable (Liaghat y Balasundram, 2010). El presente estudio cumplió con el objetivo de generar un procedimiento para estimar el rendimiento de biomasa aérea de forrajes de invierno bajo riego, mediante imágenes captadas a través de un dron y su modelación 3D. El desarrollo de estas aplicaciones agrícolas usando drones contribuyen al desarrollo de la Agricultura de Precisión (Best *et al.*, 2014), ya que con la presente propuesta metodológica también se pueden elaborar mapas de rendimiento en tiempo real, en el futuro cercano. El procedimiento propuesto requiere ser automatizado, mediante un software, que permita durante el vuelo del dron enviar la información de las imágenes digitales a una computadora que procese la información y en tiempo real estime la biomasa.

## CONCLUSIONES

Se determinó una correlación significativa ( $p < 0.05$ ) entre los volúmenes de biomasa en los cultivos forrajeros de avena y alfalfa. El rendimiento de biomasa fresca y seca de ambos cultivos se correlacionó significativamente con su respectivo volumen aparente estimado con imágenes digitales tomadas desde un dron y su procesamiento 3D (ID-Dron-3D). Es factible predecir el rendimiento de biomasa de los cultivos forrajeros a partir del volumen aparente ID-Dron-3D. Los modelos obtenidos mediante regresión para estimar rendimiento de biomasa a partir del volumen aparente ID-Dron-3D resultaron significativos ( $p < 0.05$ ) y cumplieron con los criterios de validez: independencia de residuos, homocedasticidad y normalidad. En el cultivo de avena los  $R^2$  fueron de 0.70 para biomasa fresca y de 0.78 para biomasa seca. En el cultivo de alfalfa los  $R^2$  fueron de 0.46 para biomasa fresca y de 0.31 para biomasa seca.

## LITERATURA CITADA

- Agisoft LLC. (2018). Agisoft PhotoScan. St Petersburg, Russia. Consultado el 5 de marzo 2018 en [www.agisoft.com](http://www.agisoft.com).
- Andújar, D., Calle, M., Peña, J. M., Ribeiro, Á., Fernández-Quintanilla, C., & Dorado, J. (2017). Modelización 3D de malas hierbas en cultivos de maíz mediante fotogrametría digital automatizada. En XVI Congreso de la Sociedad Española de Malherbología. Pamplona-Iruña, España. Consultado el 11 de abril de 2019 en <https://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/27194/O4.6.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Autodesk, Inc. 2017. Civil 3D. New Jersey, EE. UU. Consultado el 5 de marzo de 2018 en [www.agisoft.com](http://www.agisoft.com).
- Bendig, J., Yu, K., Aasen, H., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J. & Bareth, G. (2015). Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 39, 79-87. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.02.012>.
- Best, S., León, L. Méndez, A., Flores, F., Aguilera, H. (2014). Adopción y desarrollo de tecnologías en agricultura de precisión. *Boletín Digital N° 3*. Progap-INIA, 100p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chillán, Chile.
- Giancoli, D.C. (2006). Física. Principios con aplicaciones. Volumen I (6a edic.). Naucalpan, México: Pearson Educación. Traducción al español por Víctor Campos Olguín.
- Castañeda-Ibáñez, C. R., Martínez-Menes, M., Pascual-Ramírez, F., Flores-Magdaleno, H., Fernández-Reynoso, D. S., & Esparza-Govea, S. (2015). Estimación de coeficientes de cultivo mediante sensores remotos en el distrito de riego río Yaqui, Sonora, México. *Agrociencia*, 49(2), 221-232.
- Christiansen, M. P., Laursen, M. S., Jørgensen, R. N., Skovsen, S., & Gislum, R. (2018). Ground vehicle mapping of fields using LiDAR to enable prediction of crop biomass. In *Proceedings of the 14th International Conference on Precision Agriculture* (unpaginated, online). Monticello, IL: International Society of Precision Agriculture. Consultado el 5 de marzo de 2018 en <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1805/1805.01426.pdf>.
- DJI Technology Inc. (2018). Phantom 4. Shenzhen, China. Consultado el 5 de marzo de 2018 en <https://djistoremexico.com/>.
- Holchek, J. L., Pieper, R. D., & Herbal, C. H. (2004). *Range management: Principles and practices*. New Jersey: Prentice Hall.
- Karcher, D. E. & Richardson, M. D. (2003). Quantifying turfgrass color using digital image analysis. *Crop Science*, 43(3), 943-951.

- Li, J. W., Zhang, F., Qian, X. Y., Zhu, Y. H., & Shen, G. X. (2015). Quantification of rice canopy nitrogen balance index with digital imagery from unmanned aerial vehicle. *Remote Sensing Lett.* 6, 183–189.
- Liaghat, S., & Balasundram, S. K. (2010). A review: The role of remote sensing in precision agriculture. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 5(1), 50-55.
- Martínez-Romero, A. & Leyva-Galán, A. (2014). La biomasa de los cultivos en el ecosistema. Sus beneficios agroecológicos. *Cultivos Tropicales*, 35(1), 11-20. Recuperado en 11 de abril de 2019, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362014000100002&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362014000100002&lng=es&tlng=es).
- Mónaco, N., Rosa, M. J., Santa, V., Aufrán, V., & Heguiabehere, A. (2015). Utilización de estimadores para determinación de biomasa a campo. *European Scientific Journal*, ESJ, 11(33).
- Mónaco, N., Santa, V., Rosa, M. J., & Aufrán, V. (2017). Evaluación de métodos indirectos para estimar biomasa en un pastizal natural del sur de Córdoba (Argentina Central). *European Scientific Journal*, ESJ, 13(36).
- Pix4D. (2018). Ground sampling distance calculator. Lausanne, Suiza. Consultado el 10 de mayo 2018 en <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202560249#gsc.tab=0>.
- Schirrmann, M., Hamdorf, A., Giebel, A., Gleiniger, F., Pflanz, M., & Dammer, K. H. (2017). Regression kriging for improving crop height models fusing ultra-sonic sensing with UAV imagery. *Remote Sensing*, 9(7), 665.
- Mannetje, L. t. (2000). Measuring biomass of grassland vegetation. In Mannetje and Jones, R.M. (eds.). *Field and laboratory methods for grassland and animal production research*, pp. 151-177. Wallingford, UK: CABI publishing.
- Yue, J., Yang, G., Li, C., Li, Z., Wang, Y., Feng, H., & Xu, B. (2017). Estimation of winter wheat above-ground biomass using unmanned aerial vehicle-based snapshot hyperspectral sensor and crop height improved models. *Remote Sensing*, 9(7), 708.

