



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



Vehículos aéreos no tripulados para el monitoreo del estado nutricional y fitosanitario de cultivos forestales

Unmanned Aerial Vehicles to Monitor the Nutritional and Phytosanitary Status of Forest Crops

Mario Guevara-Bonilla¹ , Edgar Ortiz-Malavasi¹ , Javier Hernández-Cole¹ ,
Verónica Villalobos-Barquero¹ 

Guevara-Bonilla, M., Ortiz-Malavasi, E., & Hernández-Cole, J. (2023). Vehículos aéreos no tripulados para el monitoreo del estado nutricional y fitosanitario de cultivos forestales. *Colombia Forestal*, 26(1), 123-133.

Recepción: 1 de abril 2022

Aprobación: 27 de septiembre 2022

Resumen

El uso de vehículos aéreos no tripulados (VANTs) en el monitoreo de plantaciones forestales permite obtener información precisa sobre distintos atributos de los árboles. Este trabajo presenta una revisión crítica del uso potencial de los VANTs para el monitoreo del estado nutricional y fitosanitario de plantaciones forestales. Se realizó una búsqueda bibliográfica en las plataformas Google Scholar, Scopus y Science Direct, utilizando palabras claves como *estrés*, *nutrición* y *forestería*. Se encontraron estudios principalmente en el género *Pinus* y en el continente asiático, que utilizan drones de ala fija y rotatoria para el monitoreo de plagas y enfermedades. Las experiencias en el monitoreo de deficiencias nutricionales son pocas. El uso futuro de VANTs para el monitoreo de estreses en cultivos forestales parece ir dirigido a la automatización en la toma de datos y a combinación de estos con algoritmos de inteligencia artificial.

Palabras clave: dron, plagas y enfermedades forestales, nutrición forestal, plantaciones forestales, monitoreo.

Abstract

The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) to monitor forest plantations allows obtaining precise information on different tree attributes. This paper presents a critical review of the potential use of UAVs for monitoring the nutritional and phytosanitary status of forest plantations. A bibliographic search was carried out on the Google Scholar, Scopus, and Science Direct platforms, using keywords such as *stress*, *nutrition*, and *forestry*. Studies were found mainly on the genus *Pinus* and the Asian continent which use fixed and rotary wing drones to monitor pests and diseases. Experiences in monitoring nutritional deficiencies are few. The future use of UAVs for stress monitoring in forest crops seems to be aimed at automating data collection and combining these with artificial intelligence algorithms.

Keywords: drone, pest and diseases, forest nutrition, pests, forestry plantations, monitoring.

¹ Instituto Tecnológico de Costa Rica, Campus Central, Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica.

* Autor para correspondencia.

INTRODUCCIÓN

La innovación tecnológica permite el uso de nuevas herramientas para el manejo de los recursos naturales. Por mucho tiempo, el uso de imágenes procedentes de sensores remotos ha sido una de las principales herramientas tecnológicas para el monitoreo de variables ambientales.

Con la aplicación del concepto de agricultura de precisión, y con el desarrollo de la cuarta revolución industrial (Industria 4.0), se han introducido tecnologías que combinan vehículos aéreos no tripulados (VANTs) con sensores remotos, cámaras de alta resolución, sistemas de posicionamiento global (GPS) para la recolección de datos de sitio y sistemas de información geográfica para su procesamiento (Tsouros *et al.*, 2019).

El uso de VANTs con cámaras incorporadas tiene gran potencial para el manejo de cultivos, debido a que estos dispositivos ofrecen la posibilidad de disponer imágenes de alta resolución (Dash *et al.*, 2016) y hacer mediciones precisas y no destructivas de distintos atributos de los árboles (Berie & Burud, 2018). Este potencial también se debe a la poca utilización de materiales, la alta intensidad de recolección de datos (Tang & Shao, 2015) y bajo costo (Colomina & Molina, 2014).

Recientemente, el uso de VANTs ha ganado popularidad y ha generado un creciente interés, dados los diferentes tamaños, formas y capacidades de operación de estos dispositivos, con un amplio espectro de aplicaciones civiles y de investigación (Banu *et al.*, 2016; Tang & Shao, 2015).

A nivel mundial se han realizado diversas investigaciones sobre la aplicación de drones en el campo forestal (Torresan *et al.* 2016), en la estimación del diámetro de los árboles (de Lima *et al.*, 2021), en la evaluación y detección de incendios forestales (Dang-Ngoc & Nguyen-Trung, 2019), en la cuantificación de aperturas del dosel (Getzin *et al.*, 2014) y en labores de monitoreo forestal (Khan *et al.*, 2020). Otras actividades como el monitoreo de problemas nutricionales o fitosanitarios podrían tener un gran potencial en un futuro cercano.

Es por tal motivo que este artículo presenta los resultados de una revisión bibliográfica acerca de las características básicas de los vehículos aéreos no tripulados, así como de su uso potencial para el monitoreo y evaluación del estado nutricional y fitosanitario de plantaciones forestales.

MATERIALES Y MÉTODOS

La búsqueda de artículos relevantes comprendió un período de 10 años (2011-2021) y se realizó utilizando Google Scholar y los repositorios Scopus y Science Direct. La búsqueda se realizó en noviembre de 2021, utilizando tres grupos de palabras clave: los términos "drone", "UAV" y "UAS", en combinación con los términos "estrés", "enfermedad", "nutrición" y "plaga", así como con los términos "forestería" y "plantaciones forestales". La búsqueda no se vio limitada por artículos con acceso restringido.

RESULTADOS

Aeronaves piloteadas a distancia como plataforma de captura de información

Los VANTs (o drones, como se les conoce popularmente) son plataformas que operan de manera autónoma o mediante pilotaje remoto. Generalmente están compuestos por un cuerpo principal, motores y propelas, un control remoto, batería o baterías de carga y hélices o alas para poder realizar un vuelo.

Tang y Shao (2015) clasifican a los VANTs en dos categorías de acuerdo con las técnicas de despegue y aterrizaje: (i) drones de ala fija (aviones), los cuales tienen características de despegue y aterrizaje horizontal; y (ii) aeronaves de rotor o de ala giratoria, que realizan las labores de despegue y aterrizaje de forma vertical. Estos últimos pueden poseer cuatro, seis o más hélices. Otros autores clasifican a los VANTs de acuerdo con su

peso y rango o a su suministro de poder (Banu *et al.*, 2016).

Los VANTs presentan numerosas ventajas. Por ejemplo, Banu *et al.* (2016) identifican a los drones como plataformas seguras, ligeras, flexibles y automatizadas, capaces de obtener datos de imágenes para muchas aplicaciones. Adicionalmente, son plataformas de bajo costo y presentan una alta eficiencia (Nex & Remondino, 2014).

Entre las principales limitantes de este tipo de tecnología se encuentran: (i) las restricciones de operación como la altura de vuelo y la distancia máximas permitidas según las regulaciones de cada país, (ii) el alto valor económico de algunos modelos, (iii) que algunos modelos recientes no permiten la opción de realizar vuelos autónomos, (iv) que la mayor cantidad de modelos no toleran la precipitación y (v) la dificultad para reconstruir o procesar imágenes de áreas muy homogéneas (Pádua *et al.*, 2017). Adicionalmente, muchos países exigen una licencia de piloto o un nivel de capacitación alto (Méndez *et al.*, 2015), y existen limitaciones en cuanto al equipo de cómputo requerido para el procesamiento adecuado de las imágenes capturadas (Valverde *et al.*, 2018).

Cámaras y sensores que se pueden cargar

Richards (1999) menciona que, para la adquisición de datos, se destacan dos grandes grupos de sensores: (i) los pasivos, que incluyen cámaras RGB, cámaras multiespectrales, hiperespectrales o térmicas; y (ii) los activos, como los LiDAR, y la radiodetección.

Los sensores de luz visible (RGB) permiten captar imágenes perceptibles por el ojo humano y, utilizados en VANTs, son capaces de capturar imágenes de alta resolución espacial (Pádua *et al.*, 2017).

Existen sensores que permiten captar información del espectro electromagnético más allá del espectro visible, *e.g.*, rojo extremo (*red edge*) e infrarrojo. Este tipo de sensores, denominados *multiespectrales*, son de gran utilidad para el diagnóstico y monitoreo de la nutrición, así como

de la presencia de plagas y enfermedades. Muy similares a los anteriores, están los sensores hiperespectrales, con una gran cantidad de bandas y sensibles y capaces de captar longitudes de onda muy específicas dentro del espectro electromagnético (Pádua *et al.*, 2017).

Finalmente, dentro del grupo de sensores pasivos se encuentran los sensores térmicos, que permiten captar información térmica importante para determinar los estados hídricos de cultivos o plantaciones forestales; o los sensores químicos, que permiten conocer la existencia de componentes químicos peligrosos en el aire (Avtar & Watanabe, 2020).

Entre los sensores de tipo activo se encuentran el LiDAR y el sensor Radar. El primero utiliza la luz en forma de láser para medir los rangos o distancias variables desde el sensor hasta algún objeto, permitiendo generar información en tres dimensiones; mientras que el segundo puede captar información de obstáculos y podría tener aplicaciones en ejercicios de búsqueda y salvamento (Avtar & Watanabe, 2020).

Detección y cuantificación del estrés de las plantas utilizando VANTs

Diagnósticos nutricionales

El manejo de la fertilidad del suelo se define como el manejo de los nutrientes del mismo. Esta actividad se considera fundamental en las primeras etapas de desarrollo de una plantación, ya que condicionan su productividad (Fernández-Moya *et al.*, 2014). Para el diagnóstico de la nutrición, tradicionalmente se han utilizado las técnicas de análisis químico del suelo y el análisis químico foliar (Alvarado & Raigosa, 2012), métodos conocidos y ampliamente utilizados en el sector forestal.

Adicionalmente, existen algunas alternativas indirectas disponibles para algunos nutrientes, como es el caso del medidor manual de clorofila (*soil-plant analysis development*, SPAD) para las predicciones de nitrógeno (Balasubramaniam & Ananthi, 2016), pero este es un proceso que requiere mucho tiempo (Jia *et al.*, 2004), y sus estimaciones no siempre son precisas (Nauš *et al.*, 2010).

Con el avance de la tecnología, los sensores remotos se han convertido en una herramienta útil para realizar diagnósticos nutricionales a nivel de paisaje (Watt *et al.*, 2019). Una gran parte de los estudios sobre deficiencias nutricionales que se encuentran en la literatura utilizan imágenes hiperespectrales capturadas por satélites (Sims *et al.*, 2013). Aunque algunos satélites lanzados recientemente pueden ofrecer altas resoluciones espaciales (Congalton *et al.*, 2014), estas todavía son demasiado bajas para analizar árboles individuales, lo que significa que, en muchos casos, la deficiencia solo puede detectarse cuando ya está muy extendida. Los VANTs, por otro lado, pueden ofrecer resoluciones espaciales de menos de cinco centímetros sin los altos costos que conlleva la adquisición de imágenes satelitales.

A pesar del potencial que pueden tener los VANTs en esta labor, solo existen publicaciones científicas y una tesis sobre este tema (Tabla 1). Los artículos científicos de Prado-Osco *et al.* (2019) y Tahir *et al.* (2018) trabajaron con árboles frutales, mientras que la tesis de Ramírez-Mesén (2019) se realizó con la especie forestal *Gmelina arborea*.

Plagas y enfermedades

Tradicionalmente, el monitoreo de plagas y enfermedades se realiza directamente en campo, evaluando visualmente la incidencia y severidad de la plaga o enfermedad. Sin embargo, la calidad de esta

operación depende de la experiencia de la persona evaluadora, lo que podría inducir a errores. Por lo tanto, las herramientas basadas en imágenes pueden desempeñar un papel importante en la detección y el reconocimiento de plagas en los árboles cuando la evaluación humana no es adecuada, no es confiable o no está disponible, especialmente por la gran área que pueden cubrir los VANTs (Barbedo, 2019).

A diferencia del monitoreo y diagnóstico de la nutrición, en el campo forestal sí existen experiencias que utilizan VANTs para el monitoreo de plagas y enfermedades (Tabla 2). Un 80 % de los trabajos encontrados tienen una antigüedad de tres años. Además, un 73 % de los estudios encontrados fueron realizados con drones de ala giratoria (Lehmann *et al.*, 2019; Miraki *et al.*, 2021; Qin *et al.*, 2021) y un 47 % fueron realizados en China. Cabe destacar que no se encontraron artículos con especies tropicales o realizados en regiones como Norteamérica o el continente africano.

Las especies del género *Pinus* fueron predominantes en los estudios realizados, que se basaron en detección del daño producido o en una cuantificación del mismo (Yu *et al.*, 2021b, 2021c). El uso de herramientas de aprendizaje automático ha sido frecuente en la detección y cuantificación de enfermedades. Las cámaras multiespectrales y RGB han sido los sensores favoritos para adquirir información, debido a su precio y fácil adquisición.

Tabla 1. Referencias encontradas que tratan sobre deficiencias nutricionales en especies o plantaciones forestales

Referencia	Tipo de VANT	Lugar del sitio de estudio	Especie	Sensor	Datos entrada	Datos salida	Modelo
Prado-Osco <i>et al.</i> (2019)	Ala fija	Brasil	<i>Citrus sinensis</i>	Multiespectral	Índices de vegetación	Concentración de nitrógeno foliar	Random Forest
Tahir <i>et al.</i> (2018)	Ala fija	Pakistán	Híbrido Citrus	Multiespectral (bandas R y NIR)	Índice de vegetación	Contenido de clorofila	Regresión
Ramírez-Mesén (2019)	Ala giratoria	Costa Rica	<i>Gmelina arborea</i>	RGB	Índices de vegetación	Concentración de nitrógeno foliar	Regresión lineal

RGB: Cámara con bandas rojo, verde y azul, NIR: infrarrojo cercano.

Tabla 2. Referencias encontradas que tratan sobre problemas fitosanitarios en especies o plantaciones forestales

Referencias	Tipo de VANT	País del estudio	Especie	Plaga y/o enfermedad	Sensor	Datos entrada	Datos Salida	Tipo de modelo
Lehmann <i>et al.</i> (2015)	Ala giratoria	Alemania	<i>Quercus robur</i>	Escarabajo del roble	Multiespectral	NDVI	Cuantificación del daño	ACP
Otsu <i>et al.</i> (2018)	Ala giratoria	España	<i>Pinus sp.</i>	Polilla del pino	RGB	Índice de estrés por humedad	Cuantificación del daño	Regresión logística
Yuan & Hu (2016)	ND	China	Bosque	N/A	RGB	Rasgos de textura	Detección del daño	Random Forest
Zhang <i>et al.</i> (2018)	Ala fija	China	<i>Pinus sp.</i>	Oruga del pino chino	Hiperespectral	Bandas seleccionadas	Cuantificación de la defoliación	Regresión
Duarte <i>et al.</i> (2020)	Ala fija	Portugal	<i>Eucalyptus globulus</i>	Escarabajo del eucalipto	Multiespectral	IV	Cuantificación del daño	Random Forest
Miraki <i>et al.</i> (2021)	Ala giratoria	Irán	<i>Parrotia persica</i>	Viscum álbum	RGB	IV	Cuantificación del daño	Random Forest
Yu <i>et al.</i> (2020)	Ala giratoria	China	<i>Pinus yunnanensis</i>	<i>Tomicus spp.</i>	Hiperespectral	IV	Cuantificación del daño	Regresión lineal multivariada
Qin <i>et al.</i> (2021)	Ala giratoria	China	<i>Pinus sp.</i>	<i>Bursaphelenchus xylophilus</i>	Multiespectral	BES	Detección del daño	SCANet
Lee <i>et al.</i> (2019)	Ala giratoria	China	<i>Pinus sp.</i>	<i>Bursaphelenchus xylophilus</i>	RGB	ID	Detección del daño	ANN
Lin <i>et al.</i> (2019)	ND	China	<i>Pinus yunnanensis</i>	<i>Tomicus spp.</i>	Hiperespectral	IV	Severidad	Random Forest, ACP
Smigaj <i>et al.</i> (2015)	Ala fija	Escocia	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Dothistroma sp.</i>	Térmico	Temperatura de copa	Severidad	Regresión lineal
Yu <i>et al.</i> (2021a)	Ala giratoria	China	<i>Pinus massoniana</i>	<i>Bursaphelenchus xylophilus</i>	Multiespectral	BES, LIDAR	Detección del daño	Random Forest y Support Vector Machine
Wu <i>et al.</i> (2021)	Ala giratoria	China	<i>Pinus massoniana</i>	<i>Bursaphelenchus xylophilus</i>	Multiespectral	BES	Detección del daño	Random Forest
Yu, <i>et al.</i> (2021b)	Ala giratoria	China	<i>Pinus tabulaeformis</i>	<i>Bursaphelenchus xylophilus</i>	Hiperespectral	IV	Cuantificación del daño	Random Forest
Yu, <i>et al.</i> (2021c)	Ala giratoria	Borneo	<i>Pinus tabulaeformis</i>	<i>Bursaphelenchus xylophilus</i>	Hiperespectral	IV	Cuantificación del daño	Random Forest
Megat <i>et al.</i> (2021)	Ala giratoria	Malasia	<i>Eucalyptus pellita</i>	Varias	RGB	IV	Estado fitosanitario	ND
Pedrali <i>et al.</i> (2019)	ND	Brasil	<i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	<i>Erwinia psidii</i>	Multiespectral	IV	Severidad	ANOVA

RGB: cámara con bandas rojo, verde y azul; **ACP:** análisis de componentes principales; **NDVI:** Índice de vegetación de diferencia normalizada; **IV:** índices de vegetación; **ID:** imágenes de dron; **ND:** no data; **ANN:** red neuronal artificial; **BES:** bandas espectrales seleccionadas.

DISCUSIÓN

Entre los diferentes actores del sector forestal existe una percepción cada vez mayor de que los VANTs pueden ser herramientas útiles para el monitoreo y recopilación de información de plantaciones forestales. Ortiz *et al.* (2020) encontraron que al menos un 50 % de las necesidades de datos o información de las empresas de reforestación podría solventarse utilizando drones.

Sin embargo, el uso de esta tecnología para la evaluación nutricional en plantaciones forestales es incipiente. Para el diagnóstico y monitoreo de la nutrición en plantaciones forestales, tradicionalmente se han utilizado las técnicas de análisis químico de suelo y el análisis químico foliar (Alvarado, 2012; Watt *et al.*, 2019), las cuales presentan desventajas como la alta demanda de tiempo y recursos (Quintana, 2014; Watt *et al.*, 2019).

A pesar de que los VANTs se han utilizado para predecir cambios en el estrés fisiológico dentro de las plantaciones (Dash *et al.*, 2016), a la fecha se han realizado pocas investigaciones de este tipo para monitorear las deficiencias nutricionales. Entre las limitantes para su utilización se encuentran el alto costo inicial del equipo, la poca duración de la batería, la capacidad de carga limitada y la necesidad de equipo y programas de cómputo especializados para el procesamiento y análisis de las imágenes.

A pesar de las limitaciones expuestas, las plantaciones forestales de una sola especie son las candidatas más probables para la aplicación a gran escala de los VANTs en la detección de deficiencias nutricionales. En este contexto, los drones con cámaras RGB o multiespectrales podrían utilizarse como complemento a los métodos tradicionales, así como en una fase de monitoreo inicial.

Entre las futuras aplicaciones de esta tecnología deben figurar métodos que puedan caracterizar los determinantes fisiológicos clave de la respuesta de los bosques a los fertilizantes. El índice de área foliar y la concentración de algunos elementos (*i.e.*, N) son muy prometedores para diagnosticar y monitorear las deficiencias de nutrientes en

rodiales naturales o de plantaciones de especies individuales que se gestionan activamente (Watt *et al.*, 2019). Adicionalmente, se podrían tomar decisiones sobre la aplicación de fertilizantes dentro de plantaciones forestales o para predecir con precisión las características de los árboles y las respuestas de tratamiento dentro de los ensayos de fertilizantes (Watt *et al.*, 2019).

De acuerdo con lo analizado en este trabajo, existe una mayor cantidad de casos y mayor experiencia en el uso de VANTs para el monitoreo de plagas y enfermedades en cultivos forestales. Los VANTs de tamaño medio y las cámaras multiespectrales son las más utilizadas para este tipo de labores. Entre sus principales ventajas se encuentran su bajo costo, fácil maniobrabilidad en el aire y su facilidad de despegue y aterrizaje. Sin embargo, es importante considerar que, aunque este tipo de VANTs son fáciles de pilotear, la curva de aprendizaje puede ser pronunciada y se necesita de amplia experiencia. Adicionalmente, estos dispositivos tienen la desventaja de poseer una capacidad de carga limitada. Esto limita no solo los sensores que se pueden desplegar, sino también el tiempo de vuelo y, como consecuencia, la cobertura del área (Anderson & Gaston, 2013).

A diferencia del monitoreo nutricional, el monitoreo de plagas con este tipo de tecnología puede ser económicamente más viable, pues permitiría cubrir grandes extensiones en menor tiempo, hacer revisiones periódicas y monitorear áreas de difícil acceso. A pesar de que Lehmann *et al.* (2019) mencionan que la metodología utilizada en su estudio tuvo un fuerte impacto económico positivo, con una reducción de tiempo y dinero del 50 % en el trabajo de detección de plagas, la mayoría de los artículos analizados para este trabajo no presentan ni hacen un análisis de los costos de operación, así como del costo del procesamiento y análisis de las imágenes obtenidas.

Existen factores, como la iluminación, el ángulo de la cámara y las sombras de las copas de los árboles, que pueden tener un impacto significativo en la detección de plagas (Lehmann *et al.*, 2015;

Otsu *et al.*, 2018). Barbedo (2016) menciona que los siguientes factores influyen en la identificación automática de enfermedades de las plantas:

- El fondo de la imagen
- Las condiciones de captura de imágenes
- Las variaciones de los síntomas
- Otros trastornos y tensiones

Un efecto en bosques y huertos es la defoliación de árboles, una señal que se ha explorado en algunos experimentos (Lehmann *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2018). Además, los insectos pueden alterar los procesos fisiológicos y la fotosíntesis, provocando un impacto en la altura de la planta, efecto que puede detectarse mediante la fotogrametría.

El uso de VANTs para el monitoreo de se ha dado principalmente a nivel experimental y enfocado en regiones de Europa y Asia. A pesar de lo alentadores que han sido los resultados experimentales, la adopción práctica del uso de VANTs para el monitoreo de deficiencias nutricionales y/o problemas fitosanitarios ha sido lenta, independientemente del tipo de sensor o el método de implementación (Barbedo, 2019).

Una posible explicación es que existen muchos factores capaces de alterar el estado fisiológico y morfológico característico de los árboles en condiciones de campo, por lo que obtener respuestas inequívocas basadas únicamente en la información contenida en las imágenes se vuelve inviable con la tecnología actual (Barbedo, 2019). Otra posible razón es que no existen programas de capacitación formales para el uso de esta tecnología, y que el precio de esta no es el mismo en todas las regiones del mundo. En regiones como África o América Latina, el costo de adquisición de esta tecnología puede ser superior al de regiones como Asia, Europa o Norteamérica.

CONCLUSIONES

A pesar del uso de imágenes satelitales y de la experiencia en el monitoreo de cultivos agrícolas, el uso de sensores añadidos a los VANTs para el monitoreo y diagnóstico de deficiencias nutricionales

en bosques o plantaciones forestales es casi nulo. Sin embargo, se prevé que en los próximos años aumente el número de investigaciones en este campo.

Por otra parte, existen experiencias en el uso de VANTs para la detección y cuantificación de daños en plagas y enfermedades forestales. La combinación de cámaras multispectrales con algoritmos de aprendizaje automático permite una adecuada detección del daño y un monitoreo a mayor escala que los métodos tradicionales.

El futuro uso de esta tecnología para el monitoreo de estreses en cultivos forestales parece ir dirigido al uso de índices de vegetación, a la automatización en la toma de datos y a la combinación de estos con algoritmos de inteligencia artificial.

El uso práctico de esta tecnología dependerá del grado de éxito de los ensayos realizados, del nivel de costo del equipo y su operación, y de procesos de capacitación que permitan a técnicos y profesionales del sector forestal conocer, analizar y dar recomendaciones a partir de las imágenes capturadas.

CONTRIBUCIONES POR AUTOR

V. V., J. H. y M. G. realizaron la búsqueda bibliográfica, M.G y J.H escribieron el borrador inicial, y E.O y V.V revisaron el manuscrito.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica por financiar este proyecto.

REFERENCIAS

- Alvarado, A., & Raigosa, J. (2012). Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales. *Agronomía Costarricense*, 36(1), 113-115.
https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_art-text&pid=S0377-94242012000100009

- Anderson, K., & Gaston, K. J.** (2013). Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(3), 138-146.
<https://doi.org/10.1890/120150>
- Arriola-Valverde, S, Ferencz-Appel, A., & Rimolo-Donadio, R.** (2018). Fotogrametría terrestre con sistemas aéreos autónomos no tripulados. *Investiga.Tec*, 31, 3475.
<https://doi.org/10.18845/tm.v29i4.3040>
- Avtar, R., & Watanabe, T.** (Eds.). (2020). *Unmanned aerial vehicle: Applications in agriculture and environment*. Springer International Publishing.
- Balasubramaniam, P., & Ananthi, V. P.** (2016). Segmentation of nutrient deficiency in incomplete crop images using intuitionistic fuzzy C-means clustering algorithm. *Nonlinear Dynamics*, 83(1), 849-866.
<https://doi.org/10.1007/s11071-015-2372-y>
- Banu, T. P., Borlea, G. F., & Banu, C.** (2016). The use of drones in forestry. *Journal of Environmental Science and Engineering B*, 5(11), 557-562.
<https://doi.org/10.17265/2162-5263/2016.11.007>
- Barbedo, J. G. A.** (2016). A review on the main challenges in automatic plant disease identification based on visible range images. *Biosystems Engineering*, 144, 52-60.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.01.017>
- Barbedo, J. G. A.** (2019). A review on the use of unmanned aerial vehicles and imaging sensors for monitoring and assessing plant stresses. *Drones*, 3(2), 40.
<https://doi.org/10.3390/drones3020040>
- Berie, H. T., & Burud, I.** (2018). Application of unmanned aerial vehicles in earth resources monitoring: focus on evaluating potentials for forest monitoring in Ethiopia. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1), 326-335.
<https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1432993>
- Colomina, I., & Molina, P.** (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79-97.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- Congalton, R. G., Gu, J., Yadav, K., Thenkabail, P., & Ozdogan, M.** (2014). Global land cover mapping: A review and uncertainty analysis. *Remote Sensing*, 6(12), 12070-12093.
<https://doi.org/10.3390/rs61212070>
- Dang-Ngoc, H., & Nguyen-Trung, H.** (2019, 17-19 de octubre). *Aerial forest fire surveillance-evaluation of forest fire detection model using aerial videos* [Conference presentation]. 2019 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), Hanoi, Vietnam.
<https://doi.org/10.1109/atc.2019.8924547>
- Dash, J., Pont, D., Brownlie, R., Dunningham, A., Watt, M., & Pearse, G.** (2016). Remote sensing for precision forestry. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 60(4), 15-24.
- de Lima Santos, I. C., dos Santos, A., Costa, J. G., Rosa, A. M., Zanuncio, A. J. V., Zanetti, R., Oumar, Z., & Zanuncio, J. C.** (2021). *Tectona grandis* canopy cover predicted by remote sensing. *Precision Agriculture*, 22(3), 647-659.
<https://doi.org/10.1007/s11119-020-09748-w>
- Duarte, A., Acevedo-Muñoz, L., Gonçalves, C. I., Mota, L., Sarmiento, A., Silva, M., Fabres, S., Borralho, N., & Valente, C.** (2020). Detection of longhorned borer attack and assessment in eucalyptus plantations using UAV imagery. *Remote Sensing*, 12(19), 3153.
<https://doi.org/10.3390/rs12193153>
- Fernández-Moya, J., Alvarado, A., San Miguel-Ayanz, A., & Marchamalo-Sacristán, M.** (2014). Forest nutrition and fertilization in teak (*Tectona grandis* Lf) plantations in Central America. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 44, S6.
<https://doi.org/10.1186/1179-5395-44-s1-s6>
- Getzin, S., Nuske, R. S., & Wiegand, K.** (2014). Using unmanned aerial vehicles (UAV) to quantify spatial gap patterns in forests. *Remote Sensing*, 6(8), 6988-7004.
<https://doi.org/10.3390/rs6086988>
- Jia, L., Chen, X., Zhang, F., Buerkert, A., & Römheld, V.** (2004). Use of digital camera to assess nitrogen status of winter wheat in the northern China plain. *Journal of Plant Nutrition*, 27(3), 441-450.
<https://doi.org/10.1081/pln-120028872>

- Khan, A., Gupta, S., & Gupta, S. K.** (2020). Multi-hazard disaster studies: Monitoring, detection, recovery, and management, based on emerging technologies and optimal techniques. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 47, 101642. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101642>
- Lee, S., Park, S., Baek, G., Kim, H., & Lee, C.** (2019). Detection of damaged pine tree by the pine wilt disease using UAV Image. *Korean Journal of Remote Sensing*, 35(3), 359-373.
- Lehmann, J. R. K., Nieberding, F., Prinz, T., & Knoth, C.** (2015). Analysis of unmanned aerial system-based CIR images in forestry—A new perspective to monitor pest infestation levels. *Forests*, 6(3), 594-612. <https://doi.org/10.3390/f6030594>
- Lin, Q., Huang, H., Wang, J., Huang, K., & Liu, Y.** (2019). Detection of pine shoot beetle (PSB) stress on pine forests at individual tree level using UAV-based hyperspectral imagery and lidar. *Remote Sensing*, 11(21), 2540. <https://doi.org/10.3390/rs11212540>
- Megat Mohamed Nazir, M. N., Terhem, R., Norhisham, A. R., Mohd Razali, S., & Meder, R.** (2021). Early monitoring of health status of plantation-grown *Eucalyptus pellita* at large spatial scale via visible spectrum imaging of canopy foliage using unmanned aerial vehicles. *Forests*, 12(10), 1393. <https://doi.org/10.3390/f12101393>
- Méndez, A., Vélez, J., Scaramuzza, F., & Villaroel, D.** (2015). Los drones como herramienta para el monitoreo de cultivos. *Revista de la Bolsa de Comercio de Rosario*, (1524), 6-10. <https://www.bcr.com.ar/sites/default/files/drones.pdf>
- Michez, A., Piégay, H., Lisein, J., Claessens, H., & Lejeune, P.** (2016). Classification of riparian forest species and health condition using multi-temporal and hyperspatial imagery from unmanned aerial system. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(3), 146. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4996-2>
- Miraki, M., Sohrabi, H., Fatehi, P., & Kneubuehler, M.** (2021). Detection of mistletoe infected trees using UAV high spatial resolution images. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 128, 1679-1689. <https://doi.org/10.1007/s41348-021-00502-6>
- Nauš, J., Prokopová, J., Řebíček, J., & Špundová, M.** (2010). SPAD chlorophyll meter reading can be pronouncedly affected by chloroplast movement. *Photosynthesis Research*, 105(3), 265-271. <https://doi.org/10.1007/s11120-010-9587-z>
- Nex, F., y Remondino, F.** (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- Ortiz-Malavasi, E., Tapia-Arenas, A., Guevara-Bonilla, M., & Hernández-Cole, J.** (2020). Viabilidad del uso de los VANTS en el monitoreo de plantaciones forestales. *Boletín técnico*. https://drive.google.com/drive/u/0/folders/104yhSyE2rMG4hTPs_52V_kvxCZaOZwh
- Otsu, K., Pla, M., Vayreda, J., & Brotons, L.** (2018). Calibrating the severity of forest defoliation by pine processionary moth with Landsat and UAV imagery. *Sensors*, 18(10), 3278. <https://doi.org/10.3390/s18103278>
- Pádua, L., Vanko, J., Hruška, J., Adão, T., Sousa, J. J., Peres, E., & Morais, R.** (2017). UAS, sensors, and data processing in agroforestry: A review towards practical applications. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), 2349-2391. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1297548>
- Pedrali, L. D., Borges Junior, N., Pereira, R. S., Tramontina, J., Alba, E., & Marchesan, J.** (2019). Multispectral remote sensing for determining dry severity levels of pointers in *Eucalyptus* spp. *Scientia Forestalis*, 47(122), 224-234. <https://doi.org/10.18671/scifor.v47n122.05>
- Prado Osco, L., Marques Ramos, A. P., Roberto Pereira, D., Akemi Saito Moriya, É, Nobuhiro Imai, N., Takashi Matsubara, E., Estrabis, N., de Souza, M., Marcato Junior, J., & Gonçalves, W. N.** (2019). Predicting canopy nitrogen content in citrus-trees using random forest algorithm associated to spectral vegetation indices from UAV-imagery. *Remote Sensing*, 11(24), 2925. <https://doi.org/10.3390/rs11242925>

- Qin, J., Wang, B., Wu, Y., Lu, Q., & Zhu, H.** (2021). Identifying Pine Wood Nematode Disease Using UAV Images and Deep Learning Algorithms. *Remote Sensing*, 13(2), 162.
<https://doi.org/10.3390/rs13020162>
- Quintana, R.** (2014). Técnicas avanzadas de análisis para los cultivos en tiempo real. En IICA y PROCISUR (Eds.), *Manual de agricultura de precisión* (pp. 58-70). IICA.
- Ramírez-Mesén, C. M.** (2019). *Uso de un vehículo aéreo no tripulado como alternativa para evaluar el estado nutricional de una plantación de Gmelina arborea Roxb, San Carlos, Costa Rica.*
https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/11154/uso_vehiculo_aereo_no_tripulado.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Richards, J. A., & Richards, J. A.** (1999). *Remote sensing digital image analysis*. Springer.
- Sims, N. C., Culvenor, D., Newnham, G., Coops, N. C., & Hopmans, P.** (2013). Towards the operational use of satellite hyperspectral image data for mapping nutrient status and fertilizer requirements in Australian plantation forests. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(2), 320-328.
<https://doi.org/10.1109/jstars.2013.2251610>
- Smigaj, M., Gaulton, R., Barr, S. L., & Suárez, J. C.** (2015). UAV-borne thermal imaging for forest health monitoring: detection of disease induced canopy temperature increase. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, XL-3/W3, 349-354.
<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xl-3-w3-349-2015>
- Tahir, M. N., Naqvi, S. Z. A., Lan, Y., Zhang, Y., Wang, Y., Afzal, M., Cheema, M. J. M., & Amir, S.** (2018). Real time estimation of chlorophyll content based on vegetation indices derived from multispectral UAV in the kinnow orchard. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*, 1(1), 24-31.
<http://dx.doi.org/10.33440/j.ijpaa.20180101.0001>
- Tang, L., & Shao, G.** (2015). Drone remote sensing for forestry research and practices. *Journal of Forestry Research*, 26(4), 791-797.
<https://doi.org/10.1007/s11676-015-0088-y>
- Torresan, C., Berton, A., Carotenuto, F., Di Gennaro, S. F., Gioli, B., Matese, A., Miglietta, F., Vagnoli, C., Zaldei, A., & Wallace, L.** (2017). Forestry applications of UAVs in Europe: A review. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), 2427-2447.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1252477>
- Tsouros, D. C., Bibi, S., & Sarigiannidis, P. G.** (2019). A review on UAV-based applications for precision agriculture. *Information*, 10(11), 349.
<https://doi.org/10.3390/info10110349>
- Watt, M. S., Pearse, G. D., Dash, J. P., Melia, N., & Leonardo, E. M. C.** (2019). Application of remote sensing technologies to identify impacts of nutritional deficiencies on forests. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 149, 226-241.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.01.009>
- Wu, B., Liang, A., Zhang, H., Zhu, T., Zou, Z., Yang, D., Tang, W., Li, J., & Su, J.** (2021). Application of conventional UAV-based high-throughput object detection to the early diagnosis of pine wilt disease by deep learning. *Forest Ecology and Management*, 486, 118986.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118986>
- Yu, R., Luo, Y., Zhou, Q., Zhang, X., Wu, D., & Ren, L.** (2021a). Early detection of pine wilt disease using deep learning algorithms and UAV-based multi-spectral imagery. *Forest Ecology and Management*, 497, 119493.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119493>
- Yu, R., Luo, Y., Zhou, Q., Zhang, X., Wu, D., & Ren, L.** (2021b). A machine learning algorithm to detect pine wilt disease using UAV-based hyperspectral imagery and LiDAR data at the tree level. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 101, 102363.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102363>
- Yu, R., Ren, L., & Luo, Y.** (2021c). Early detection of pine wilt disease in *Pinus tabuliformis* in North China using a field portable spectrometer and UAV-based hyperspectral imagery. *Forest Ecosystems*, 8(1), 1-19.
<https://doi.org/10.1186/s40663-021-00328-6>

Yu, L., Zhan, Z., Ren, L., Zong, S., Luo, Y., & Huang, H. (2020). Evaluating the potential of WorldView-3 data to classify different shoot damage ratios of *Pinus yunnanensis*. *Forests*, 11(4), 417.

<https://doi.org/10.3390/f11040417>

Yuan, Y., & Hu, X. (2016). Random forest and objected-based classification for forest pest extraction from UAV aerial imagery. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 1093.

<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xli-b1-1093-2016>

Zhang, N., Zhang, X., Yang, G., Zhu, C., Huo, L., & Feng, H. (2018). Assessment of defoliation during the *Dendrolimus tabulaeformis* Tsai et Liu disaster outbreak using UAV-based hyperspectral images. *Remote Sensing of Environment*, 217, 323-339.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.024>

