Uso de la inteligencia artificial y tecnologías VANT para el manejo de los recursos forestales

Use of artificial intelligence and UAV technologies for the management of forest resources

Recepción del artículo: 11/06/2026 • Aceptación para publicación: 27/08/2026 • Publicación: 01/09/2026

https://doi.org/10.32870/e-cucba.vi29.442

Ángel Mario Reyna-González
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1596-6759
Reynaldo de León-Valladares*
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-1208-5865
Luis Gerardo-Cuéllar Rodríguez
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4969-611X
José Israel Yerena-Yamalle
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9216-7427
Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales. Linares, Nuevo León, México.

*Autor para correspondencia:
reynaldo.dev@gmail.com

Resumen

La tecnología ha propiciado una serie de cambios favorables en las ciencias forestales y las metodologías de monitoreo para la toma de decisiones en el manejo de recursos forestales. Podemos identificar un parteaguas en este desarrollo que va desde el uso de sensores remotos, vehículos aéreos no tripulados (VANT´s) o Drones, mismos que se han convertido en la principal tendencia y herramienta con la cual es posible recopilar mayor cantidad y calidad de información con menor inversión de tiempo y una considerable reducción en los costos de operación. Recientemente la incorporación que ha venido revolucionando la forma de analizar los ecosistemas, es el uso de técnicas de inteligencia artificial, que combinadas con desarrollos tecnológicos han innovado la forma de evaluar los ecosistemas en esta era de cambios tecnológicos. En este trabajo se describen los principales avances tecnológicos en cuanto al uso de inteligencia artificial y drones aplicados al manejo de recursos forestales, abordando sus principales ventajas, desventajas, técnicas y áreas de aplicación desde la identificación de especies botánicas, el manejo forestal, suelos, así como la evaluación y monitoreo de incendios forestales y el papel que cumplen estas herramientas como apoyo para la gestión forestal y el futuro de estas tecnologías.

Palabras clave: drones, aprendizaje automático, percepción remota, monitoreo ambiental, sensores multiespectrales.

Abstract

Technology has brought about a series of positive changes in forestry sciences and monitoring methodologies for decision-making in forest resource management. We can identify a turning point in this development that goes from the use of remote sensors, unmanned aerial vehicles (UAVs) or drones, which have become the main trend and tool with which it is possible to gather more and better information with less time investment and a considerable reduction in operating costs. Recently, the incorporation that has been revolutionizing the way ecosystems are analyzed is the use of artificial intelligence techniques, which, combined with technological developments, have innovated the way ecosystems are evaluated in this era of technological change. This paper describes the main technological advances regarding the use of artificial intelligence and drones applied to forest resource management, covering their main advantages, disadvantages, techniques, and areas of application, from identifying plant species, forest management, and soils, to the assessment and monitoring of forest fires, and the role these tools play in supporting forest management and the future of these technologies.

Keywords: drones, machine learning, remote sensing, environmental monitoring, multispectral sensors.

Introducción

Las primeras aplicaciones de la fotografía aérea, que dieron paso a la percepción remota y a las aplicaciones que hoy conocemos, surgieron entre 1860 y 1960. Durante esos años se enfocaron principalmente en fines militares y en unos pocos estudios agrícolas y forestales; sin embargo, no fue sino hasta 1970, con la incorporación de sensores digitales en la aplicación civil, que comenzaron a utilizarse en estudios más concretos sobre la gestión de los recursos forestales, como la evaluación de la cobertura vegetal, los inventarios forestales y el monitoreo de áreas afectadas por incendios (Tang y Shao, 2015a; Banu et al., 2016).

Con el avance de las nuevas tecnologías, muchas disciplinas se han reinventado al incorporar nuevas técnicas de análisis, monitoreo, gestión y recopilación de datos que simplifican cada vez más las tareas del usuario (Jones et al., 2024). Un ejemplo de ello son las ciencias forestales. A lo largo de los años, estas han evolucionado para responder a nuevos desafíos, como la creciente presión sobre los bosques, los efectos del cambio climático y la necesidad de información más precisa para la toma de decisiones, por lo que se han adaptado a un gran número de nuevas aplicaciones, herramientas y metodologías para cumplir con su objetivo principal: el manejo sostenible de los recursos forestales (Wang et al., 2025). Entre ellas resalta el uso de la percepción remota (teledetección), con aplicaciones como la cartografía de la cobertura vegetal, la estimación de variables dasométricas, la detección de cambios de uso de suelo y el monitoreo de áreas afectadas por incendios y plagas (Tang y Shao, 2015b; Sharma et al., 2024). La percepción remota se basa en la captura de la energía electromagnética reflejada o emitida por los objetos para percibirlos a distancia. Su aplicación al estudio de los recursos naturales ha permitido obtener información de variables como agua, suelo y vegetación, o de cualquier objeto capaz de reflejar o emitir energía electromagnética (Ojeda Bustamante et al., 2016). Con la evolución de los procesos tecnológicos y la incorporación de nuevos sensores y técnicas, se han generado nuevas herramientas de medición basadas en la percepción remota que buscan reducir la complejidad de los muestreos de campo. Entre ellas destacan los vehículos aéreos no tripulados (VANT´s), comúnmente conocidos como drones. Al igual que la fotografía aérea y los satélites, los drones se emplearon primero con fines militares; posteriormente se utilizaron en la agricultura para el monitoreo de campos y cosechas, así como en programas de agricultura de precisión (Stehr, 2015). Las primeras aplicaciones de orden civil iniciaron en la década de los 90´s y a principios de los 2000, con ensayos de drones de tamaño pequeño y mediano en investigación ambiental (Hardin y Jensen, 2011). El uso de drones proporciona múltiples beneficios, entre ellos la obtención de información de lugares inaccesibles, la adquisición de datos con alta resolución espacial y temporal, la flexibilidad para repetir vuelos sobre una misma área y la reducción de costos frente a las plataformas satelitales y aerotransportadas tripuladas (Mishra y Rai, 2021). Estos beneficios se deben a su capacidad para transportar sensores que permiten recopilar fotografías y videos en alta definición. A partir de este material, y mediante el proceso fotogramétrico digital, es posible generar ortomosaicos y modelos digitales de elevación, así como realizar mediciones de áreas urbanas y rurales (Sani et al., 2015). El avance de las tecnologías geoespaciales ha permitido desarrollar aplicaciones cada vez más precisas y de menor costo en comparación con las metodologías tradicionales, como los inventarios forestales y los levantamientos topográficos realizados directamente en campo (Addati y Pérez Lance, 2014).

En el ámbito forestal, los drones también se utilizan en procesos más complejos, como la evaluación de plantaciones y de áreas en restauración, donde permiten medir el crecimiento en diámetro, altura y cobertura, así como orientar acciones correctivas (Gutiérrez-Barrientos et al., 2022); además, las imágenes generadas por sus sensores brindan información precisa a nivel de individuo sobre el estado nutricional y fitosanitario del arbolado (Guevara-Bonilla et al., 2023). A los drones se ha sumado la inteligencia artificial (IA), que amplía los beneficios de estos equipos al reducir el tiempo y el costo del procesamiento de la información digital que recopilan. En la silvicultura, la ecología y la vigilancia de incendios forestales, por ejemplo, la IA se emplea para planificar vuelos automáticos y detectar formas y objetos en las imágenes (Madridano et al., 2020).

Un ejemplo de esta integración es el estudio de Kedia et al. (2021), cuya finalidad fue identificar especies vegetales potencialmente invasoras mediante drones y técnicas de IA; las imágenes generadas permitieron, además, clasificar la vegetación desde el nivel de especie hasta clases de vegetación herbácea.

Otro estudio que describe las posibilidades de emplear la combinación de IA y drones es el de Schaeffer et al., (2021) donde se comprobó que mediante autómatas celulares existe la posibilidad de clasificar diferentes fases de infestación de insectos descortezadores, así como predecir mediante las imágenes tomadas por el dron aquellas áreas susceptibles al ataque de los insectos descortezadores. También es posible combinar estas técnicas que implican el uso de VANT´s y de modelos de IA para evaluar los procesos del microrelieve y monitorear posibles fuentes de contaminación del suelo, como es el caso del estudio realizado por Capolupo et al., (2015) donde mediante la generación de ortomosaicos y

modelos digitales de elevación de alta resolución se pudo predecir con un alto nivel de efectividad zonas de acumulación de cobre. En conjunto, revisiones recientes coinciden en que la IA fortalece la vigilancia de la salud forestal al permitir la detección temprana de plagas, enfermedades y otros disturbios (Amoah-Nuamah et al., 2025; Wang et al., 2025), mientras que su integración con los sistemas de información geográfica ha dado lugar a enfoques de GeoAI aplicados a la predicción de incendios y al manejo de los recursos naturales (Aziz et al., 2026).

Materiales y métodos

La redacción de este documento se dividió en tres fases: búsqueda, evaluación y síntesis, con base en una amplia consulta de fuentes literarias, técnicas y académicas publicadas en revistas indexadas, informes de investigación, libros y tesis de posgrado. Las bases de datos consultadas fueron Scopus, Web of Science, ScienceDirect (Elsevier), Google Académico, SciELO y el Repositorio de la Biblioteca Digital de la Universidad Autónoma de Nuevo León, elegidas por su amplio acervo de documentos científicos. La búsqueda se realizó con palabras clave en inglés como "UAV", "artificial intelligence", "natural resources", "algorithm", "machine learning", "forestry UAV" y "remote sensing", y se filtró la información considerada pertinente para la presente investigación. Como criterio de selección se consideraron artículos publicados en los últimos diez años enfocados en el manejo de los recursos forestales mediante técnicas que implican el uso de IA, drones y sensores remotos. Posteriormente, se seleccionaron los artículos relacionados con tres ejes temáticos: los incendios forestales; la identificación y clasificación de especies vegetales, el monitoreo de plantaciones y la detección de plagas; y el manejo y conservación de suelos. De los 195 documentos obtenidos en los repositorios digitales, 73 se excluyeron en un primer filtrado por relevancia de contenido, por lo que 122 artículos pasaron a una revisión profunda.

Tras la exclusión final, se integraron 56 documentos científicos, de los cuales se extrajo la información más relevante.

Resultados

Tipos de drones utilizados en el manejo de recursos forestales

Un vehículo aéreo no tripulado (VANT) es una aeronave controlada de forma remota mediante el uso de telemetría y que dependiendo de su sistema de propulsión el cual puede ser de ala fija, multirotor o mixto y que a su vez puede cumplir con la función de transportar sensores que pueden capturar diversos tipos de datos (Cuadro 1) como geoespaciales, imágenes y climáticos (Addati y Pérez Lance, 2014).
Así mismo los drones pueden clasificarse según su tipo de vuelo o despegue y tamaño en grandes, micro y mini (Figura 1), estos a su vez pueden emplearse en diferentes tareas y aplicaciones para desempeñar funciones específicas para las cuales el tipo de despegue es una característica de suma importancia ya que de esto dependerá el servicio final que pueda brindar el equipo (Guevara-Bonilla et al., 2020).

Avances tecnológicos con Drones

Los VANT´s han evolucionado rápidamente, permitiendo su aplicación en ambientes naturales gracias a su bajo costo, facilidad de operación, alta resolución espacial y repetibilidad de vuelos. Los drones de ala fija ofrecen autonomía extendida, ideales para grandes superficies, mientras que los multirrotores brindan maniobrabilidad en terrenos complejos (Shah, 2024). La adaptación de sensores como cámaras RGB, NIR, multiespectrales, hiperespectrales y LIDAR ha permitido realizar evaluaciones detalladas de coberturas vegetales, estructura forestal, humedad de suelos y caracterización topográfica (Guevara-Bonilla et al., 2020; Ojeda Bustamante et al., 2016).

Cuadro 1. Atributos de los VANT´s según su diseño.

Característica	Tipo o diseño		
	Ala Fija	Multirotor	Mixta
Vuelo	A gran altitud y velocidad	Estacionario estable	Mayor cobertura por vuelo
Capacidad de maniobra	Baja	Alta	Baja
Autonomía	Alta	Baja	Media
Eficiencia energética	Alta	Baja	Media
Capacidad de carga útil	Baja	Alta	Baja

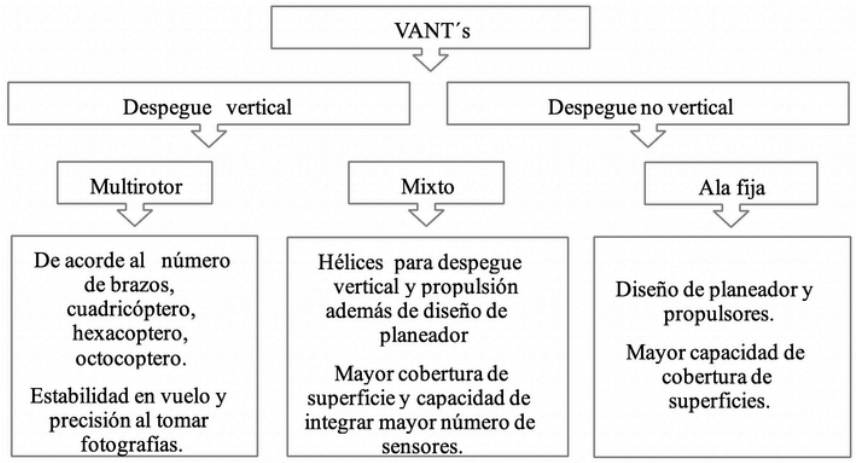


Figura 1. Clasificación de los VANT´s y su utilidad de acuerdo con su diseño.

Dentro de las innovaciones de los drones y los equipamientos que se les pueden aplicar se describen dos tipos de sensores: Sensores activos, son aquellos que emiten una frecuencia y regresa con la información recopilada, entre ellos se encuentran los LIDAR, radio detección y de RADAR, mientras que los sensores pasivos son aquellos que captan una imagen apoyados de la reflectancia generada por los rayos solares como son los RGB e infrarrojo así como sus combinaciones multiespectrales e hiperespectrales (Richards et. al., 2006).

Los sensores activos como el LIDAR por sus siglas en ingles de Light Detection and Ranging, permiten conocer a detalle características en el terreno ya que estos funcionan al emitir una señal de luz que de acuerdo a la posición en el espacio del sensor mide la velocidad que tarda en llegar a un objetivo en el suelo y regresar al sensor posicionado en el dron, es por ello que las aplicaciones en el manejo de recursos naturales de estos sensores van desde el tomar a detalle la biomasa de la vegetación así como auxiliar en la estratificación de las comunidades vegetales e incluso calcular volumen y diámetro de los fustes que integran los rodales (Figueiredo et. al., 2016).

Los sensores RGB que parte de las siglas Red, Green y Blue, son los que con mayor frecuencia se encuentran en la aplicación civil debido a su bajo costo y la capacidad de capturar imágenes similares a las que capta el ojo humano, estos depende de las capacidades, modelo y aplicación del sensor pueden ir de baja a muy alta resolución y regularmente son utilizados para realizar inspección de áreas de interés de difícil acceso, realizar modelos de elevación, conteo de plantas y para el monitoreo de superficies afectadas por incendios forestales (Pádua, 2017; Berrío, 2015).

Los avances tecnológicos en el uso de drones van desde un aumento en las capacidades de las baterías de vuelo hasta la aplicación de sensores específicos como aquellos que son capaces de detectar la presencia y cantidad de gases contaminantes o volátiles, sensores que miden la radiación y cantidad de energía en forma de calor liberada en una zona con actividad volcánica o de incendios forestales e incluso drones que permiten tomar con mayor precisión variables climáticas empleadas tanto en el manejo forestal y la prevención de desastres naturales (Basley et al.., 2013; Diaz et al., 2015).

Avances en inteligencia artificial aplicada al manejo de recursos forestales

La inteligencia artificial, particularmente mediante el aprendizaje automático (machine learning) y el aprendizaje profundo (deep learning), ha permitido automatizar la clasificación de uso de suelo, detectar cambios ambientales, identificar especies vegetales y estimar biomasa y carbono (Zhu et. al., 2017; Urquizo et al., 2024).

Algoritmos como Random Forest, Support Vector Machines (SVM) y redes neuronales convolucionales (CNN) se utilizan para analizar grandes volúmenes de imágenes captadas por drones, aumentando la precisión y velocidad del procesamiento de datos además de permitir el implementar modelos de simulación de mayor precisión (Deng et al., 2024).

El uso de algoritmos para procesar imágenes tomadas a partir de drones genera un enfoque innovador y promete una rápida respuesta reduciendo el tiempo entre la adquisición de datos y la clasificación de la información, por ello algoritmos probados en cuestiones forestales y agrícolas como random forest alcanzan hasta un 98% de probabilidad en las decisiones auxiliadas por el algoritmo (Dasipah et. al., 2024).

Aplicaciones en el Manejo de Recursos Forestales
Identificación de especies vegetales

El uso combinado entre las tecnologías VANT y las evaluaciones asistidas por IA cuenta con un gran número de casos de éxito que van desde la Identificación y clasificación de especies botánicas, el monitoreo de plantaciones forestales y detección de plagas, evaluación y caracterización de incendios forestales, monitoreo de humedad y salinidad de suelos, así como la delimitación de cuerpos de agua y zonas de riesgo.
Dentro de los estudios realizados para la clasificación de especies vegetales tenemos el de Tariku (2023) donde mediante la integración de imágenes capturadas con drones y aplicando tres de los modelos más conocidos de aprendizaje autónomo como son; Support Vector Machine (SVM), random forest (RF) y Extreme Gradient Boosting (XGBoost) lograron desarrollar un método útil para clasificar especies vegetales volando a baja altura para aumentar la resolución espacial de las imágenes y con ello la certeza de la información aprendida por el algoritmo (Tariku et al., 2024).

Monitoreo de plagas forestales

Otro campo experimentado que combina el uso de drones y de inteligencia artificial es el que se encarga de analizar plantaciones forestales y la detección de plagas, esto se ha logrado mediante imágenes de alta resolución que permiten la detección temprana de agentes patógenos y facilitan una intervención rápida que reduce el uso de pesticidas y la posibilidad de que se presenten brotes de gran magnitud (L. Pádua et.,al 2017).
Un claro ejemplo de estas aplicaciones es un modelo propuesto por Li y Wang, (2025) donde se utilizó un marco de selección cuya finalidad fue detectar objetos de forma robusta y segura para clasificar con mayor precisión las zonas de marchitamiento en coníferas que son el principal indicador visual ante la presencia de plagas y enfermedades.

Discusión

La integración de drones e inteligencia artificial representa una revolución en el monitoreo y manejo de recursos naturales, permitiendo una observación más frecuente, precisa y detallada que las técnicas tradicionales que marcan un cambio de paradigmas en la gestión sostenible de los recursos naturales brindando soluciones precisas, eficientes y automatizadas para resolver una gran cantidad de problemáticas ambientales (Agüera-Vega et al., 2024).

Los avances más marcados en el uso de VANT`s equipados con sensores multiespectrales combinados con algoritmos de aprendizaje autónomo celular son los que han permitido con mayor exactitud diferenciar especies vegetales en superficies con gran diversidad vegetal (Caballero-Martin et al., 2024).
Estudios como el de Tariku et al. (2023) y González-Dugo et al. (2013) han indicado el vigor de la utilización de las metodologías que se establecieron para la clasificación de especies en paisajes heterogéneos, mientras que Figueroa et al. (2022) enfatiza el valor para la generación de modelos predictivos lo cual es determinante en la toma de decisiones en planes para el manejo de conservación y restauración ecológica.
En cuanto al seguimiento de plantaciones forestales y la detección de plagas, la composición de VANT´s e IA ha facilitado la inspección en tiempo real de diferentes extensiones forestales, mostrando la detección de patrones anormales que están asociados con el estrés hídrico, infestaciones o enfermedades tempranas antes de que se encuentren visibles. Por su parte, García-Tejero et al. (2018) y Peña et al. (2015) realizaron el hallazgo de imágenes térmicas y multiespectrales que se obtuvieron con drones y que permiten la detección de síntomas anticipados de estrés hídrico y ataques de patógenos, posibilitando estrategias para el manejo forestal para la prevención y siendo menos dependientes del uso prolongado de agroquímicos. Estos resultados coinciden con lo señalado por Amoah-Nuamah et al. (2025), quienes destacan el papel de la IA en la vigilancia temprana de la salud de los bosques.
Con respecto a la valoración de incendios forestales, los sistemas basados en IA que se realizan con imágenes térmicas y son captadas en VANT`s brindan la capacidad de detectar anticipadamente con respecto a los métodos tradicionalmente usados. Estos sistemas no solo realizan la identificación de focos activos en etapas tempranas, sino que por otro lado permite el desarrollo de mapas en la extensión y dirección de la evolución del fuego, favoreciendo una respuesta táctica más eficiente. El trabajo de Zhang (2024) plantea los marcos analíticos con diferentes etapas para la evaluación de riesgo en incendios, mientras que otros estudios como los de Martínez-de Dios et al. (2019) y Figueiredo et al. (2020) han indicado el valor los VANTs para detección y vigilancia de incendios en tiempo real, optimizando la capacidad de réplica de las autoridades correspondientes.
En el seguimiento de humedad y salinidad del suelo se analiza que ha sido favorecido de manera significativa por el uso de imágenes multiespectrales y térmicas procesadas por medio de algoritmos de IA. Los métodos han permitido la detección de gradientes de humedad o acumulaciones salinas que han sido de gran afectación para la producción agrícola. Guan y Grote (2024) señalaron que la mezcla de

datos que se obtienen con los drones y sensores de campo garantizan la obtención de una estimación más específica del contenido de agua del suelo. De igual manera estudios como los de Castaldi et al. (2019) y Zhang et al. (2022) reafirman el papel de los VANT´s para la generación de modelos de humedad y salinidad con alta resolución espacial, esto resulta ser imprescindible para la elaboración de prácticas en el sector agrícola de manera precisa y la mitigación de la degradación del suelo.

Por último, el establecimiento de cuerpos de agua y zonas de riesgo mediante VANTs ha obtenido una relevancia de manera progresiva, esto en cuanto al contexto del ordenamiento territorial y gestión de desastres. Las imágenes de alta resolución que han sido analizadas con modelos de segmentación y clasificación autonómica han permitido el análisis de para identificación de cambios en los niveles de agua, esparcimiento de zonas de inundación y el establecimiento de áreas de riesgo hidrológico. Deng (2022) realizó un diseño de un sistema de clasificación multietapa que han permitido distinguir de manera más precisa los cuerpos de agua incluso en ambientes más complejos, mientras que otros estudios como los de Feng et al. (2021) y Liu et al. (2020) señalan el potencial de estas tecnologías en cuanto a la evaluación dinámica hidrológica y la anticipación de eventos extremos.

Conjuntamente estos casos están ligados ya que evidencian el uso en composición de las VANT`s e IA no solo acelera la eficacia de los procesos de evaluación ambiental, sino que también han sido de mejoría en la calidad de los datos almacenados y la rapidez al momento de tomar decisiones. Sin embargo, aún existen desafíos competentes y económicos que se relacionan con la escalabilidad, estandarización de técnicas y el acceso a estas tecnologías en territorios donde exista una limitación a métodos o presupuestarias. El prevalecer estas barreras será de gran importancia para asegurar una aceptación más extensa e imparcial, esto en especial en los países megadiversos que afrontan opresiones en cuestiones ambientales de manera progresiva (Tmušić et al., 2020; Gebreslasie, 2021). A ello se suman las restricciones regulatorias, la limitada capacidad de carga útil de los equipos y la complejidad del procesamiento de datos (Mishra y Rai, 2021). Asimismo, la información obtenida con drones e IA no sustituye por completo los datos de campo, que siguen siendo indispensables para calibrar y validar los modelos (Sharma et al., 2024).

Conclusiones

La combinación de vehículos aéreos no tripulados e inteligencia artificial constituye una herramienta poderosa para el manejo de recursos naturales. Las posibilidades de aplicación son amplias y continúan expandiéndose a medida que la tecnología avanza. No obstante, es necesario impulsar investigaciones que aborden las limitaciones actuales, fomentar la formación de recursos humanos especializados y promover marcos regulatorios que faciliten el despliegue seguro y ético de estas tecnologías.

La implementación de nuevas técnicas y procesos relacionados con el uso de VANT´s y de técnicas de análisis asistidas por IA prometen una reestructuración en como se gestionan los recursos naturales, principalmente acelerando los tiempos de análisis y la precisión con la que se adquieren y evalúan los datos obtenidos.

Ante un mundo cambiante y cada vez más inmerso en las aplicaciones de elementos digitales y tecnológicos que facilitan al ser humano las actividades del quehacer diario, que se concentren esfuerzos entre el uso de las nuevas tecnologías y diversos ejes temáticos relacionados con el medio ambiente cómo son el manejo de recursos, la conservación de la biodiversidad y la restauración de ecosistemas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a todos los colaboradores que contribuyeron en la elaboración de este trabajo, así como a las instituciones que participaron por las facilidades otorgadas para su desarrollo.

Literatura citada

- Addati, G. A., & Pérez Lance, G. (2014). *Introducción a los UAV's, Drones o VANTs de uso civil*. https://hdl.handle.net/10419/130802
- Agüera-Vega, F., Ferrer-González, E., Martínez-Carricondo, P., SánchezHermosilla, J., & Carvajal-Ramírez, F. (2024). Influence of the Inclusion of Off-Nadir Images on UAV-Photogrammetry Projects from Nadir Images and AGL (Above Ground Level) or AMSL (Above Mean Sea Level) *Flights. Drones, 8*(11). https://doi.org/10.3390/drones8110662
- Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., & Martínez-Carricondo, P. (2020). Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. *Measurement, 149*, 107008
- Amoah-Nuamah, J., Child, B., Okyere, E. Y., Adams, O., & Danquah, J. A. (2025). Applications of artificial intelligence in forest health surveillance and management. *Discover Forests, 1*(1), 56. https://doi.org/10.1007/s44415-025-00061-w
- Aziz, A., Khan, A. W., Khan, L., & Jan, A. (2026). Integration of artificial intelligence and geographic information systems for natural resource management. *Research Consortium Archive, 4(*2), 1245–1263.
- Balsley, B., Lawrence, D., Woodman, R., & Fritts, D. (2013). Fine-scale characteristics of temperature, wind, and turbulence in the lower atmosphere (0–1300 m) over the south Peruvian coast. *Boundary-Layer Meteorology, 147*(1), 165–178.
- Banu, T. P., Borlea, G. F., & Banu, C. (2016). The use of drones in forestry. *Journal of Environmental Science and Engineering B, 5*(11). https://doi.org/10.17265/2162-5263/2016.11.007
- Berrío, V. A., Mosquera, J., & Alzate, D. F. (2015). Uso de drones para el análisis de imágenes multiespectrales en agricultura de precisión. @ limentech, *Ciencia y Tecnología Alimentaria, 13*(1).
- Caballero-Martin, D., Lopez-Guede, J. M., Estevez, J., & Graña, M. (2024). Artificial Intelligence Applied to Drone Control: A State of the Art. *In Drones, 8*(7), Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/drones8070296
- Capolupo, A., Pindozzi, S., Okello, C., Fiorentino, N., & Boccia, L. (2015). Photogrammetry for environmental monitoring: The use of drones and hydrological models for detection of soil contaminated by copper. *Science of the Total Environment, 514*, 298-306.
- Castaldi, F., Pascucci, S., Casa, R., & Palombo, A. (2019). Suitability of hyperspectral VIS–NIR and thermal remote sensing for estimating soil water content: Preliminary results. *Sensors, 19*(2), 406.
- Dasipah, E., Akbari, G. F., Syafei, N. S., Turnip, A., Le Hoa, N., & Sitompul, E. (2024, February). Autonomous drone technology based random forest classifier for revolutionizing agriculture. In 2024 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Mechatronics Systems (AIMS) (pp. 1-5). IEEE.
- Díaz, J. A., Pieri, D., Wright, K., Sorensen, P., Kline-Shoder, R., Arkin, R., Fladeland, M., Bland, G., Ramírez, C., Corrales, E., Alan, A., & Alegría, O. (2015). Unmanned aerial mass spectrometer system for in-situ volcanic plume analysis. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry, 26*(2), 292–304.
- Deng, Y. (2022). *Reliable detection of water areas in multispectral drone imagery. DiVA Portal*. https://www.divaportal.org/smash/get/diva2:1749935/FULLTEXT01.pdf
- Deng, H., Zhang, W., Zheng, X., & Zhang, H. (2024). Crop Classification Combining Object-Oriented Method and Random Forest Model Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV). Multispectral Image. *Agriculture (Switzerland), 14*(4). https://doi.org/10.3390/agriculture14040548
- Feng, Q., Liu, J., & Gong, J. (2021). UAV remote sensing for urban vegetation mapping using random forest and texture analysis. *Remote Sensing, 13*(1), 33.
- Figueiredo, E., Gonçalves, J. A., & Monteiro, A. (2020). Forest fire detection and monitoring using drones. Sustainability, 12(20), 8361.
- Figueroa, D., Ramírez, C., & Rosas, M. (2022). Deep learning for plant species classification in a highly diverse tropical environment. *Ecological Informatics, 70,* 101720.
- Figueiredo, E. O., d'Oliveira, M. V. N., Braz, E. M., de Almeida Papa, D., & Fearnside, P. M. (2016). LIDAR-based estimation of bole biomass for precision management of an Amazonian forest: Comparisons of ground-based and remotely sensed estimates. *Remote Sensing of Environment, 187*, 281-293.
- García-Tejero, I., Durán-Zuazo, V. H., Muriel-Fernández, J. L., & JiménezBocanegra, J. A. (2018). Applying UAV-based thermal and multispectral imagery in precision agriculture: Wheat crop water stress detection. *Remote Sensing, 10*(9), 1403.
- Gebreslasie, M. T. (2021). Remote sensing applications in environmental management: A review. *Environmental Monitoring and Assessment, 193*(2).
- González-Dugo, M. P., Zarco-Tejada, P. J., Nicolás, E., Nortes, P. A., Alarcón, J. J., Intrigliolo, D. S., & Fereres, E. (2013). Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard. *Precision Agriculture, 14*, 660–678.

- Guevara-Bonilla, M., Meza-Leandro, A. S., Esquivel-Segura, E. A., Arias-Aguilar, D., Tapia-Arenas, A., & Masís Meléndez, F. (2020). Uso de vehículos aéreos no tripulados (VANTs) para el monitoreo y manejo de los recursos naturales: una síntesis. *Revista Tecnología en Marcha*. https://doi.org/10.18845/tm.v33i4.4528
- Guevara-Bonilla, M., Ortiz-Malavasi, E., Hernández-Cole, J., & VillalobosBarquero, V. (2023). Unmanned Aerial Vehicles to Monitor the Nutritional and Phytosanitary Status of Forest Crops. *Colombia Forestal, 26*(1), 123–133. https://doi.org/10.14483/2256201X.19250
- Guan, Y., & Grote, K. (2024). Assessing the potential of UAV-based multispectral and thermal data to estimate soil water content using geophysical methods. *Remote Sensing, 16*(1), 61.
- Gutiérrez-Barrientos, M., Buendía-Rodríguez, E., Alanís-Rodríguez, E., & MarínSolís, J. D. (2022). Evaluación de una restauración mediante dron en el matorral espinoso tamaulipeco. *Polibotánica, 0*(54). https://doi.org/10.18387/polibotanica.54.5
- Hardin, P., & Jensen, R. (2011). Introducción — Sistemas aéreos no tripulados a pequeña escala para la teledetección ambiental. *GIScience & Remote Sensing, 48*, 1–3
- Jones, J., Harris, E., Febriansah, Y., Adiwijaya, A., & Hikam, I. N. (2024). AI for sustainable development: Applications in natural resource management, agriculture, and waste management. *International Transactions on Artificial Intelligence, 2*(2), 143–149. https://doi.org/10.33050/italic.v2i2.549
- Kedia, A. C., Kapos, B., Liao, S., Draper, J., Eddinger, J., Updike, C., & Frazier, A. E. (2021). An integrated spectral–structural workflow for invasive vegetation mapping in an arid region using drones. *Drones, 5*(1). https://doi.org/10.3390/DRONES5010019
- Li, X., & Wang, A. (2025). Forest pest monitoring and early warning using UAV remote sensing and computer vision techniques. *Scientific Reports, 15*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-024-84464-3
- Li, X., & Wang, A. (2024). Forest pest monitoring and early warning using UAV remote sensing and computer vision techniques. *Scientific Reports, 14*, 84464.
- Liu, Z., Lin, H., & Zhang, Y. (2020). Dynamic flood mapping using unmanned aerial vehicles (UAVs) and hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences, 24*(5), 2481–2498.
- Madridano, A., Campos, S., Al-Ka, A., Garcia, F., Martin, D., & Escalera, A. (2020). Unmanned aerial vehicle for fire surveillance and monitoring. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial, 17*(3), 254–263. https://doi.org/10.4995/RIAI.2020.11806
- Martínez-de Dios, J. R., Merino, L., & Ollero, A. (2019). Automatic forest-fire measuring using ground stations and unmanned aerial systems. *Sensors, 19*(22), 4828.
- Mishra, P. K., & Rai, A. (2021). Role of unmanned aerial systems for natural resource management. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 49*(3), 671–679. https://doi.org/10.1007/s12524-020-01230-4
- Ojeda Bustamante, W., Flores, J., Ronald, V., & Ontiveros Capurata, E. (2016). *Uso y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico*. www.gob.mx/imta
- Pádua, L., Vanko, J., Hruška, J., Adão, T., Sousa, J. J., Peres, E., & Sousa, A. (2017). UAS, sensors, and data processing in agroforestry: A review towards practical applications. *International Journal of Remote Sensing, 38*(8-10), 2349–2391.
- 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), 2349–2392.
- Peña, J. M., Torres-Sánchez, J., Serrano-Pérez, A., de Castro, A. I., & LópezGranados, F. (2015). Quantifying efficacy and limits of unmanned aerial vehicle (UAV) technology for weed seedling detection as affected by sensor resolution. *Sensors, 15*(3), 5609–5626.
- Richards, J. A., & Jia, X. (2006). *Remote Sensing Digital Image Analysis.* Springer-Verlag.
- Sani, J. C., Tierra Criollo, R., & Robayo, A. (2015). *Vehículos aéreos no tripuladosUAV para la elaboración de cartografías escalas grandes referidas al marco de referencia SIRGAS-Ecuador*. X Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE 2015.
- Schaeffer, S. E., Jiménez-Lizárraga, M., Rodriguez-Sanchez, S. V., CuellarRodríguez, G., Aguirre-Calderón, O. A., Reyna-González, A. M., & Escobar, A. (2021). Detection of bark beetle infestation in drone imagery via thresholding cellular automata. *Journal of Applied Remote Sensing, 15*(1), 016518-016518.
- Shah, I. A. (2024). *Drone industry security issues and challenges in the context of IoD. In Cybersecurity Issues and Challenges in the Drone Industry* (pp. 310–323). IGI Global. https://doi.org/10.4018/979-8-3693-0774-8.ch012
- Sharma, S., Beslity, J. O., Rustad, L., Shelby, L. J., Manos, P. T., Khanal, P., ... & Khanal, C. (2024). Remote sensing and GIS in natural resource management: Comparing tools and emphasizing the importance of in-situ data. *Remote Sensing, 16*(22), 4161. https://doi.org/10.3390/rs16224161

- Stehr, N. (2015). Drones: The newest technology for precision agriculture. *Natural Sciences Education, 44*(1), 89–91.
- Tang, L., & Shao, G. (2015a). Drone remote sensing for forestry research and practices. *Journal of Forestry Research, 26*(4), 791–797. Northeast Forestry University. https://doi.org/10.1007/s11676-015-0088-y
- Tariku, G., Ghiglieno, I., Simonetto, A., Gentilin, F., Armiraglio, S., Gilioli, G., & Serina, I. (2024). Advanced Image Preprocessing and Integrated Modeling for UAV Plant Image Classification. *Drones, 8*(11). https://doi.org/10.3390/drones8110645
- Tariku, G., Ghiglieno, I., Gilioli, G., Gentilin, F., Armiraglio, S., & Serina, I. (2023). Automated identification and classification of plant species in heterogeneous plant areas using UAV-collected RGB images and transfer learning. *Drones, 7*(10), 599.
- Tmušić, G., Manfreda, S., Aasen, H., James, M. R., Gonçalves, G., Ben-Dor, E., ... & McCabe, M. F. (2020). Current practices in UAS-based environmental monitoring. *Remote Sensing, 12*(6), 1001.
- Urquizo, J., Ccopi, D., Ortega, K., Castañeda, I., Patricio, S., Passuni, J., Figueroa, D., Enriquez, L., Ore, Z., & Pizarro, S. (2024). Estimation of Forage Biomass in Oat (Avena sativa) Using Agronomic Variables through UAV Multispectral Imaging. *Remote Sensing, 16*(19). https://doi.org/10.3390/rs16193720
- Wang, T., Zuo, Y., Manda, T., Hwarari, D., & Yang, L. (2025). Harnessing artificial intelligence, machine learning and deep learning for sustainable forestry management and conservation: Transformative potential and future perspectives. *Plants, 14*(7), 998. https://doi.org/10.3390/plants14070998
- Zhang, J. (2024). *Enhancing tree type detection in forest fire risk assessment: Multi-stage approach and color encoding with forest fire risk evaluation framework for UAV imagery*. arXiv preprint arXiv:2407.19184.
- Zhang, W., Li, M., & Wang, Y. (2022). UAV-based estimation of soil salinity using hyperspectral imagery and machine learning. *Geoderma, 413*, 115730.
- Zhu, X. X., Tuia, D., Mou, L., Xia, G. S., Zhang, L., Xu, F., & Fraundorfer, F. (2017). Deep learning in remote sensing: A comprehensive review and list of resources. *IEEE geoscience and remote sensing magazine, 5*(4), 8-36.