

Estimación y caracterización de la cobertura vegetal basado en las aplicaciones de las aeronaves no tripuladas UAS

L. C. Ordoñez – Vanegas¹ & I. D. Pedraza – Torres²

¹Facultad de Ingeniería Ambiental / Universidad Santo Tomas, Bogotá D.C / 2023

Resumen

En la actualidad, diversos estudios demuestran la eficacia de las aeronaves no tripuladas (UAS) en la estimación y caracterización de la cobertura vegetal, puesto que estas herramientas permiten la obtención de datos precisos a diferentes escalas espaciales y temporales, lo que las convierte en una valiosa herramienta para la monitorización de la vegetación. En este sentido, el propósito de esta investigación es destacar la importancia de los UAV en estudios ambientales, así como su desarrollo y avances en los últimos años. La metodología de estudio se basó en un análisis de correlación de palabras clave, países y años, a través de VOSviewer y bibliometrix, usando bases de datos como Scopus y ScienceDirect, y se centró en enfoques de aplicación, como la identificación y caracterización de la cobertura vegetal y sus especies mediante la captura de imágenes multiespectrales y el uso de inteligencia artificial con UAV. Con base en lo anterior, se encontró una correlación general de palabras clave que se enfocan en aplicaciones de UAV, como aprendizaje automático, sensores remotos y árboles de decisión. También se analizaron las marcas líderes en la suministración de tecnología, incluyendo cámaras, aeronaves y sensores utilizados, así como los modelos más frecuentemente empleados en los estudios revisados para analizar la tendencia del mercado en este campo tecnológico.

Palabras claves: Vehículos aéreos no tripulados, imágenes multiespectrales, cobertura vegetal, aprendizaje automático, inteligencia artificial.

Abstract

Currently, several studies demonstrate the effectiveness of unmanned aerial vehicles (UAS) in the estimation and characterization of vegetation cover, since these tools allow obtaining accurate data at different spatial and temporal scales, which makes them a valuable tool for vegetation monitoring. In this sense, the purpose of this research is to highlight the importance of UAVs in environmental studies, as well as their development and advances in recent years. The study methodology was based on a correlation analysis of keywords, countries and years, through VOSviewer and bibliometrix, using databases such as Scopus and ScienceDirect, and focused on application approaches, such as the identification and characterization of vegetation cover and its species through the capture of multispectral images and the use of artificial intelligence with UAVs. Based on the above, a general correlation of keywords focusing on UAV applications, such as machine learning, remote sensing and decision trees, was found. The leading brands in the supply of technology, including cameras, aircraft and sensors used, as well as the most frequently used models in the reviewed studies were also analyzed to analyze the market trend in this technological field.

Key words: Unmanned aerial vehicles, multispectral imagery, vegetation cover, machine learning, artificial intelligence.

Introducción

Los vehículos aéreos no tripulados, denominados por sus siglas en inglés UAV (unmanned aerial vehicle), conocidos comúnmente como drones, son aeronaves que funcionan sin un piloto a bordo y cuentan con un diseño aerodinámico que les permite mantener una altura de vuelo regulada y continua mediante un software autónomo o un control remoto. Aunque inicialmente desarrollados por la industria armamentística únicamente para su uso en topografía, con el fin de brindar mayor cubrimiento en el área (Aragón *et al.*, 2021), actualmente se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, como búsqueda y rescate, agricultura, exploración de recursos naturales, telecomunicaciones e inspección de líneas eléctricas, entre otros (Pinzón *et al.*, 2016).

En este contexto, las aeronaves no tripuladas (UAV) se han convertido en una herramienta valiosa para la estimación y caracterización rápida y eficiente de la cobertura vegetal en diversos contextos. Esto se debe a que estas aeronaves pueden llevar a cabo diversas tareas a través de sus complementos, como sensores o cámaras, entre los que destaca la fotografía aérea. Con ella, es posible generar ortofotomosaicos georreferenciados del área de los proyectos de obra o actividades, lo que permite inferir información sobre la abundancia vegetal, dinámica de la población de plantas, conservación ecológica, vegetación acuática, mapeo de vegetación, entre otros. Además, mediante la obtención de imágenes satelitales en estudios de pequeña a mediana escala, es posible obtener información sobre la cobertura boscosa, expansión urbana, índices de vegetación de proporciones estandarizadas, cambio de coberturas vegetales y deforestación. En este sentido, los UAV y las técnicas que se utilizan en combinación con ellos ofrecen un gran potencial para el monitoreo y estudio de la cobertura vegetal en diferentes escalas y contextos (Gutiérrez-Alonso, 2016). Los UAV son herramientas fundamentales para el monitoreo de la vegetación gracias a su capacidad de desplegarse de manera rápida y repetida, así como de volar a bajas altitudes. Estas ventajas las hacen ideales para su uso en estudios de vegetación, como ha señalado Cuervo (2020). De hecho, el monitoreo de la cobertura vegetal es una tarea fundamental para los gestores del medio ambiente, porque esta variable es esencial para la salud del ecosistema y el bienestar humano al proporcionar servicios ecosistémicos críticos como la purificación del aire y el agua, la conservación de la biodiversidad y la regulación del clima. En este sentido, las UAV son equipos clave para la gestión y conservación de los ecosistemas terrestres, permitiendo la caracterización y estimación de la cobertura vegetal de manera más precisa y eficiente.

La cobertura vegetal es un factor crucial para el correcto funcionamiento de los ecosistemas terrestres, debido a que su presencia y tipo tienen un impacto directo en la calidad de los hábitats naturales y pueden servir como indicadores del impacto de la actividad humana en el medio ambiente. En este sentido, esta revisión tiene como finalidad recopilar y analizar información sobre las diversas aplicaciones de aeronaves no tripuladas (UAV) para la estimación y caracterización rápida y eficiente de la cobertura vegetal. En particular, se discutirán las diferentes herramientas tecnológicas y métodos empleados para esta tarea, así como sus limitaciones y posibles aplicaciones. Asimismo, se explorará el potencial de la tecnología UAV para la gestión y conservación de los ecosistemas y su biodiversidad.

Materiales y métodos

Este estudio fue posible mediante la búsqueda de artículos de revisión en los cuales se identificaron los temas más amplios y relevantes, con el fin de comprender el alcance y la importancia de la gestión al implementar las aeronaves no tripuladas en este tipo de estudios y proyectos.

Por lo tanto, fue fundamental llevar a cabo las siguientes etapas: (1) establecer una estrategia de la búsqueda donde se tengan en cuenta los criterios para la selección de la literatura que se implementará en el avance del artículo; (2) Recopilar información literaria nacional e internacional; (3) Clasificar los documentos de investigación compilados, a los cuales se les realizará su respectiva depuración teniendo en cuenta los parámetros previamente establecidos para la selección de los mismos y finalmente, con los tipos de análisis se estudian los resultados obtenidos en cada uno de los artículos.

Estrategia de investigación para la selección y revisión de la literatura

Para el desarrollo del artículo de revisión fue necesario una estrategia de investigación, donde una vez seleccionada la base de datos, se eligen las palabras claves las cuales, se enfocan en los campos de cobertura vegetal que es analizada con vehículos aéreos no tripulados (UAV) equipados con sensores capaces de extraer imágenes multiespectrales las cuales se procesan con modelos de inteligencia artificial; allí se encuentran investigaciones experimentales que cumplen con los criterios de búsqueda y elección de la literatura que se han establecido, así como se describe en la Tabla 1.

Recopilación de información literaria

Durante la investigación se realizó una revisión sistemática de las aplicaciones existentes de las aeronaves no tripuladas en todo el mundo, mediante la lectura de resúmenes de diferentes estudios como artículos de investigación y tesis. Para ello se escogieron un total de 350 artículos de investigación disponibles sobre el tema, siendo seleccionados y repartidos por enfoques, por lo que no fue necesario hacer una revisión individual de cada artículo para lo cual se tuvo en cuenta publicaciones disponibles de los últimos 4 años (2018-2022) como limitación temporal y finalmente, se eliminó la literatura que no cumpliera con los criterios de la revisión y que no fuera acorde a los datos que se iban a analizar; debido a que se tenía como objetivo: identificar únicamente aplicaciones para la estimación y caracterización de la cobertura vegetal mediante diferentes métodos tecnológicos por parte de los UAV.

Clasificación y análisis de artículos seleccionados

Después de realizar la búsqueda de información en las bases de datos, se leyeron los documentos para identificar si aplican, según los criterios de inclusión y exclusión mencionados en la tabla 1 y así mismo hacer la comparación pertinente con el fin de analizar los avances que han surgido de estas tecnologías y las eficiencias que estas mostraban en los estudios realizados. Finalmente, se utilizaron los Software VOSviewer y bibliometrix para el análisis de metadatos de la base de datos Scopus, siendo seleccionados y exportados los respectivos artículos como archivo en formato RIS y BibTex, para que posteriormente se puedan estudiar los resultados

con tres tipos de análisis el primero co-ocurrencia usando como unidad de análisis todas las “palabras claves”. Para el segundo y tercer análisis el tipo de análisis fue mediante la herramienta de bibliometrix determinando las publicaciones por países y por año. Para el resto de la revisión empleada en la recopilación de la información se realizó un análisis utilizando diversas bases de datos incluyendo ScienceDirect, Google académico, entre otras.

Tabla 1. Aspectos para identificar la literatura empleada en el presente artículo

Base de datos	Palabras clave y ecuación utilizadas en la búsqueda	Criterios de inclusión y exclusión
		Fecha: Últimos 4 años (2018 -2022)
		Tipos de publicación: Artículos, revisiones y tesis
Scopus	("Multispectral imaging" OR "drones" OR "UAV" AND "vegetation cover" OR "vegetación")	Idioma: inglés
ScienceDirect	("vegetation cover" OR "vegetation" OR "trees" OR "plants" AND "machine learning" OR "IA" OR "artificial intelligence" AND "drones" OR "UAV")	Objetivo de las publicaciones: El principal objetivo de la publicación es identificar únicamente las investigaciones experimentales, en las cuales se evidenciaron las aplicaciones existentes de los UAV en estudios de cobertura vegetal.

Fuente: Autores

Resultados y discusiones

Siguiendo el marco metodológico descrito anteriormente, se encontraron trabajos científicos, artículos académicos y demás relacionados con las aplicaciones de los vehículos aéreos no tripulados (UAV) para proporcionar soluciones que facilitan el monitoreo de la vegetación. A través de la revisión bibliográfica, en estos se identificaron los principales métodos utilizados para la estimación y caracterización de la cobertura vegetal. Por lo tanto, se incluyen dos enfoques en la búsqueda: la identificación de la cobertura vegetal mediante la captura de imágenes multiespectrales con UAV y la caracterización de especies de la cobertura vegetal mediante el uso de inteligencia artificial con UAV. A continuación, se muestran los resultados obtenidos y analizados en cada uno de los casos.

1. Identificación de la cobertura vegetal mediante la captura de imágenes multiespectrales con vehículos aéreos no tripulados

La cobertura vegetal es un aspecto fundamental del medio ambiente que puede ser utilizada para evaluar la salud y la diversidad de los ecosistemas, así como para monitorear y gestionar la producción en diferentes ámbitos de la agricultura. Tradicionalmente, la identificación de la cobertura vegetal se ha realizado a través de muestreo en campo y análisis de imágenes satelitales. Sin embargo, en los últimos años, la tecnología de los vehículos aéreos no tripulados (UAV) ha permitido el transporte de cámaras o sensores que capturan imágenes con una mayor precisión y resolución de la superficie terrestre, además de la combinación de imágenes de alta resolución y la capacidad de volar a diferentes altitudes, permitiendo una mayor precisión en la identificación de la cobertura vegetal (Rivera *et al.*, 2021).

Por lo tanto, la captura de imágenes multiespectrales mediante UAV se ha convertido en una herramienta valiosa para la investigación de la vegetación. Con esta técnica, es posible obtener información detallada sobre las características físicas y ambientales que van desde los pastizales hasta las áreas cubiertas por bosques naturales, lo que permite una evaluación precisa en una escala local. La recolección de datos es un proceso clave en este método, debido a que proporciona información valiosa sobre la cobertura vegetal.

Por lo general, en los estudios realizados para la identificación de cobertura vegetal mediante el método de captura de imágenes multiespectrales se utilizan comúnmente drones (RPAS) de tipo ala fija y ala rotatoria, implementando sensores con cuatro bandas y una resolución de 10 cm para mayor precisión. En cuanto a las cámaras, son utilizadas con mayor frecuencia las Canon S100, modificadas para tomar fotografías RGB y NIR, para posteriormente aplicar el índice NDVI (solo a la imagen NIR), el cual permite identificar el nivel de estrés y la posible presencia de enfermedades y/o problemas de desarrollo en cualquier tipo de cultivo (Pérez Izquierdo, 2020).

Debido a la importancia de explorar en este tema se realiza un análisis de correlación entre palabras claves, donde se obtuvieron un total de 20 palabras las cuales se presentan con mayor coincidencia en los 161 artículos seleccionados. Las primeras 10 palabras que se presentaban con mayor frecuencia fueron: Vehículo aéreo no tripulado (uav), antenas, vegetación, sensores remotos, cobertura vegetal, uav, vehículo no tripulado, forestal, índice de vegetación y cobertura vegetal fraccionada como se observa en las figuras 1 y 2 las cuales ilustran las palabras claves con mayor coincidencia. Por otro lado, los temas con mayor índice de estudios realizados en la actualidad y los cuales guiarán las nuevas tendencias de investigación corresponden a una correlación de palabras clave como: aprendizaje automático y árboles de decisión.

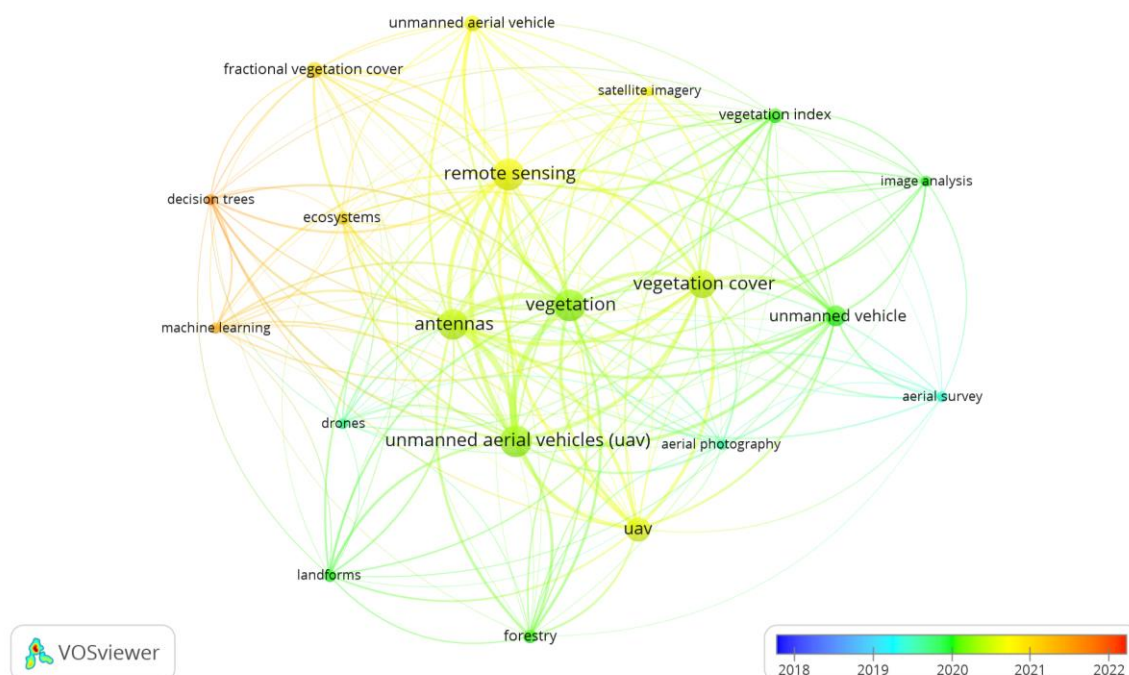
El análisis de la figura 1 muestra la correlación de los estudios de imágenes multiespectrales, siendo machine learning, decision trees y unmanned aerial vehicle (UAV) los más estudiados. De acuerdo con un estudio desarrollado en China, se exploró la posibilidad de estimar el contenido de clorofila en cultivos de papa a partir de imágenes multiespectrales tomadas por vehículos aéreos no tripulados (UAV). Se realizaron tres partes de investigación para encontrar el método de estimación óptimo. En la primera parte, se propuso una combinación de máquinas

de soporte vectorial (SVM) y un método de umbral del modelo de mezcla gaussiana (GMM) para estimar la cobertura vegetal fraccional (FVC). En la segunda parte, se utilizó el algoritmo de eliminación recursiva de características (RFE) para filtrar los índices de vegetación y características de textura de las imágenes multispectrales. En la tercera parte, se construyó un modelo de apilamiento con K-Nearest Neighbor (KNN), una máquina de aumento de gradiente de luz (light-GBM), el algoritmo SVM y cuatro algoritmos de aprendizaje automático, en este se evidencia que las imágenes multispectrales de UAV tienen un gran potencial de aplicación para la estimación precisa, rápida y económica del contenido de clorofila implementando el método de aprendizaje automático previamente programado (Yang *et al.*, 2022).

De la misma manera, en China, destacan la importancia de estimar la cobertura vegetal fraccional (FVC), el cual es un indicador de los cambios que se presentan a lo largo de los años en el ecosistema. Allí se utilizaron datos RGB de alta resolución y métodos de clasificación basados en aprendizaje automático para clasificar y estimar la cobertura vegetal de especies específicas en regiones desérticas en dos períodos (2006 y 2019), donde se estimó la cobertura vegetal fraccional. Se utilizaron tres algoritmos de aprendizaje automático para clasificar la vegetación principal y calcular la cobertura evaluando la precisión con un conjunto de datos independientes. El algoritmo de bosque probablemente prescindió de los resultados de clasificación en 2006, mientras que el algoritmo de k-vecino más cercano precedió los mejores resultados en 2019 para la clasificación de la cubierta vegetal. En conclusión, el estudio muestra que las imágenes RGB son adecuadas para mapear la FVC y sugieren que la determinación de la mejor resolución espacial para diferentes características de la vegetación podría mejorar la precisión de la estimación de la cobertura de vegetación del desierto (Xie *et al.*, 2022).

Al comparar con otros países, se evidencia cómo el Gobierno de Dubái también está adoptando nuevas tecnologías para aumentar la productividad y la eficiencia de la agricultura sostenible. Para ello, están utilizando vehículos aéreos no tripulados (UAV) equipados con sensores remotos para mapear las áreas agrícolas en todo el Emirato y crear una base de datos precisa. En este estudio, los métodos de detección se aplicaron a imágenes de alta resolución obtenidas por UAV y se utilizaron herramientas avanzadas de geoprocusamiento para analizar y mejorar los resultados, con el fin de detectar cultivos individuales. Los resultados muestran que los algoritmos de aprendizaje profundo pueden ser una solución para el mapeo agrícola sostenible a gran escala y brindar información útil para medir y evaluar la cubierta vegetal derivada de las imágenes procesadas (El Hoummaidi *et al.*, 2021); es decir que estas aeronaves junto con sensores son los más utilizados actualmente en temas de agricultura como se puede evidenciar en diferentes estudios; de acuerdo a lo anterior se evidencian como las palabras clave más destacadas (ver figura 1).

Figura 1. Correlación entre palabras clave



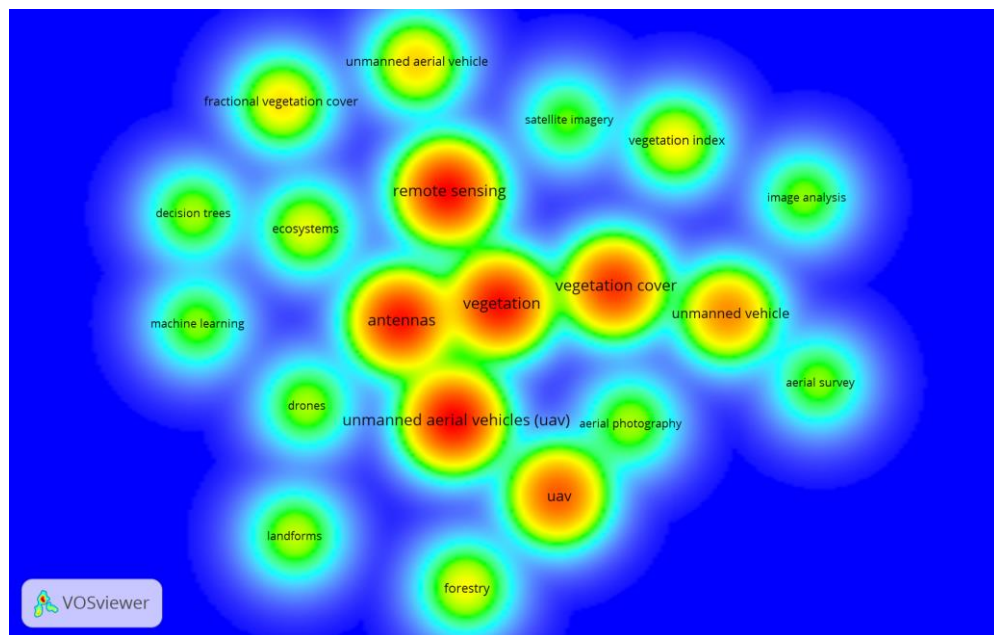
Nota. El gráfico representa la correlación de palabras clave. Fuente: Elaboración propia

En cuanto al mapa bibliométrico de densidad (ver figura 2), se muestra en color rojo su significativa centralidad y co-ocurrencia de las palabras clave pertenecientes a las líneas de investigación consolidados en temas de vehículos aéreos no tripulados (UAV) y sus diferentes aplicativos para la estimación y caracterización de la cobertura vegetal, esto mediante antenas de sensores remotos para obtener imágenes satelitales. Los términos utilizados con mayor frecuencia se ven reflejados en este tema central, así mismo como las palabras con menor intensidad en su uso, las cuales son complementarias al tema de interés y se encuentran en la zona periférica del mapa de color próximo al verde, como podemos evidenciar es en estudios donde el uso creciente de vehículos aéreos no tripulados (UAV) equipados con cámaras multiespectrales de alta resolución en la planificación urbana, la gestión del paisaje y la vigilancia medioambiental.

Por esta razón, la información sobre la vegetación urbana obtenida a través de estos UAV se utiliza como un complemento importante a los sistemas tradicionales de teledetección por satélite; por ello en proyectos de regeneración urbana que es un tema que va en aumento en Corea, se adquieren imágenes multiespectrales utilizando un UAV para analizar índices de vegetación, utilizando una cámara Micasense RedEdge MX para adquirir imágenes multiespectrales y se analizaron varios índices de vegetación existentes. Sin embargo, se encontró que los valores del índice de vegetación de los techos de acero de larga duración, los techos revestidos a prueba de agua y las áreas revestidas con uretano son similares o ligeramente superiores a los de la hierba, lo que llevó a la clasificación errónea de la vegetación. Para resolver este problema, se probaron varias ecuaciones combinando bandas multiespectrales, y se encontró que el índice NDVI Rojo-Azul al cuadrado produjo los mejores resultados al analizar la vegetación que refleja la cobertura del suelo urbano. El estudio muestra la

importancia de los UAV y las imágenes multiespectrales en la planificación urbana y la gestión del paisaje (Lee *et al.*, 2021).

Figura 2. Densidad de correlación entre palabras clave



Nota. El gráfico representa la densidad y correlación de palabras clave. Fuente: Elaboración propia

En relación a lo anterior, los UAV resultan ser una herramienta útil con gran potencial para el mapeo de vegetación en áreas urbanas complejas, mediante la teledetección, gracias a las imágenes de ultra alta resolución adquiridas a bajas altitudes. Para llevar a cabo dicho estudio se propone un método híbrido utilizando Random Forest y análisis de textura, el cual consta de 200 árboles de decisión para la respectiva clasificación con precisión de las áreas de suelo urbanas con vegetación. Los resultados demuestran que este método tiene un buen desempeño en la diferenciación de la vegetación y sugiere que los UAV son una plataforma adecuada y eficiente para la cartografía de la vegetación en áreas urbanas y que el método híbrido propuesto muestra un buen desempeño en la diferenciación de la vegetación (Feng *et al.*, 2018).

Finalmente con el estudio realizado en China se destaca la importancia de indagar más acerca de las aplicaciones de los UAV utilizando imágenes multiespectrales en zonas urbanas; en este se evidencia el interés por parte de las zonas residenciales de medir el estado de la vegetación, debido a que es determinante para la salud mental de los residentes a través del efecto visual, para medir el estado de la vegetación, se utilizan imágenes aéreas de UAV que proporcionan una alta definición y gran escala. El estudio se enfocó en 701 barrios residenciales de Beijing, como objetos de investigación, en este se hicieron mediciones de la cobertura vegetal para comparar cuantitativamente con el patrón de distribución espacial de la vegetación en diferentes superficies terrestres, donde se evidencia que la utilización del método de las imágenes aéreas con vehículos aéreos no tripulados puede detectar efectivamente el límite del área de cobertura vegetal y también resultan ser más valiosas en la planificación y gestión del suelo urbano (Zhao *et al.*, 2022).

En las tablas 2 y 3 se pueden observar las referencias de las aeronaves, así como los sensores y cámaras utilizados en distintos estudios. De las tablas se desprende que el Phantom 4 es el dron más empleado para realizar monitoreos e identificación de cobertura vegetal mediante imágenes multiespectrales. La razón detrás de su alta precisión en labores de agricultura de precisión y gestión del medio ambiente se debe a su sensor multiespectral. Este sensor proporciona imágenes detalladas que son cruciales para la medición de índices de vegetación, lo que facilita la toma de decisiones informadas en la gestión del suelo y la preservación del medio ambiente. Además, este dron dispone de un sistema de evasión de obstáculos que brinda un mayor control durante el vuelo.

Por otro lado, la evaluación de la vegetación requiere la consideración de diversos índices, incluyendo el índice de área foliar (LAI), la intensidad del color verde de la hoja, la altura, el contenido de clorofila y agua, entre otros. Además, es importante analizar las diferencias entre las firmas espectrales de la vegetación sana y la que se encuentra bajo estrés (Kharuf-Gutierrez *et al.*, 2018).

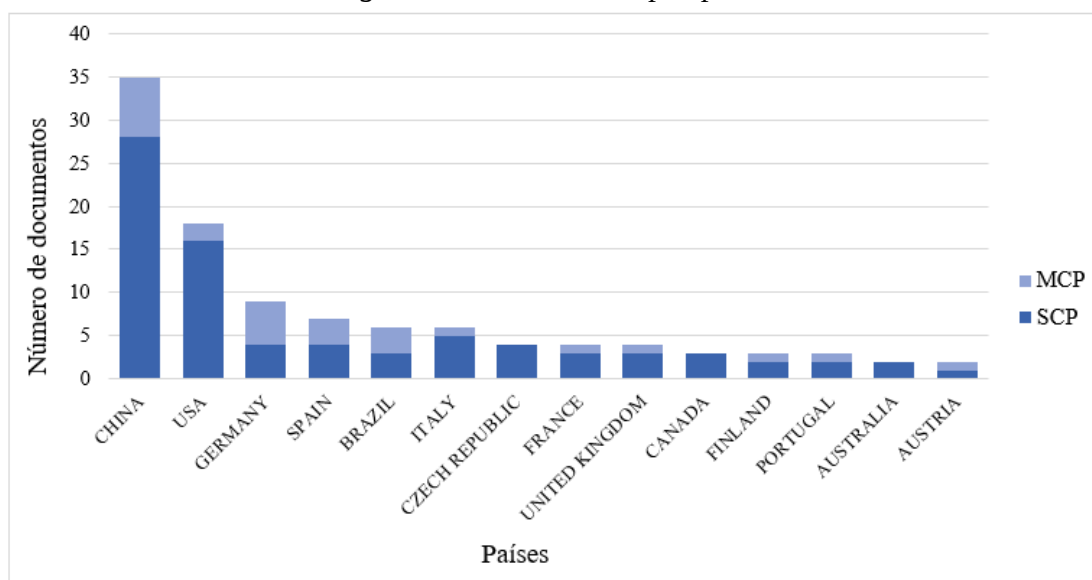
Tabla 2. Referencias de aeronaves no tripuladas para captura de imágenes multiespectrales

Tipo de UAV	Modelo	Proveedor (Marca)	Tipo de cámara / Sensor
MultiRotor (4 rotores)	Phantom 4	DJI	Cámara multiespectral MicaSense RedEdge™ 3
Ala fija	RPAS		Sensor con cuatro bandas espectrales y una resolución de 10 cm
MultiRotor	Phantom 4 Pro	DJI	Sensor multiespectral Cámara RedEdge-M
MultiRotor (4 rotores)	Phantom 4 Pro	DJI	Canon EOS 5DS RGB.
Ala fija	Trimble UX5 (HP)	Trimble	Cámara de alta resolución de fotograma completo de 36 MP Ortomosaicos de hasta 1 cm
MultiRotor	Matrice 210	DJI	Cámara multiespectral Micasense RedEdge MX
MultiRotor (4 rotores)	Phantom 4	DJI	Cámara de luz visible

Fuente: Autores

A continuación, en la Figura 3 se observan los primeros 5 países que presentan la mayor producción documental sobre el tema entre los cuales se destacan: China (35), USA (18), Alemania (9), Italy (6), y España (7). En la gráfica se puede evidenciar las siglas MCP y SCP, donde, MCP (inter-country) son aquellas publicaciones que se elaboraron gracias a la colaboración de otros países en el documento publicado, mientras que las siglas SCP (intra-country) indican los documentos que fueron elaborados únicamente en los países señalados, en el cual se destaca China con un número relevante de 28 publicaciones únicas.

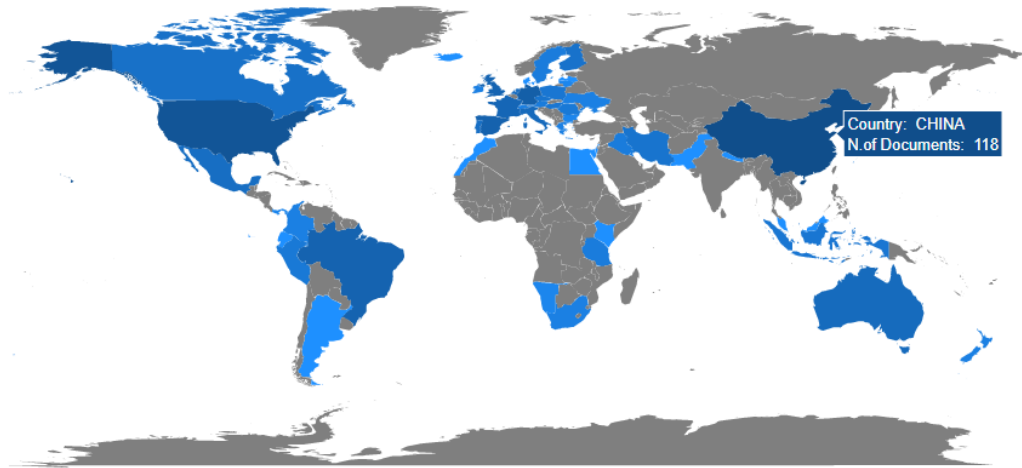
Figura 3. Publicaciones por países



Nota. El gráfico representa el número de documentos publicados por país con sus respectivas colaboraciones. Fuente: Elaboración propia con datos del Software bibliometrix

China se encuentra entre los países líderes en el campo de la identificación de la cobertura vegetal (ver figura 4), gracias a los significativos avances que ha logrado en el uso de tecnologías de vehículos aéreos no tripulados (UAV) para capturar imágenes multiespectrales. Varias razones contribuyen a su posición destacada en este ámbito, entre ellas, la combinación de fuertes inversiones en investigación y desarrollo, recursos y terrenos disponibles, un sólido apoyo gubernamental y una estrecha colaboración entre empresas y universidades. Todos estos factores han favorecido el liderazgo de China en la identificación de la cobertura vegetal mediante drones y la captura de imágenes multiespectrales.

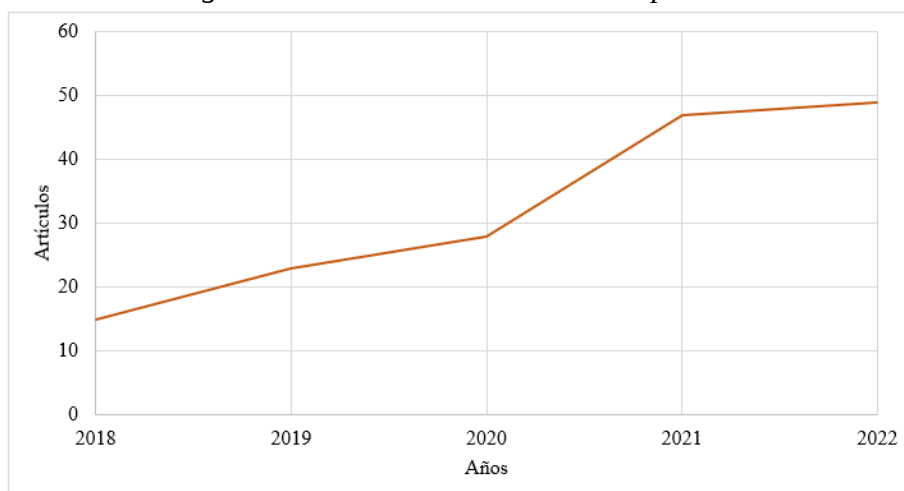
Figura 4. Producción científica por país



Nota. El gráfico representa la producción científica por país. Fuente: Bibliometrix

Diversos estudios realizados en China destacan la importancia del monitoreo y mapeo preciso del cambio de cobertura del uso del suelo (LUCC) y la cobertura vegetal para entender y modelar diversos procesos de la superficie terrestre. En el presente artículo describen un estudio que utilizó imágenes satelitales Landsat-8 OLI y algoritmos sin nubes y de nieve/glaciar para extraer información sobre la cobertura vegetal y LUCC en el Parque Nacional Sanjiangyuan. Los resultados muestran que el clasificador SVM pudo distinguir con alta precisión los principales tipos de uso de la tierra, pero las precisiones de clasificación para las subcategorías de los pastizales alpinos fueron relativamente bajas. El método descrito puede ser aplicado a otras imágenes satelitales multiespectrales y puede proporcionar conjuntos de datos de alta resolución espacial para respaldar decisiones científicas en la gestión sostenible de la región (Wei *et al.*, 2022). Así mismo, se discute cómo la detección precisa de la cobertura vegetal y la biomasa de las comunidades de arbustos en áreas arenosas es importante para evaluar el ecosistema y mejorar la teledetección. Por ello, los vehículos aéreos no tripulados (UAV) se han convertido en una herramienta útil para medir la biomasa y la fracción de cobertura vegetal debido a su alta resolución espacial y precisión de posicionamiento. Sin embargo, los métodos actuales no son adecuados para fluctuaciones superficiales, arbustos enanos y hierbas. El estudio presenta un método para obtener con precisión la fracción de cobertura vegetal y la información de biomasa utilizando imágenes RGB de UAV. Se utilizó un método de clasificación basado en objetos, un modelo de biomasa de dosel de arbusto único y un método basado en índices de vegetación para obtener los datos.

Figura 5. Publicaciones de artículos por año



Nota. El gráfico representa el número de documentos publicados por año. Fuente: Elaboración propia con datos del Software bibliometrix

De acuerdo con la base de datos Scopus durante los últimos 4 años, ha venido en aumento las investigaciones sobre la temática, la gráfica 5 muestra como en el año 2020, se dio un incremento en la producción bibliográfica, debido a la reciente aparición de estas tecnologías, puesto a que, los conocimientos antes de este año eran muy pocos acerca de los alcances de los Drones y sus implementaciones como una herramienta para proyectos medio ambientales; el tema que tiene más auge a partir del año 2020 es la agricultura, que incluye los UAV como elemento primario en su desarrollo, donde se logra la implementación de los drones como herramienta principal significando un gran avance tecnológico en las diferentes áreas del conocimiento.

En resumen, se han llevado a cabo varios estudios para medir el crecimiento de los cultivos, específicamente mediante el uso del método fotográfico para extraer el parámetro Fracción de Vegetación Cubierta (FVC), que se caracteriza por ser simple y preciso. Sin embargo, su precisión puede verse afectada por factores como la humedad y el tiempo de adquisición de las imágenes. Por esta razón, el presente estudio propone un nuevo método de extracción de FVC para el trigo. Este método se basa en el uso del algoritmo DPK-means, el cual utiliza una imagen en escala de grises para lograr una mayor precisión. Para probar este método, se recolectaron imágenes hiperespectrales de trigo tomadas con un UAV en diferentes condiciones (secas y húmedas) y se compararon los resultados con los obtenidos a partir del método de dicotomía de píxeles. Los resultados muestran que el algoritmo DPK-means produce resultados más precisos y robustos en diferentes condiciones, con valores de error absoluto bajos y alta precisión de ajuste (Liu *et al.*, 2021). Con este estudio se pueden evidenciar los nuevos métodos que se proponen para obtener información sobre la cobertura vegetal. Además, la gráfica anterior muestra un comportamiento similar con un crecimiento en el índice de publicaciones por año, el cual indica un aumento en la elaboración de documentos sobre el tema a lo largo de los años implementando temas como árboles de decisión y aprendizaje automático (ver gráfico 1).

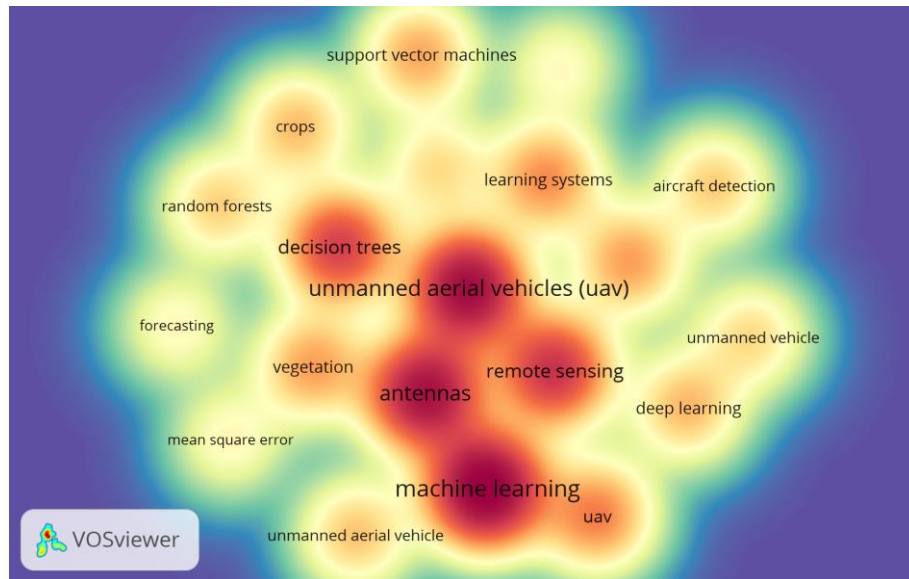
2. Caracterización de especies de la cobertura vegetal mediante el uso de inteligencia artificial con vehículos aéreos no tripulados

La caracterización de la cobertura vegetal es una tarea esencial para el monitoreo y gestión de los ecosistemas, puesto que permite obtener información valiosa sobre la salud y distribución de las especies vegetales. Con el avance de la tecnología, el uso de vehículos aéreos no tripulados y la inteligencia artificial han demostrado ser herramientas prometedoras para mejorar la precisión y eficiencia de la caracterización de especies vegetales. En este contexto, el uso de UAV equipados con sensores de alta resolución y algoritmos de aprendizaje automático permiten la identificación y clasificación únicamente de especies de la cobertura vegetal de manera rápida y precisa. Por ello, en esta revisión bibliográfica se explorará el potencial de la inteligencia artificial y los UAV en la caracterización de especies de cobertura vegetal, así como los retos y oportunidades que se presentan en su aplicación.

Se entiende por inteligencia artificial como la capacidad de imitación del cerebro humano mediante una serie de algoritmos otorgándole a cualquier tipo de máquina la capacidad de tomar sus propias decisiones sin la necesidad de que una persona lo manipule, por ello se ha ido implementando esta tecnología en el uso de los drones mediante sensores que permite su uso en estudios y proyectos ambientales así mismo como en sectores industriales y científicos. Estas tecnologías se aplican con el fin de facilitar su uso evitando choques de la aeronave con objetos o seres vivos y agilizando las tareas asignadas (Saravia *et al.*, 2022).

Conforme a ello se realiza un análisis detallado de correlación entre las palabras claves, el cual se evidencia en el siguiente mapa bibliométrico de densidad (ver figura 6), en la que se obtienen un total de 30 palabras clave de los 189 artículos tomados como muestra. Las primeras palabras clave que se presentan con mayor coincidencia en los artículos tomados como muestra son: Unmanned aerial vehicles (uav), antennas, machine learning, decision trees y remote sensing. Obteniendo como temas centrales: la aplicación de los sensores remotos y el aprendizaje automático en los vehículos aéreos no tripulados para la caracterización de especies de cobertura vegetal. Finalmente, a pesar de que el término inteligencia artificial es importante en el desarrollo de este enfoque no se encuentra con mayor frecuencia dentro del mapa debido a que es un tema que se compone de los demás términos encontrados en la zona periférica y central del mismo.

Figura 6. Densidad de correlación entre palabras clave



Nota. El gráfico representa la densidad y correlación de palabras clave. Fuente: Elaboración propia.

Los temas cuyo estudio se ha incrementado en los últimos años son el resultado de la correlación de palabras clave como: aprendizaje automático, vehículo aéreo y sensores remotos. Por ello, en Indonesia realizan seguimientos de la abundancia de especies de sucesión temprana en una concesión de restauración forestal donde, al combinar los drones con modelos de inteligencia artificial, se obtiene un sistema capaz de identificar los diferentes tipos de árboles según el modelo entrenado, utilizando imágenes de tipo RGB, modelos digitales de terreno y multispectrales. La finalidad de esto es permitir la implementación directa de este sistema en UAV de un costo accesible, con la capacidad de mapear un promedio de 100 hectáreas de bosque mapeando el dominio de las especies y la condición del bosque a lo largo de todo el proyecto de restauración con un solo UAV y un pequeño equipo de trabajo (Sohrabi *et al.*, 2022).

Al igual que estudios donde, su principal objetivo es la evaluación de la densificación de especies de plantas leñosas, lo que ha provocado una multitud de cambios ambientales, por ello en el presente artículo se presenta un enfoque automatizado para determinar la abundancia de flores en pastizales mediante el uso de imágenes aéreas basadas en drones y aprendizaje profundo, utilizando un enfoque de detección de objetos entrenado y evaluado en datos de cinco vuelos en dos sitios, la red de aprendizaje profundo logró identificar y clasificar flores individuales y generar mapas de flores con una precisión que superó o igualó a la de los métodos manuales. Los resultados fueron buenos para algunos tipos de flores, pero se detectaron mal para otras debido a razones como la falta de datos de entrenamiento y cambios en la fenología. El método puede dar estimaciones precisas de la abundancia de muchas especies de plantas con flores y se puede aplicar a cualquier tipo de problema de detección de objetos aéreos (Gallmann *et al.*, 2022).

De acuerdo con lo anterior, se desarrolla la capacidad de los UAV para capturar imágenes de alta resolución para mapear con precisión las especies de plantas leñosas que invaden los pastizales semiáridos. Los investigadores utilizaron varios métodos de clasificación basados en píxeles y objetos para analizar las imágenes asequibles de drones de muy alta resolución en un sitio en la ecorregión de Edwards Plateau en Texas. Los resultados mostraron que el modelo CNN VGG-19 logró la precisión general más alta del 96,9%, seguido de SVM con una precisión promedio del 91,2% y RF con una precisión del 89,7%. En general, los hallazgos indicaron que los sensores de drones RGB pueden proporcionar clasificaciones altamente precisas de especies de plantas leñosas en paisajes semiáridos, comparables o incluso mejores en algunos aspectos que las imágenes aéreas y de drones utilizando sensores hiperespectrales en paisajes más diversos (Olariu *et al.*, 2022).

Del mismo modo, el uso de imágenes de drones de alta resolución son una herramienta efectiva para monitorear la invasión de especies leñosas en pastizales. En los Alpes Italianos, se hace uso de imágenes RGB de una pradera subalpina abandonada para clasificarlas mediante fotointerpretación manual y modelos semi automáticos basados en píxeles y objetos con algoritmos de aprendizaje automático. Los resultados indicaron que la fotointerpretación fue el método más preciso (alrededor del 99%) seguido por el enfoque basado en píxeles (alrededor del 86%), que fue más rápido y preciso que el basado en objetos (alrededor del 78%). Finalmente, para el mapeo de la invasión en sus primeras etapas, el enfoque basado en píxeles se demostró como una opción prometedora y pragmática (Oddi *et al.*, 2021). Mientras que otros investigadores exploran un método de detección de enfermedades y plagas en plantas utilizando imágenes aéreas capturadas por drones, y se centra en comparar dos métodos de construcción de modelos para la detección de objetos basados en la tecnología de aprendizaje profundo. Uno es el método de mínimos cuadrados para ajustar la curva entre un parámetro alfa y la precisión medida por mAP, y el otro es el método de aprendizaje automático automático (AutoML) que busca automáticamente el mejor modelo. El estudio concluye que, aunque el método AutoML logra una mayor precisión en la detección, consume aproximadamente tres veces más tiempo y recursos de entrenamiento que el método de mínimos cuadrados, por lo que se debe realizar una compensación entre precisión, consumo de recursos y urgencia de la tarea al elegir el método a utilizar (Liang *et al.*, 2022).

Tabla 3. Referencias de aeronaves no tripuladas para caracterizar especies de cobertura vegetal

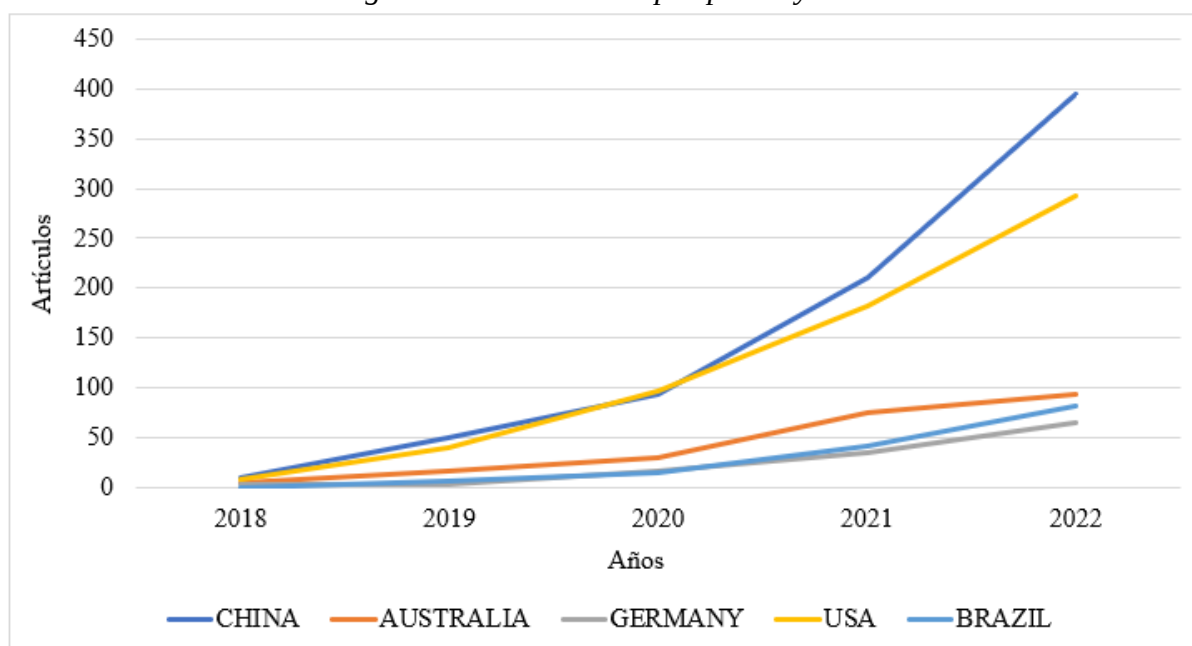
Tipo de UAV	Modelo	Proveedor (Marca)	Tipo de Cámara
MultiRotor	Phantom 4 Pro	DJI	Compacta FC6310 (20 Mpixel; sensor CMOS 1", FOV 84° y distancia focal 8,8 mm/formato equivalente 24 mm–35 mm)
MultiRotor	Phantom 3 Pro	DJI	Sony 1/2.3" CMOS RGB y un Lente FOV 94° de 20 mm
MultiRotor	Modelo transformer UAV Matrice 600 pro	DJI	Sony ILCE- 7RM2
Dron ala fija	Prototipo de elaboración propia	-	Sony ILCE-6000
MultiRotor	Inspire 2	DJI	Cámara profesional DJI X5
MultiRotor	Matrice 600 (M600) Pro	DJI	Sony RX10 Cámara térmica ICI 8640 P-series
MultiRotor	Phantom 3 PRO	DJI	Cámara digital a color FC300X
MultiRotor	Phantom 4	DJI	Cámara estándar del Dron

Fuente: Autores

De acuerdo con la información correspondiente de los estudios analizados anteriormente fue posible encontrar que para los dos enfoques se implementan los siguientes sensores: sensores RGB, Multiespectrales, hiperespectrales y térmicos para la captura de imágenes y su posterior mapeo, así como para la caracterización de especies de la cobertura vegetal.

En cuanto a la producción de artículos y citas por país (ver gráfico 7), se puede apreciar el índice de artículos publicados por país y la relación de colaboración entre ellos para la realización de diferentes estudios en el tema de inteligencia artificial usando UAV para clasificar especies de cobertura vegetal. Al analizar los datos, se observa un comportamiento similar al del primer enfoque, en el que China lidera con amplia ventaja de documentos, superando a países potentes como Estados Unidos y Australia.

Figura 7. Publicaciones por países y años



Nota. El gráfico representa el número de documentos publicados por país. Fuente: Elaboración propia con datos del Software bibliometrix

En relación con lo anterior, hay varias razones por las que China lidera en el número de publicaciones de documentos relacionados con la caracterización de especies de la cobertura vegetal mediante el uso de inteligencia artificial con vehículos aéreos no tripulados. Existen diversas posibles razones que explican el aumento en el número de publicaciones científicas en China, entre ellas se destaca la fuerte inversión que ha realizado el país en investigación y desarrollo en los últimos años. Además, cuentan con programas específicos de financiamiento para la investigación en tecnologías de inteligencia artificial y producción de drones, así como con tecnología avanzada para la caracterización de especies de cobertura vegetal mediante el uso de inteligencia artificial con UAV. Esto tiene importantes aplicaciones en la agricultura, tales como el monitoreo de cultivos, la predicción de cosechas y la detección de enfermedades. No cabe duda de que el creciente interés en esta área de investigación en China se debe a su gran importancia para la economía y la sociedad del país (Guimbao, 2021).

Por esta razón, se han realizado diversos estudios con el fin de caracterizar la cobertura vegetal en bosques y otros ecosistemas, esto mediante el uso de imágenes multiespectrales y RGB de alta resolución tomadas con un sistema UAV permite identificar las especies de árboles dominantes en Bosques. En el estudio realizado en dicho país, se utilizó fotogrametría aérea digital para generar nubes de puntos y algoritmos de delineación de copas de árboles individuales junto con un clasificador de aprendizaje automático para clasificar ocho especies de árboles dominantes. Se encontró que el algoritmo de segmentación AMRS ITC fue el más preciso y la combinación de métricas espectrales, de textura y estructurales tuvo la mayor precisión de clasificación (Xu *et al.*, 2020).

Generalmente, en diferentes estudios que emplean inteligencia artificial, los autores prefieren desarrollar sus propios prototipos de drones para reducir costos y agregar más herramientas tecnológicas a la aeronave. En su mayoría, se selecciona el chasis de drones de multiRotor y se

le añaden componentes como un GPS para la ubicación espacial, un sensor barométrico para la altura de la aeronave, una cámara (preferiblemente de la marca Raspberry y modelo RPI-CAM-V2 por su tamaño, peso y resolución de hasta 1080p) y una unidad de movimiento inercial (IMU) para la orientación. DJI es la marca líder en la selección de chasis. Para los microprocesadores, se recomienda utilizar un Raspberry 3B+ como compañero del controlador de vuelo, ya que facilita el procesamiento de las imágenes (De Alfonso, 2020).

Mientras tanto en países como Estados Unidos el cual se encuentra segundo en nuestro escalafón centran sus estudios de investigación en la cobertura vegetal urbana denominada “urban green space”, donde se desarrollan técnicas de fusión de datos multisensor para clasificar especies de árboles urbanos utilizando imágenes multiespectrales, hiperespectrales, LiDAR e infrarrojas térmicas basadas en UAV en un área de estudio urbano. Se investigaron dos clasificadores de aprendizaje automático supervisados, Random Forest (RF) y Support Vector Machine (SVM), y se utilizaron características espectrales derivadas hiperespectrales con RF para lograr la mayor precisión de clasificación general (OA) del 83,3 % y kappa de 0,80. Los resultados demuestran el potencial de un enfoque de fusión de datos de sensores múltiples de alta resolución para clasificar árboles individuales por especies en un entorno urbano complejo con requisitos de muestreo limitados (Hartling *et al.*, 2021).

Por otra parte, en Europa se exploran estas tecnologías en el área de la agricultura para el conteo de plantas, algunos artículos proponen métodos automatizados para contar plantas utilizando imágenes de UAV de muy alta resolución. El método utiliza la visión artificial y redes neuronales convolucionales para identificar y contar plantas de espinaca de 10 semanas de edad en un campo experimental con una superficie de 3,2 ha. Los resultados mostraron que la metodología propuesta puede contar plantas con una precisión del 95% para una resolución espacial de 8 mm/píxel y una cantidad total de 170 000 plantas en un área de 3,5 ha con un error del 42,5%. El estudio demuestra que es posible contar plantas individuales utilizando productos listos para usar basados en UAV y que a través de algoritmos de aprendizaje/visión artificial es posible traducir datos de imágenes en información práctica no experta (Valente *et al.*, 2020).

En la Gráfica 7, es posible observar que el punto de inflexión se produjo en el año 2020. Este periodo marcó el auge de la implementación de drones con inteligencia artificial para la caracterización de especies de cobertura vegetal. Las diferentes tecnologías agregadas a estas aeronaves en busca de su autonomía las convierten en herramientas fundamentales para el desarrollo de este tipo de estudios. Este progreso ha dado lugar a la aparición de la agricultura inteligente, en la que los drones se han convertido en un pilar fundamental debido a su creciente uso en la industria agrícola. Las nuevas tecnologías permiten mejorar la eficiencia y productividad de los cultivos. El uso de drones para el análisis y gestión de campos es una de las principales aplicaciones de esta tecnología, ya que permite obtener información precisa y actualizada sobre el estado de los cultivos. Para lograr una agricultura inteligente, es necesario diseñar drones precisos, rentables y multipropósito. Estos drones son esenciales para mejorar la precisión predictiva y proporcionar un modelo de evaluación de la salud del suelo con una precisión del 88.4%. No obstante, es importante señalar que esta tecnología debe ser utilizada de manera responsable y sostenible para asegurar un desarrollo agrícola sostenible (Revathiet *al.*, 2022)

Conclusiones

Las investigaciones sobre las aplicaciones de los UAV para la estimación y caracterización de la cobertura vegetal son un tema que se encuentra en su máximo auge actualmente, debido a que es una tecnología que se ha destacado por lograr recabar datos precisos para llevar a cabo proyectos de una manera más efectiva, reduciendo el recurso humano, los lapsos de tiempo empleados por su facilidad y precisión en el momento de ejecutar un estudio. La inteligencia artificial y el aprendizaje automático se posicionan como la herramienta tecnológica clave en este ámbito, dado su diversidad de aplicaciones en distintos sectores y su capacidad para optimizar el manejo de información obtenida por medio de imágenes o de la aeronave.

De esta manera se evidencia que la marca de drones DJI se destaca como el líder indiscutido del mercado global de aeronaves no tripuladas. Además de su modelo insignia, el Phantom 4, y su predecesor el Phantom 3 y los drones de la serie Matrice 600; los expertos en la materia suelen tomar como referencia las estructuras y chasis de la marca DJI para crear prototipos personalizados basados en sus diseños. En lo que respecta a las cámaras, la marca Sony es la opción más popular en el mercado, seguida por la opción de utilizar las cámaras integradas en los drones, que ofrecen resoluciones cada vez más avanzadas. Los autores de los estudios en este campo toman en cuenta estas opciones a la hora de seleccionar la mejor cámara para sus necesidades.

Finalmente, es de resaltar que la mayor producción investigativa se concentra en China y Estados Unidos, mientras que las redes de colaboración de investigación se concentran principalmente en Europa. En este sentido, el uso de los UAV en diferentes campos aplicativos representa una alternativa de investigación relevante con aplicaciones en el mercado y en diferentes áreas de estudio.

Referencias

Aragón, G. C., Cubillos Rodríguez, J. P., & Delgado-Niño, P. (2021). Uso de los vehículos aéreos no tripulados (drones) para el levantamiento de información primaria en los estudios ambientales por parte de las consultoras ambientales Use of Unmanned Aerial Vehicles (drones) for the Collection of Primary Information in Environmental Studies by Environmental Consultants. <https://orcid.org/0000-0002-6166-4025>

Cuervo Martínez, K. X. (2020). Adquisición y análisis de imágenes UAV para la estimación de coberturas vegetales y biomasa.

De Alfonso Juliá, J. C. (2020). Dron de vuelo autónomo con reconocimiento basado en inteligencia artificial.

El Hoummaidi, L., Larabi, A., & Alam, K. (2021). Using unmanned aerial systems and deep learning for agriculture mapping in Dubai. *Heliyon*, 7(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08154>

Feng, Q., Liu, J., & Gong, J. (2018). UAV Remote sensing for urban vegetation mapping using random forest and texture analysis. *Remote Sensing*, 7(1), 1074–1094. <https://doi.org/10.3390/rs70101074>

Gallmann, J., Schüpbach, B., Jacot, K., Albrecht, M., Winizki, J., Kirchgessner, N., & Aasen, H. (2022). Flower Mapping in Grasslands With Drones and Deep Learning. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.774965>

Guimbao, J. F. (2021). Inteligencia artificial: una carrera hacia el futuro tecnológico. *bie3: Boletín IEEE*, (23), 146-163.

Gutierrez-Alonso, G. (2016). Aplicaciones Geológicas de los Drones-Geological Applications of UAVs Assessing crustal recycling and granite magma generation in Central Iberia (IBERCRUST) View project Material Docente Cartografía Geológica y Geología Estructural View project. <https://www.researchgate.net/publication/303696594>

Hartling, S., Sagan, V., & Maimaitijiang, M. (2021). Urban tree species classification using UAV-based multi-sensor data fusion and machine learning. *GIScience and Remote Sensing*, 58(8), 1250–1275. <https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1974275>

Kharuf-Gutierrez, S., Hernández-Santana, L., Orozco-Morales, R., de la Aday Díaz, O. C., & Delgado Mora, I. (2018). Análisis de imágenes multiespectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados. In *RIELAC* (Issue 2).

Lee, G., Hwang, J., & Cho, S. (2021). A novel index to detect vegetation in urban areas using uav-based multispectral images. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/app11083472>

Liang, D., Liu, W., & Zhao, Y. (2022). Optimal Models for Plant Disease and Pest Detection Using UAV Image. *Nature Environment and Pollution Technology*, 21(4), 1609–1617. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2022.v21i04.013>

Liu, D. zhong, Yang, F. fei, & Liu, S. ping. (2021). Estimating wheat fractional vegetation cover using a density peak k-means algorithm based on hyperspectral image data. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(11), 2880–2891. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63556-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63556-0)

Marcial-Pablo, M. de J., Ontiveros-Capurata, R. E., Jiménez-Jiménez, S. I., & Ojeda-Bustamante, W. (2021). Maize crop coefficient estimation based on spectral vegetation indices and vegetation cover fraction derived from uav-based multispectral images. *Agronomy*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11040668>

Oddi, L., Cremonese, E., Ascari, L., Filippa, G., Galvagno, M., Serafino, D., & di Cella, U. M. (2021). Using UAV imagery to detect and map woody species encroachment in a subalpine grassland: Advantages and limits. *Remote Sensing*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/rs13071239>

Olariu, H. G., Malambo, L., Popescu, S. C., Virgil, C., & Wilcox, B. P. (2022). Woody Plant Encroachment: Evaluating Methodologies for Semiarid Woody Species Classification from Drone Images. *Remote Sensing*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/rs14071665>

Pérez Izquierdo, C. (2020). Uso de imágenes multiespectrales de drones para evaluar el estado del arbolado en la dehesa. Catálogo de investigación joven en Extremadura. Volumen III.

Pinzón, B. F. S., Ortega, J. R. T., & Rosa, P. (2016). Drones: General aspects and social applications. *Visión electrónica*, 10(2), 11.

Revathi, K., Tamilselvi, T., Arunkumar, R., & Samydurai, A. (2022). A SMART DRONE FOR ENSURING PRECISION AGRICULTURE WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORK. *Indian Journal of Computer Science and Engineering*, 13(3), 897–906. <https://doi.org/10.21817/indjcse/2022/v13i3/221303025>

Rivera, L. B., Bonilla, B. M., & Obando-Vidal, F. (2021). Processing multispectral imaging captured by drones to evaluate the normalized difference vegetation index of Castillo coffee plantations. *Ciencia Tecnología Agropecuaria*, 22(1). https://doi.org/10.21930/RCTA.VOL22_NUM1_ART:1578

Saravia, V., Moraes, W., Kelbouscas, A., & Grando, R. (2022). Drones e Inteligencia Artificial para Investigación y Competición. *arXiv preprint arXiv:2210.11199*.

Sohrabi, H., Gao, Y., Bhardwaj, A., & Coomes, D. A. (2022). Monitoring early-successional trees for tropical forest restoration using low-cost UAV-based species classification.

Valente, J., Sari, B., Kooistra, L., Kramer, H., & Múcher, S. (2020). Automated crop plant counting from very high-resolution aerial imagery. *Precision Agriculture*, 21(6), 1366–1384. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-0972+5-3>

Wei, Y., Wang, W., Tang, X., Li, H., Hu, H., & Wang, X. (2022). Classification of Alpine Grasslands in Cold and High Altitudes Based on Multispectral Landsat-8 Images: A Case Study in Sanjiangyuan National Park, China. *Remote Sensing*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/rs14153714>

Xie, L., Meng, X., Zhao, X., Fu, L., Sharma, R. P., & Sun, H. (2022). Estimating Fractional Vegetation Cover Changes in Desert Regions Using RGB Data. *Remote Sensing*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/rs14153833>

Xu, Z., Shen, X., Cao, L., Coops, N. C., Goodbody, T. R. H., Zhong, T., Zhao, W., Sun, Q., Ba, S., Zhang, Z., & Wu, X. (2020). Tree species classification using UAS-based digital aerial photogrammetry point clouds and multispectral imageries in subtropical natural forests. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 92. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102173>

Yang, H., Hu, Y., Zheng, Z., Qiao, Y., Zhang, K., Guo, T., & Chen, J. (2022). Estimation of Potato Chlorophyll Content from UAV Multispectral Images with Stacking Ensemble Algorithm. *Agronomy*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/agronomy12102318>

Zhao, T., Huang, L., Wang, J., Cui, B., Li, X., & Zhu, X. (2022). Effective Screening and Texture Segmentation of Green Vegetation Cover Based on UAV Images. *Traitement Du Signal*, 39(4), 1435–1442. <https://doi.org/10.18280/ts.39043>