Aplicaciones de drones para la detección y manejo de "*Hemileia vastatrix*": Revisión de alcance

Drone Applications for the Detection and Management of "Hemileia vastatrix": A Scope Review

Anderson D. Torres-Orjuela[1], Brayan D. Rincón-Beltran[1],Javier D. Hoyos-Leyva[2], Holman E. Cubides-Garzón[3]

[1]Fundación Universitaria Agraria de Colombia – UNIAGRARIA, Departamento de Ingeniería de Agroindustrial, Bogotá, D.C. Colombia. Correo electrónico: torres.andersond@uniagraria.edu.co ; rincón.brayan@uniagraria.edu.co

[2] fundación Universitaria Agraria de Colombia – UNIAGRARIA, Departamento de Ingeniería de Agroindustrial, Bogotá, D.C. Colombia. Correo electrónico: hoyos.javier@uniagraira.edu.co

[3] fundación Universitaria Agraria de Colombia – UNIAGRARIA, Departamento de Ingeniería de Mecatrónica, Bogotá, D.C. Colombia. Correo electrónico: cubides.holman@uniagraria.edu.co

RESUMEN

La roya del café (Hemileia vastatrix) genera pérdidas drásticas de entre el 10% y el 15% en la producción agroindustrial, lo que evidencia la ineficacia del monitoreo visual tradicional. Esta revisión de alcance mapea y caracteriza la evidencia científica sobre el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) integrados con sistemas de visión de máquina para la detección temprana y el control fitosanitario del patógeno. Siguiendo los lineamientos PRISMA-ScR y el modelo analítico TCCM, se evaluaron 38 artículos indexados publicados entre 2016 y 2026. El análisis de la información evidencia que la combinación de drones equipados con sensores y arquitecturas de análisis como (ResNet 50 y YOLOv5) permite realizar un diagnóstico presintomático del estrés de la planta con valores superiores al 90%. Igualmente, la calibración aerodinámica de los vehículos aéreos no tripulados (UAV) dotados de pulverizadores incrementa la uniformidad en la aspersión, dentro del envés de la hoja en doseles densos mediante el flujo de aire descendente. Los resultados demuestran que la transición a la agricultura de precisión permite realizar una migración desde un control foliar de correctivo a uno predictivo, su adopción por pequeños caficultores está limitada por barreras de capital y brechas digitales rurales, lo que demanda impulsar modelos de asociación rural.

Palabras clave: Agricultura 4.0, *Hemileia vastatrix*, procesamiento de imágenes, Teledetección, Vehículos aéreos no tripulados (UAV).

ABSTRACt

Coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*) causes drastic losses of between 10% and 15% in agroindustrial production, highlighting the ineffectiveness of traditional visual monitoring. This scoping review maps and characterizes the scientific evidence on the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) integrated with machine vision systems for the early detection and phytosanitary control of the pathogen. Following the PRISMA-ScR guidelines and the TCCM analytical model, 38 indexed articles published between 2016 and 2026 were evaluated. Analysis of the data shows that the combination of drones equipped with sensors and analysis architectures such as ResNet 50 and YOLOv5 enables pre-symptomatic diagnosis of plant stress with accuracy rates exceeding 90%. Similarly, the aerodynamic calibration of unmanned aerial vehicles (UAVs) equipped with sprayers increases spraying uniformity on the underside of leaves in dense canopies through downward airflow. The results demonstrate that the transition to precision agriculture enables a shift from corrective to predictive foliar control; however, its adoption by small-scale coffee farmers is limited by capital barriers and rural digital divides, which calls for the promotion of rural partnership models.

Keywords: Agriculture 4.0, *Hemileia vastatrix*, image processing, remote sensing, unmanned aerial vehicles (UAVs).

1. INTRODUCCION.

El sector agropecuario enfrenta un reto permanente para garantizar la seguridad alimentaria frente a los riesgos producidos por plagas y enfermedades, el cual se encuentra entre un 10 % a 15 % de la producción agrícola a nivel mundial según (Yuanyuan Yang, 2026), Esta situación ocasiona pérdidas económicas que afectan directamente el sustento de las familias caficultoras. (Chebrolu, 2018). En la agroindustria del café, la roya, causada por el hongo Hemileia vastatrix, es considerada una de las amenazas más significativas para este cultivo (Ramírez-Valencia, 2023) Este patógeno afecta la capacidad foliar fotosintética y los niveles de producción, lo que altera la calidad del producto final y disminuye el retorno monetario de los productores. (Chebrolu, 2018). porque arruina las propiedades sensoriales de la bebida (acidez, cuerpo y dulzor), haciendo que pierda su valor como café especial y se venda muy barato en el mercado común.

Aunque se han desarrollado plantas y variedades de café resistentes, tal como la variedad Castillo creada en Colombia por Cenicafé (Chebrolu, 2018) la recurrencia de fenómenos climáticos extremos sumada a los problemas de estrés biológico continúa afectando drásticamente la productividad cafetalera (Maddikunta, 2021). Históricamente, el manejo agronómico se ha realizado de forma tradicional mediante inspecciones visuales realizadas por plantas escogidas al azar, una práctica que limita la obtención de una visión general del estado real del lote (Chebrolu, 2018).El estrés producido por la limitación de nutrientes o el avance del hongo se ve reflejado mediante síntomas visuales tardíos como la clorosis (Sadeghian K., 2022).Por eso, depender únicamente de este método manual no funciona bien, lo que causa un diagnóstico tardío cuando la enfermedad ya avanzó y la caída de las hojas es inminente (CENICAFE, 2017).

Ante la problemática, la agricultura 4.0 incorpora vehículos aéreos no tripulados (UAV) con sistemas de inteligencia artificial (IA), sustituyendo una alternativa tecnológica. En el área del diagnóstico vegetal, se cuenta con evidencia científica sobre la viabilidad de la detección temprana de la roya de la hoja de café a través de imágenes multiespectrales tomadas por drones (Kouadio, 2021). Los algoritmos avanzados analizan las imágenes obtenidas durante el monitoreo, empleando técnicas de visión por computadora y redes neuronales convolucionales que permiten el análisis de datos de alta resolución espacial para la detección de signos presintomáticos de la enfermedad (Ramírez-Valencia, 2023). Este avance constituye la base del primer eje de nuestra revisión, el cual se enfoca en evaluar los modelos de visión de artificial para el reconocimiento óptico del hongo.

En el ámbito del control fitosanitario, los drones pulverizadores o de aspersión se constituyen como una opción eficaz para combatir plagas en terrenos con topografías montañosas, posibilitando la aplicación del producto en el tercio superior de las plantas (Alvarenga, 2024). Al calibrar parámetros aerodinámicos como regular la velocidad de vuelo para permitir que el flujo de aire descendente abra el follaje (Silva, 2024) y controlando la altura mediante sensores de terreno puede favorecerse una distribución más uniforme del fungicida (Souza, 2022), se consigue una distribución uniforme del

fungicida. La literatura científica respalda la alta eficiencia de la aplicación aérea mediante UAV para el control de Hemileia vastatrix en plantaciones comerciales (Silva, 2024).

Optimizar insumos con estas herramientas ayuda a los productores, pero los altos costos, la falta de conectividad veredal y la escasa capacitación frenan su adopción masiva (Rodriguez, 2025). A esto se suma que las investigaciones sobre teledetección y aspersión con UAV están dispersas entre múltiples cultivos y entornos operativos, haciendo difícil identificar qué soluciones funcionan directo contra la roya. Para resolver este vacío sin revolver los análisis, esta revisión de alcance separa la evidencia en dos líneas independientes: el uso de visión de máquina para reconocer el hongo y la evaluación de drones para aplicar fungicidas. Ambos componentes se organizan bajo el modelo TCCM. El propósito final es analizar la literatura científica sobre el uso de UAV frente a la Hemileia vastatrix en café siguiendo los lineamientos PRISMA-ScR.

2. METODOLOGÍA.

2.1. Diseño del Estudio.

Para realizar este trabajo se desarrolló una revisión de alcance conforme con la orientación metodológica del Joanna Briggs Institute, con el fin de conocer investigaciones sobre el uso de tecnologías para el control de la roya de café, este tipo de revisión permitió reunir, organizar y analizar información para comprender los avances logrados y los que necesitan mayor investigación. El desarrollo y el protocolo del trabajo siguieron de cerca el marco metodológico del Instituto Joanna Briggs (Peters, y otros, 2020) . Se siguieron los lineamientos de declaración PRISMA-ScR (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses extension for Scoping Reviews) (Tricco, y otros, 2018) los cuales favorecen la transparencia, organización y reproducibilidad del proceso de revisión de la información.

2.1.1. Identificación de los parámetros de selección. (Marco PCC).

Para definir el alcance del estudio se definieron utilizando el enfoque PCC (Población, Concepto y Contexto), siguiendo el reglamento institucional del Instituto Joanna Briggs.

- la Población (P): cultivos de café afectados o con riesgo de adquirir o presentar la enfermedad de la roya (Hemileia vastatrix).
- El concepto (C): se basó en el uso de drones, sensores, incluye tanto los sistemas de detección remota con inteligencia artificial como las plataformas destinadas a la aspersión de productos fitosanitarios.
- El Contexto (C): Sistemas productivos y fincas cafeteras distribuidas en diferentes regiones agroecológicas del mundo, analizados bajo el enfoque de modernización tecnológica e infraestructura digital propios de la Agricultura

2.2. Estrategia de Búsqueda Bibliográfica y Fuentes.

La búsqueda de la información se concentró entre el 09 de junio y el 30 de julio del 2026. En esta fase se llevó a cabo una amplia revisión en bases de datos globales ampliamente reconocidas por sus fuentes académicas de validez científica y cobertura internacional en agricultura de precisión, sistemas de detección remota con inteligencia artificial: Scopus, Web of Science, ScienceDirect y SpringerLink. Para localizar la información se utilizaron los operadores lógicos AND y OR combinando estos términos lo que permitió obtener resultados más precisos y acordes al objetivo del estudio, dando prioridad al vocabulario técnico en ingles.

A continuación, se detalla el vocabulario técnico en idioma inglés utilizado como base para la estructuración de los descriptores y el álgebra booleana de la investigación:

- **Cultivo de interés:** *Coffee, Coffee crop, Coffee plantation.*

- **Organismo patógeno:** *Coffee leaf rust, Hemileia vastatrix.*
- **Tecnología aérea de monitoreo:** *Drone, UAV, Unmanned Aerial Vehicle.*
- **Herramientas de captura remota:** *Remote Sensing, Multispectral Sensor, RGB Camera.*
- **Procesamiento y arquitecturas de datos:** *Artificial Intelligence, Machine Learning, Deep Learning.*

La articulación lógica y los filtros algorítmicos aplicados con base en estos términos normalizados se resumen detalladamente en la Tabla 1.

Tabla 1

Estrategia de Búsqueda Detallada y Filtros Aplicados por Base de Datos

Base de Datos	Sintaxis de Búsqueda Implementada	Filtros / Límites Aplicados
Scopus	(*"Coffee"* OR *"Coffee Crop"* OR *"Coffee Plantation"*) AND (*"Drone"* OR *"UAV"* OR *"Unmanned Aerial Vehicle"*) AND (*"Remote Sensing"* OR *"Multispectral"* OR *"RGB"*) AND (*"Artificial Intelligence"* OR *"Machine Learning"* OR *"Deep Learning"*) AND (*"Coffee leaf rust*" OR *"Hemileia vastatrix"*)	Rango: 2016–2026 Tipo: *Article / Review* Idioma: *English / Spanish*
ScienceDirect	(*"Coffee"* OR *"Coffee Crop"* OR *"Coffee Plantation"*) AND (*"Drone"* OR *"UAV"* OR *"Unmanned Aerial Vehicle"*) AND (*"Remote Sensing"* OR *"Multispectral"* OR *"RGB"*) AND (*"Artificial Intelligence"* OR *"Machine Learning"* OR *"Deep Learning"*) AND (*"Coffee leaf rust*" OR *"Hemileia vastatrix"*)	Rango: 2016–2026 Tipo: *Article / Review* Idioma: *English / Spanish*
SpringerLink	(*"Coffee"* OR *"Coffee Crop"* OR *"Coffee Plantation"*) AND (*"Drone"* OR *"UAV"* OR *"Unmanned Aerial Vehicle"*) AND (*"Remote Sensing"* OR *"Multispectral"* OR *"RGB"*) AND (*"Artificial Intelligence"* OR *"Machine Learning"* OR *"Deep Learning"*) AND (*"Coffee leaf rust*" OR *"Hemileia vastatrix"*)	Rango: 2016–2026 Tipo: *Article / Review* Idioma: *English / Spanish*

Web of Science	(*"Coffee"* OR *"Coffee Crop"* OR *"Coffee Plantation"*) AND (*"Drone"* OR *"UAV"* OR *"Unmanned Aerial Vehicle"*) AND (*"Remote Sensing"* OR *"Multispectral"* OR *"RGB"*) AND (*"Artificial Intelligence"* OR *"Machine Learning"* OR *"Deep Learning"*) AND (*"Coffee leaf rust"* OR *"Hemileia vastatrix"*)	Rango: 2016–2026 Tipo: *Article / Review* Idioma: *English / Spanish*

Nota. *Los operadores booleanos (AND / OR) se ejecutaron en mayúsculas sostenidas para respetar los requerimientos técnicos de coeficiente y los motores de consulta de cada plataforma (2026).*

2.3. Criterios de Elegibilidad.

Tabla 2

Criterios de Inclusión y Exclusión para la Selección de Estudios

Criterios de Inclusión	Criterios de Exclusión
• Trabajos científicos originales y de revisión publicados en revistas indexadas arbitradas.	• Duplicaciones en los distintos índices bibliográficos consultados.
• Investigación validada en un periodo de tiempo de 2016 a 2026.	• Resúmenes de congresos (actas), documentos de opinión, patentes y publicaciones en gris.
• Documentos publicados en español o inglés.	• Capítulos del libro, manuales comerciales y empleos de pregrado en cualquier nivel.
• Los estudios se centraron en las plantaciones de café o los avances tecnológicos transferibles a la vigilancia y el control fitosanitarios a través del VANT.	• Artículos publicados en bases de datos estrictamente regionales (por ejemplo, SciELO o Latindex) para evitar el sesgo geográfico y recuperar datos locales sobre la roya. • Documentos sin acceso disponible al texto completo.

Nota. *Elaboración propia (2026).*

2.4. Proceso de Selección y Extracción de Datos (Data Charting).

Las fases de selección se llevaron a cabo siguiendo secuencialmente las cuatro estaciones recomendadas por el diagrama de flujo de la declaración PRISMA-ScR: identificación, selección, elegibilidad e inclusión. Tras depurar los registros duplicados utilizando un gestor bibliográfico digital, dos revisores independientes examinaron los títulos y resúmenes para descartar contribuciones irrelevantes. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis completo de los artículos potencialmente elegibles, verificando la correspondencia exacta con los límites predeterminados. Las posibles discrepancias durante esa fase se resolvieron por consenso técnico entre los evaluadores.

Este procedimiento permitió seleccionar de forma inicial de 59 artículos científicos y tras una rigurosa revisión y exclusión se seleccionaron de formar definitiva 38 artículos para la elaboración de la revisión de alance. La información más importante de cada estudio se organizó en una matriz de extracción elaborada en Microsoft Excel, donde se registraron de manera ordenada las variables presentadas en la tabla 3.

Tabla 3

Variables Metodológicas Consideradas en la Matriz de Extracción de Datos

Categoría	Variables Extraídas del Manuscrito
Identificación	Autores, año de publicación, país de desarrollo y filiación institucional.
Tipo de Evidencia	Evidencia directa (roya del café/*Hemileia vastatrix*) o evidencia indirecta/transferible.
Plataforma Tecnológica	Tipo de vehículo aéreo no tripulado (UAV), altura de operación y velocidad de vuelo.
Sensores e Índices	Clase de sensor (RGB, multiespectral, térmico) e índices de vegetación calculados (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI)).
Análisis Computacional	Tamaño del conjunto de datos y método de validación. Algoritmo empleado, arquitectura computacional (Redes Neuronales Convolucionales (CNN), Algoritmo de detección de objetos en tiempo real (YOLO)),

Métricas de Desempeño	Métricas reportadas (Exactitud, Precisión, Sensibilidad, F1-score, mAP, coeficiente de uniformidad).
Componente Agronómico	Dosis de aplicación y tamaño de muestra (plantas, parcelas), finalidad (monitoreo/detección o aspersión/control fitosanitario),
Perspectiva Crítica	Principales limitaciones metodológicas, análisis económico/barreras de adopción y aportes principales.

Nota. Elaboración propia (2026).

2.5. Análisis de la Información mediante el Modelo TCCM.

Ateniéndose a los objetivos específicos definidos para esta revisión, la organización y el análisis del corpus científico seleccionado se realizaron a través del marco conceptual TCCM (Theory, Context, Characteristics and Methodology). Esta metodología permitió ordenar la información encontrada en cuatro dimensiones relacionadas entre sí.

- La dimensión Teoría (T): reunió los principales enfoques y conceptos que respaldan el uso de estas herramientas, destacando la agricultura 4.0, el manejo de precisión, los sistemas de detección remota y los algoritmos de visión artificial.
- El Contexto (C): tuvo en cuenta las condiciones en las que se desarrollaron los estudios, como la ubicación geográfica de los experimentos, las condiciones ambientales, las variedades de café evaluadas y la escala en la que se realizó el control fitosanitario.
- las Características (C): describieron los aspectos técnicos del hardware y el software, incluyendo las plataformas de vuelo, las bandas del espectro óptico utilizadas, las alturas de operación y los índices de vegetación calculados como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)
- la Metodología (M): reviso cómo se realizaron los estudios, viendo los diseños de campo, protocolos de laboratorio, métodos de captura de imágenes, y como se realizó la validación de los modelos.

2.6. Síntesis de la Evidencia.

Siguiendo las directrices metodológicas internacionales en el diseño de revisiones de alcance (Peters, y otros, 2020), este manuscrito no incluyo una evaluación formal de la calidad metodológica o el riesgo de sesgo para cada publicación. Por su parte la información obtenida de la matriz se organizó mediante un análisis cuantitativo sencillo, registrando la cantidad de publicaciones por año, los países de origen y los tipos de sensores más utilizados. Se complemento con una discusión cualitativa y comparativa a partir de los cuatro ejes del modelo TCCM, lo que permitió identificar con mayor claridad los vacíos tecnológicos que todavía limitan la modernización del sector cafetalero.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

El procesamiento y análisis de la información recopilada se realizó teniendo en cuenta las categorías establecidas previamente en la matriz de extracción. A partir de esta organización, se compararon los resultados de los 38 estudios seleccionados, tomando como referencia las cuatro dimensiones del modelo TCCM: Teoría, Contexto, Características y Metodología. De esta manera, se analizaron en conjunto los tipos de hardware aéreo utilizados, el desempeño de los algoritmos de visión computacional y los factores relacionados con el impacto agronómico y socioeconómico registrados en los estudios publicados entre 2016 y 2026.

3.1 Análisis de Identificación y Tipología de la Evidencia

Al relacionar las variables de identificación con el tipo de aporte de cada estudio, se encontró que 22 artículos, equivalentes al 57,9 %, se enfocan directamente en la evaluación o control del patógeno *Hemileia vastatrix* en cultivos de café. Los 16 estudios restantes, que representan el 42,1 %, aportan información de manera indirecta o que puede ser aplicada a este contexto. Estos trabajos se enfocan principalmente en el análisis de variables relacionadas con las hojas y la cobertura vegetal, cuyos resultados pueden adaptarse al estudio de la caficultura. En la Tabla 4 se presenta la distribución de los estudios de acuerdo con su ubicación geográfica y su tipo de aporte.

Tabla 4:

Consolidado de información, Elaboración propia.

Región	Evidencia Directa	Evidencia indirecta	Total, de publicaciones	Porcentaje datos bibliográficos (%)
Latinoamérica	14	5	19	50.0%
Asia	6	8	14	36.8%
África y Europa	2	3	5	13.2%
Total	**22**	**16**	**38**	**100.0%**

Nota. Elaboración propia (2026).

El hecho de que el 50 % de las publicaciones se concentre en Latinoamérica está relacionado con la importancia económica y sanitaria que tiene la roya del café en países productores como Colombia y Brasil. En cambio, los estudios realizados en Asia y Europa se enfocan principalmente en el desarrollo y mejoramiento de métodos de análisis. En estos trabajos se da mayor importancia al perfeccionamiento de los

algoritmos de visión artificial y de los programas computacionales, antes que a su comprobación directa mediante pruebas realizadas en campo.

3.2. Evaluación de Plataformas Tecnológicas, Sensores e Índices Espectrales

El análisis de las plataformas aéreas utilizadas muestra una mayor preferencia por los vehículos multirrotor en comparación con los de ala fija. Esto se debe a que los multirrotores ofrecen mayor estabilidad durante vuelos a baja altura y a velocidades controladas, lo que permite trabajar de manera más adecuada en terrenos complejos y en laderas montañosas, características comunes de las zonas donde se cultiva café.

En cuanto al hardware óptico, el dron DJI Phantom 4 Multispectral, equipado con un módulo de posicionamiento cinemático en tiempo real (RTK), se encuentra entre los equipos comerciales más utilizados. También se destacan sensores de nivel profesional, como la cámara MicaSense RedEdge, que permite captar de manera simultánea cinco bandas espectrales. Esto facilita diferenciar la información proveniente de las hojas de otros factores presentes en el terreno, como el suelo descubierto, los cambios en la iluminación y las sombras entre las hojas (Chebrolu, 2018).

En relación con las métricas espectrales, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es uno de los más utilizados para identificar cambios generales en el estado de la vegetación (Chebrolu, 2018). Sin embargo, cuando se trabaja con cultivos adultos y con una cobertura vegetal más densa, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI) y el Índice Verde de Resistencia Atmosférica (GARI) pueden ofrecer una mayor sensibilidad para identificar cambios de coloración en las hojas relacionados con las primeras etapas de una infección por hongos (Anfruns Espuña, 2023). En la Tabla 5 se comparan estas diferentes configuraciones y características de operación.

Tabla 5

Matriz comparativa de características técnicas de hardware y software óptico.

Atributo	Monitoreo multiespectral avanzado (Ramírez-Valencia, 2023) (Chebrolu, 2018)	Monitoreo óptico alternativo de bajo costo (Rejeb, 2022) (Espuña, 2023)	Detección autónoma integrada (Valdiviezo, 2026) (Sorte, 2020)

Arquitectura vehículo aéreo no tripulado (UAV)	Cuadricóptero DJI phantom 4 con posicionamiento cinemático en tiempo real (RTK)	Vehículo aéreo no tripulado (UAV) genérico o de bajo costo.	Drones autónomos comerciales de reconocimiento a baja altitud.
Sensor incorporado	MicaSence RedEdge profesional (5 bandas simultaneas del espectro)	Cámara comercial Canon S100 modificada (filtros ópticos red, green and blue (RGB) e infrarrojo cercano (NIR)	Sensor modular de color Pixy CMUCam5 integrado a placas ardruino 1
GSD (distancia de muestreo terrestre - tamaño de pixel)	Milimétrico operando en altitudes estrictas de 10 a 30 metros (Näsi, 2023)	Centimétrico condicionado por la calidad de lentes.	Limitado al rango de visión focal directa sobre el dosel de forma estática
Métrica de análisis	Índice de vegetación diferencial normalizada (NVDI) y el índice de vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI) – con calibración.	Índice verde de resistencia atmosférica (GARI) calcula vía algebra de mapas.	Atributos profundos de color y descriptores de textura superficial foliar (Sorte, 2020)
Entorno de soporte	Fotogravimetría masiva en Agisoft metashape y extracción algebraica en QGIS	Procesamiento simplificado mediante la calculadora Raster en software libre.	Ejecución e inferencia directa en microcontroladores integrados en el vehículo aéreo no tripulado (UAV)

Nota. Elaboración propia (2026).

3.3 Condiciones del componente agronómico y parámetros de aspersión

El análisis técnico de la aplicación de productos para el control de enfermedades en los cultivos muestra que una distribución más uniforme de los insumos puede ayudar a mejorar las dificultades de cobertura que se presentan con el método manual tradicional, realizado con bomba de espalda (Rajashekhar, 2025; Rodriguez, 2025).

De acuerdo con los diseños factoriales analizados (Alvarenga, 2024; Silva, 2024; Souza, 2022), la capacidad del producto para llegar a las diferentes partes de las hojas depende principalmente de la combinación de tres variables: la altura de vuelo, que se encuentra entre 2,5 y 4,0 m; la velocidad de desplazamiento, entre 12 y 15 km/h; y el volumen de aplicación, entre 8 y 20 L/ha. La Tabla 6 presenta el comportamiento de estos parámetros y permite comparar cómo influyen en la aplicación.

Tabla 6

Parámetros Aerodinámicos y Agronómicos en los Flujos de Aspersión Automatizada con UAV

Variable metodológica	**Enfoque factorial de cobertura (Alvarenga, 2024).**	**Enfoque de volumen y velocidad de vuelo (Silva, 2024)**	**Enfoque altitudinal y relieve complejo (Souza, 2022)**
Vehículo aéreo no tripulado (UAV) utilizado	Dron pulverizador industrial DJI Agras T10/T16.	Vehículo aéreo no tripulado (UAV) multirrotor con tanques de aspersión automatizados	Vehículo aéreo no tripulado (UAV) de aspersión pesada acoplado a radares altimétricos seguidores de terreno.

Edad del cafeto (Dosel)	Evaluación de copas superiores de árboles con alta densidad en cultivos comerciales consolidados.	Ensayos controlados en plantaciones de café entre 2.5 años y 6.5 años de edad.	Plantaciones localizadas en laderas montañosas de pendientes variables e irregulares
Altura de vuelo (m)	Manteniendo una altura fija baja para mitigar la deriva del viento	Ajustada de manera constante para optimizar la corriente de aire.	Configuración comparativa en tres niveles exactos de: 2.5 m,3.0 m y 4.0 m de altura.
Velocidad de avance	Tasas estables para garantizar la uniformidad en bloques factoriales al azar.	Evaluación estratégica combinando velocidades específicas de 12 Km/h y 15 Km/h.	Velocidades moderadas coordiandas con la lectura de los sensores en terreno.
Volumen de aplicación	Ensayos con tasas de aplicación dosificadas en 8 L/ha, 12 L/ha y 16 L/ha.	Cuatro volúmenes analizados de forma matemática: en 8 L/ha, 12 L/ha y 16 L/ha. De mezcla final.	Descarga orientada a medir el espectro de la gota en la zona superior e inferior del eje vertical.
Arquitectura de boquilla	Bloque factoriales 4x3 usando boquillas XR 110-01, TT110-01, AIXR 110-015 y TTJ60 110-02.	Boquillas hidráulicas de abanico plano y de inducción de aire. (anti deriva)	Boquillas de cono hueco o abanico optimizadas para generar turbulencias foliares

Conclusión	El tipo de boquilla y la tasa afectan directamente el porcentaje de gotas/cm^2 retenidas en la copa.	Volúmenes de 16 a 20 L/ha penetran el dosel denso en cafetos adultos al usar el vórtice de las hélices.	La altura de 2.5 m a 3.0 metros maximiza el impacto de la gota en el envés de la hoja del café.

Nota. Elaboración propia (2026).

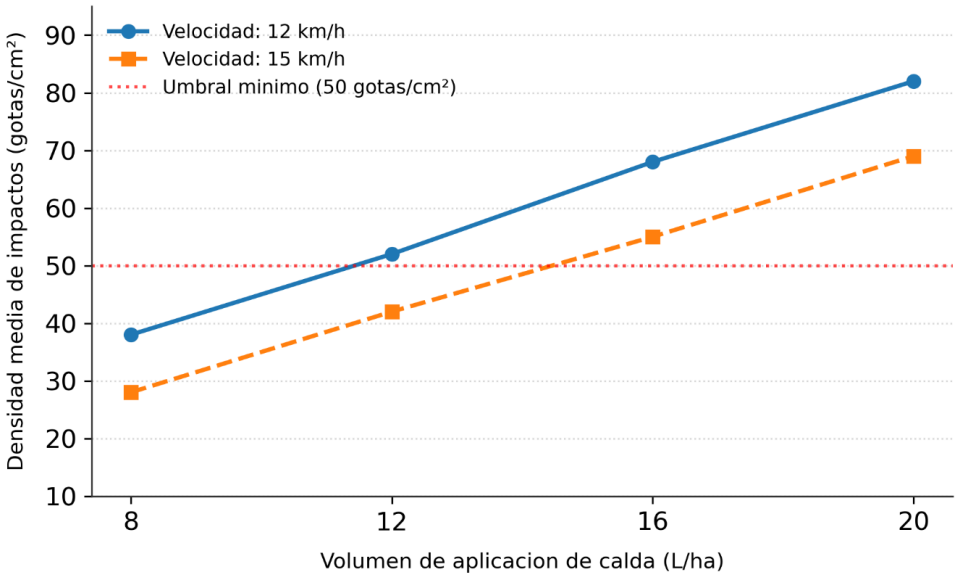
Esta calibración se debe a que el dosel del café incrementa su densidad foliar según su edad. Regular la velocidad de avance a rangos moderados (12 a 15 Km/h) es vital para aprovechar el flujo de aire descendente generados por los rotores del vehículo aéreo no tripulado (UAV) llamado efecto vórtice, (Silva, 2024; Souza, 2022).

Este empuje aerodinámico abre el follaje de cafetos adultos, permitiendo que la nube de pulverización alcance el tercio inferior e intermedio de la planta. Esto garantiza una adecuada densidad de gotas en el envés de las hojas, espacio anatómico donde el patógeno "*H. vastatrix"* inicia el proceso de invasión celular. Para estas tareas en entornos comerciales, la literatura valida la eficiencia de equipos industriales robustos como el DJI Agras T10, provisto de un caudal máximo de aspersión de 1.8 L/ha.

La siguiente grafica representa la interacción de estas variables sobre la densidad de impactos foliares.

Figura 1

Interacción entre el Volumen de Calda Aplicado y la Velocidad de Vuelo del UAV sobre la Densidad de Deposición Foliar.



Nota. La línea roja punteada indica el nivel técnico necesario para lograr una distribución uniforme del producto en la parte inferior de las hojas del cafeto, de acuerdo con los modelos factoriales analizados. Adaptado de Silva (2024) y Alvarenga (2024).

3.4 Análisis computacional y métricas de desempeño diagnostico

Al analizar los métodos computacionales y las métricas de desempeño utilizadas en los estudios revisados, se encontró que las redes neuronales convolucionales (CNN) son las más utilizadas para el procesamiento de las imágenes. Una de sus principales ventajas es que pueden identificar directamente características relacionadas con las texturas y formas presentes en las imágenes, tanto en los ortomosaicos como en las fotografías convencionales en rojo, verde y azul (RGB) (Valdiviezo, 2026; Sorte, 2020).

En cuanto a los resultados obtenidos, los modelos desarrollados con la arquitectura ResNet-50 alcanzaron una exactitud del 95,4 % en la clasificación del estrés causado por factores biológicos. Además, lograron una precisión del 86,5 % al estimar la gravedad y extensión del daño presente en las hojas (Esgario, 2020).

La siguiente tabla presenta las principales ventajas de estos modelos, así como las limitaciones identificadas en los algoritmos analizados durante la revisión.

Tabla 7

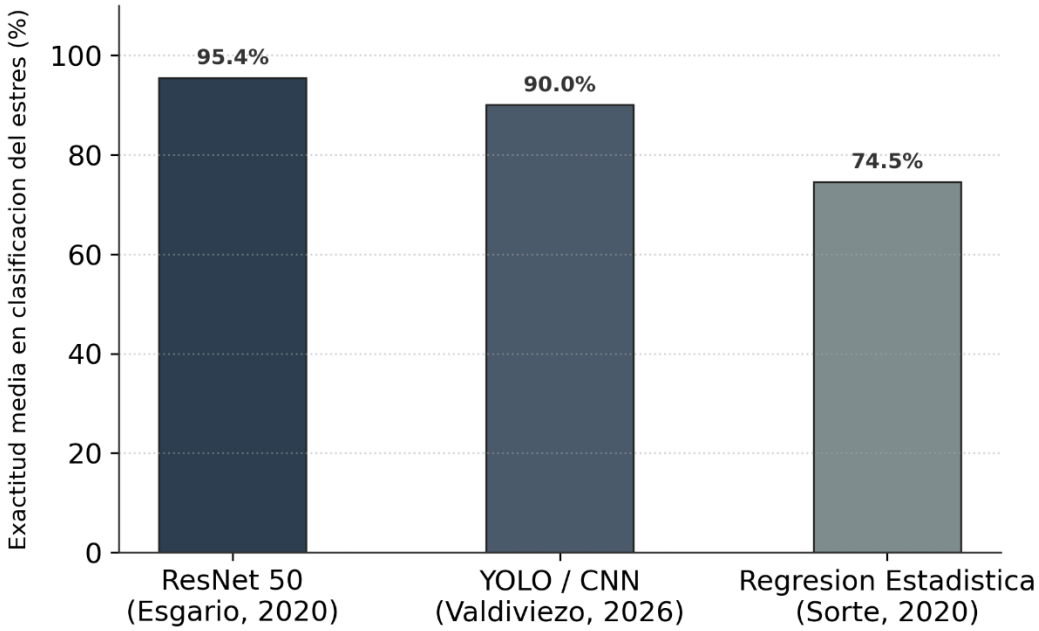
Comparativa Analítica de Modelos de Aprendizaje Profundo e Indicadores de Rendimiento Diagnóstico

Algoritmo	Arquitectura ResNet 50 (Esgario, 2020)	Modelos YOLOv5 optimizados (Sun, 2024) (Valdiviezo, 2026)	Algoritmos estadísticos de regresión (Sorte, 2020)
Datos de entrada	Datos multidimensionales complejos basados en imágenes hiperespectrales y RGB (rojo, verde, azul).	Flujo continuo de imágenes en video capturadas en tiempo real por el vehículo aéreo no tripulado (UAV).	Variables tabulares de microclima y datos tabulares indexados.
Rendimiento	95.4% de exactitud en tasas de estrés biótico, 86.5 % en estimación de severidad	Tasas de detección autónoma de múltiples patógenos superiores al 90% de precisión.	Coeficientes de correlación estables, pero con baja adaptabilidad ante datos no lineales.
Fortaleza científica	Excelente capacidad para aprender de forma automática atributos espaciales finos de la hoja	Procesamiento masivo e inmediato sin retrasos temporales provocados por latencia de red.	Alta interpretabilidad matemática y menor demanda de poder computacional.
Limitación técnica	Requiere hardware de procesamiento grafico (GPU) de alto rendimiento para el entrenamiento.	Sensible a falsos positivos debido a variaciones abruptas de luz o sombras de árboles.	Incapaz de segmentar o localizar evidencias específicas del hongo en el tejido foliar.

Nota: Elaboración propia (2026).

Figura 2

Métricas de Exactitud Comparativas entre Arquitecturas de Aprendizaje Profundo y Modelos Estadísticos Tradicionales.



Los valores porcentuales representan la tasa de éxito media en la detección y clasificación del estrés biótico en la hoja del café reportada por el corpus documental analizado. Adaptado de (Esgario, 2020; Sorte, 2020; Valdiviezo, 2026).

El proceso utilizado para convertir las imágenes obtenidas mediante fotografías aéreas en datos que puedan ser medidos requiere seguir una serie de pasos después de realizar la captura. Primero, las imágenes se organizan y alinean mediante programas especializados, como Agisoft Metashape, con el fin de generar ortomosaicos corregidos y reducir las posibles distorsiones presentes en las fotografías (Anfruns Espuña, 2023).

Este proceso también permite enfrentar algunas de las dificultades que presenta el uso de imágenes satelitales en las zonas cafeteras con terrenos muy inclinados. En estos lugares, la presencia frecuente de nubes y la baja resolución de las imágenes pueden dificultar la obtención de información detallada, mientras que el uso de imágenes tomadas desde drones permite obtener datos con mayor nivel de detalle (Li, 2026).

3.5. Perspectiva critica: Limitaciones metodológicas, impacto económico y barreras de adopción.

El último elemento de la matriz metodológica pone en evidencia una gran brecha entre los resultados en entornos controlados y las condiciones de los sistemas de producción de las fincas tradicionales.

3.5.1 Restricciones técnicas y de infraestructura

El principal problema de estos modelos es que no funcionan bien en situaciones reales porque se ven afectados por la interferencia de las sombras, la inclinación de las laderas y los cambios de color causado por desequilibrios nutricionales (Delavarpour, 2021; Sadeghian K., 2022). Además, la ausencia de internet en el campo fuerza al traslado manual de las tarjetas de memoria del dron a la ciudad, retrasando los reportes y permitiendo que la roya se propague antes de actuar (Rodriguez, 2025).

Por otro lado, la operación en montaña eleva los costos fijos por el rápido deterioro de las baterías en terrenos empinados (Nahiyoon, 2024). A esto se suma que el calor evapora el insumo en el aire, por lo que se hace necesario gastar en aceites especiales para que la gota caiga en las plantas (Silva, 2024). Estas tareas económicas, restringen la tecnología a grandes predios dejando fuera a pequeños productores

3.5.2. Balance financiero e indicadores de adopción agroindustrial

La principal barrera de adopción tecnológica para modernizar el campo es la falta de capital de inversión ya que armar un equipo básico para revisar los cultivos desde el aire, comprando un dron como el DJI Phantom 4 Multispectral, exige una inversión inicial de unos $23.800.000 COP, según los datos de Delavarpour (2021). Pero la situación se complica si se quiere pasar a la fumigación automatizada con un equipo como el DJI Agras T16; ahí el costo se eleva hasta los $107.000.000 COP. Esta realidad económica crea un cuello de botella operativo que de forma inmediata excluye el acceso a los pequeño caficultor (Nahiyoon, 2024).

A pesar de estos precios tan altos los estudios demuestran que la tecnología se paga sola a largo plazo al cruzar diferentes indicadores en el terreno (Rejeb, 2022). Las pruebas recopiladas por Delavarpour (2021), confirman que el monitoreo inteligente y la aspersión con drones devuelven cada peso invertido mediante tres vías de ahorro muy claras:

- **Insumos químicos**: Reducción verificada entre el 10% y el 30%en las dosis de agroquímicos y fertilizantes aplicadas debido a la eficiencia de aspersión.
- **Eficiencia hídrica:** Ahorro en el consumo de agua entre el 40% y un 80% en comparación con el volumen exigido por las mezclas de bombas tradicionales.
- **Rendimiento comercial**: Mitigación oportuna del estrés fitosanitario, lo que se traduce en incrementos directos de la productividad final del lote entre 30% y el 60%.

Por lo tanto, la adopción de drones no desplaza las practicas agronómicas tradicionales de conservación, sino que actúa como un complemento técnico de ingeniería de alto retorno económico (Deguine, 2021), Para disolver el cuello de botella financiero, los hallazgos de esta revisión de alcance sugieren la urgencia de reconfigurar los modelos de negocio del sector cafetero (Nahiyoon, 2024).

Es prioritario incentivar políticas de crédito agropecuario, capacitación técnica rural directa en veredas y, fundamentalmente, la conformación de esquemas asociativos

cooperativos que democraticen la propiedad y el beneficio operativos colectivo de estas tecnologías de la agricultura 4.0. (Rodriguez, 2025).

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

La realización de esta revisión de alcance permitió concluir que la incorporación de las herramientas de la agricultura 4.0 transforma la gestión fitosanitaria de la roya del café (Hemileia vastatrix) al reemplazar los monitoreos visuales tradicionales por un modelo predictivo, preventivo y automatizado. El uso de cámaras especiales montadas en drones permite descubrir si la planta está enferma al notar la pérdida de color en las hojas, mucho antes de que las manchas amarillas de la enfermedad sean visibles en el campo. Al momento de aplicar los tratamientos, el viento fuerte que empujan las hélices del dron funciona como un soplador que abre las ramas de los cafetos grandes. Esto hace que las gotas de la mezcla bajen y mojen muy bien la parte de atrás de las hojas, que es justo el escondite exacto donde el hongo empieza a contagiar el cultivo. Esta fumigación de precisión ahorra mucha agua y evita el desperdicio de químicos que siempre se da con las fumigadoras de espalda tradicionales, lo que al final mejora la cosecha. Sin embargo, comprar estos aparatos comerciales genera un freno económico gigante en las zonas rurales ya que los precios son inalcanzables para el bolsillo de un pequeño campesino. Por eso la solución real no es que cada agricultor compre un equipo de forma individual, sino armar asociaciones y cooperativas en las veredas para compartir los costos, además de apostar por el desarrollo de programas de computador gratuitos y herramientas de código abierto para que la tecnología no deje por fuera a nadie.

4.2. Recomendaciones

A partir de estos hallazgos, sugerimos tres rutas de acción que integran la ingeniería agroindustrial con el desarrollo rural. La meta principal es sacar estas tecnologías de los ambientes experimentales y ponerlas a prueba en el mundo real, justo bajo las condiciones y retos diarios que enfrenta el caficultor.

4.2.1. Apostar por tecnologías de bajo costo y hardware abierto: Una excelente oportunidad de investigación es construir y evaluar drones usando piezas económicas y placas de código abierto, como Arduino o Raspberry Pi. Para observar las plantas, se pueden ensayar cámaras RGB adaptadas o sensores de color sencillos (como la PixyCam). Aquí el objetivo no es únicamente gastar menos dinero, sino investigar a fondo si estos sistemas alternativos son verdaderamente precisos. Hace falta comprobar cómo responden al clima de las fincas, si aguantan la topografía montañosa y qué tan fácil resulta su mantenimiento, para así poder garantizarle al productor que es una inversión útil.

4.2.2. Crear manuales guiados para el uso de software gratuito: Es imperativo diseñar protocolos y manuales de alfabetización digital basados exclusivamente en herramientas de sistemas de información geográfica de software libre (como QGIS). Enseñar a los estudiantes, asociaciones agrarias y extensionistas locales a procesar ortomosaicos y ejecutar el álgebra de mapas mediante la calculadora Raster para extraer métricas de vigor (NDVI o GARI) mitigará los altos costos de licencias privadas, logrando esquemas de monitoreo autogestionados por las propias comunidades.

4.2.3. Llevar el aprendizaje directamente a las zonas productoras: Se recomienda a las instituciones de educación superior impulsar alianzas estratégicas con cooperativas de caficultores para implementar parcelas demostrativas en las veredas. A través de capacitaciones prácticas de campo, se debe demostrar la calibración aerodinámica in situ y promover modelos de economía asociativa (propiedad colectiva del dron de aspersión) como la única vía sostenible para cerrar la brecha tecnológica y asegurar la competitividad fitosanitaria del agro colombiano.

BIBLIOGRAFÍA

Alvarenga, C. B. (2024). Application rate and hydraulic tips used in remotely piloted aircraft affect the phytosanitary products in coffee plant canopies. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 9.

Anfruns Espuña, L. (2023). Precision agriculture with drones to control diseases in the rice plant. *GeoFocus*, 9.

Barraza, J. A. (2019). Precision agriculture with drones to control diseases in the rice plant. *Revista Especializada de la Universidad Tecnologica de Panama*, 4.

CENICAFE. (2017). *Síntomas visuales de deficiencias nutricionales en café: Diagnóstico y manejo.* Manizales, Colombia.: Centro Nacional de Investigaciones.

Chebrolu, N. L. (2018). Agricultural robot dataset for plant classification, localization and mapping on coffee plantations using UAV imagery. *The International Journal of Robotics Research*, 1545-1558.

Deguine, J. P. (2021). Integrated pest management - good intentions, hard realities. A review. *Agronomy for Sustainable Development, International Rice Research Institute*, 20.

Delavarpour, N. K. (2021). A technical review on unmanned aerial vehicles, remote sensors, and UAV-based commercial technologies in precision agriculture. *Agronomy Journal*, 3038-3058.

Esgario, J. G. (2020). Deep learning for classification and severity estimation of coffee leaf biotic stress. *Computers and Electronics in Agriculture*, 3.

Espuña, A. (2023). Use and implementation of RGB and multispectral sensors installed in drones for the monitoring of coffee crops. *GeoFocus. International Review of Geographical Information Science and Technology*, 23.

Getahun, S. (2014). Application of Precision Agriculture Technologies for Sustainable Crop Production and Environmental Sustainability: A Crop Production and Environmental Sustainability: ACrop Production and Environmental Sustainability: A Systematic Review. *The Scientific World Journal*, 3.

Gikunda, K. (2024). Harnessing Artificial Intelligence for Sustainable Agricultural Development in Africa: Opportunities,Challenges, and Impact. *Computers and Society - University of Technology, Kenya*, 8.

Guerrero-Arias, A. D.-V.-S.-C. (2020). Precision techniques and agriculture 4.0 technologies to promote sustainability in the coffee sector: State of the art, challenges and future trends. *IEEE Access*, 144580-144595.

Hassanalian, M. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones_ A review. *Department of Mechanical and Aerospace Engineering, New Mexico State University*, 3.

Klerkx, L. J. (2019). A review of social and cyber-physical aspects of digital agriculture, smart farming and Agriculture 4.0. *Agricultural Systems*, 39-52.

Kouadio, L. B. (2021). A Review on UAV-Based Applications for Plant Disease Detection and Monitoring. *MDPI*, 6.

Li, S. (2026). Feeding 10 billion people in 2050 with cropland expansion limitation: From remote sensing to smart agriculture. . *European Journal of Agronomy*, 4.

Liu, Y. (2021). From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current Status, Enabling Technologies,and Research Challenges. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS, VOL. 17*, 6.

Maddikunta, P. K. (2021). Unmanned Aerial Vehicles in Agriculture: A Review of Perspective of Platform, Control and Applications. *IEEE Access, 9*, 104112-104135.

Management, The Role of AI-Integrated Drone Systems in Agricultural Productivity and Sustainable Pest. (2026). *Department of Systems and Control Engineering, School of Engineering, Institute of Science Tokyo*, 18.

Meng, Y. (2020). Experimental evaluation of UAV spraying for peach trees of different shapes: Effects of operational parameters on droplet distribution. *Computers and Electronics in Agriculture*, 6.

Nahiyoon, S. A. (2024). Recent Development Trends in Plant Protection UAVs_ A Journey from Conventional Practices to Cutting Edge Technologies A Comprehensive Review. *A comprehensive review Drones*, 8.

Näsi, R. (2023). Can Basic Soil Quality Indicators and Topography Explain the Spatial Variability in Agricultural Fields Observed from Drone Orthomosaics? *Department of Agricultural Sciences, University of Helsinki*, 3.

Peters, M. D., Marnie, C., Tricco, A. C., Pollock, D., Munn, Z., Alexander, L., . . . Khalil, H. (2020). Updated methodological guidance for the conduct of scoping reviews. *JBI Evidence Synthesis, 18*(10), 2119-2126. Obtenido de https://doi.org

Prasangini, N. (2026). Detection of green tea buds and spatial mapping using low-altitude UAV imagery and object detection models. *Department of Biosystems Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University*, 5.

Rajashekhar, M. (2025). HIGH-FLYING HARVEST: LEVERAGING DRONES FOR AGRICULTURAL ADVANCEMENTS. *Indian Journal of Entomology*, 3.

Ramírez-Valencia, J. A.-M.-P. (2023). Coffee crops analysis using UAVs equipped with multispectral cameras and machine learning algorithms. *Smart Agricultural Technology, 4*, 100-115. Obtenido de https://doi.org

Rejeb, A. A. (2022). Drones in agriculture: A review and bibliometric analysis. *Smart Agricultural Technology*, 100043-100060.

Rodriguez, D. (2025). Revisión sistemática y análisis de contenido web de la agricultura 4.0 para el mejoramiento del sector cafetero con énfasis en los pequeños productores. *Revista de Ciencias de la Administración y Economía*, 7.

Sadeghian K., M. M. (2022). *Acumulacion de Nitrogeno, Fosforo y Potacio en los frutos del cafe.* Manizales, Colombia.: Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé.

Silva, J. E. (2024). Impact of Spray Volume and Flight Speed on the Efficiency of Drone Applications in Coffee Plants of Different Ages. *Smart Agricultural Technology*, 9.

Sorte, L. (2020). Coffee leaf disease recognition based on deep learning and texture attributes. *Procedia Computer Science*, 3.

Souza, F. G. (2022). Impact of sprayer drone flight height on droplet spectrum in mountainous coffee plantation. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2.

Sun, C. (2024). Advancing UAV Communications: A Comprehensive Survey of Cutting-Edge Machine Learning Techniques. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 8.

Tricco, A. C., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K. K., Colquhoun, H., Levac, D., . . . Straus, S. E. (2018). PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation. *Annals of Internal Medicine, 169*(7), 467-473. Obtenido de https://doi.org

Valdiviezo, J. J. (2026). Remote sensing and artificial intelligence for crop pest and disease monitoring. . *Smart Agricultural Technology*, 10.

Yuanyuan Yang, L. (2026). *Recent advances in crop pest detection,forecasting and early warning: Areview.* Beijing,China: NationalEngineeringResearch Center for InformationTechnology in Agriculture.

Zhai, Z. M. (2020). Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 105256.

Zhang, C. (2024). Feasibility assessment of tree-level flower intensity quantification from UAV RGB imagery: A triennial study in an apple orchard . *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2.