

DRONES EN LA GESTIÓN DE INCENDIOS FORESTALES: ESTRATEGIAS AVANZADAS PARA LA DETECCIÓN TEMPRANA Y PREVENCIÓN DE INCENDIOS EN ÁREAS VULNERABLES DE COLOMBIA.

Gisela Home Ballesteros¹
giselahome@usantotomas.edu.co

Yamile Johanna Ramos Castillejo²
yamileramos@usantotomas.edu.co

Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia

RESUMEN

El incremento en la frecuencia de incendios forestales plantea un desafío significativo tanto ambiental como social en Colombia. Factores como el cambio climático y la expansión de actividades humanas han intensificado la ocurrencia de estos eventos, afectando no solo la biodiversidad, sino también a las comunidades locales. En el presente artículo se examina el uso de drones como herramienta clave para la detección temprana y gestión de incendios en áreas vulnerables del país. A través de una revisión exhaustiva de la literatura científica disponible en bases de datos académicas, se identificaron avances en la integración de drones con sistemas de inteligencia artificial y con el Internet de las Cosas (IoT), tecnologías que permiten realizar monitoreos en tiempo real y emitir alertas automáticas. Estas alternativas contribuyen a optimizar la respuesta ante emergencias y a reducir los costos operativos. Los resultados destacan la eficacia de los drones en la identificación de focos de incendio, proponiéndolos como una solución accesible y sostenible para gestionar riesgos en zonas de difícil acceso. El artículo subraya la importancia de incorporar estas tecnologías en las políticas de gestión ambiental en Colombia y sugiere futuras investigaciones enfocadas en mejorar la precisión y autonomía de los drones para una respuesta efectiva frente a incendios forestales.

Palabras clave: Cambio climático, deforestación, incendios forestales, drones.

ABSTRACT

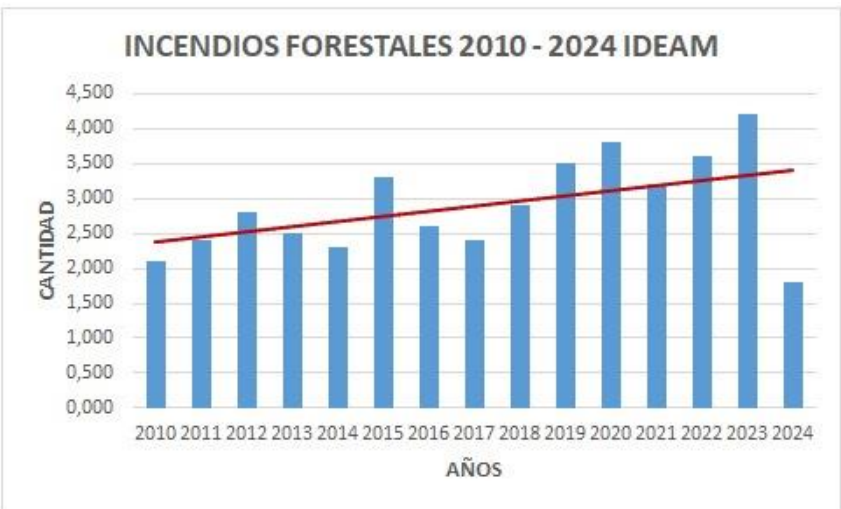
The increase in the frequency of forest fires poses a significant environmental and social challenge in Colombia. Factors such as climate change and the expansion of human activities have intensified the occurrence of these events, affecting not only biodiversity, but also local communities. This article examines the use of drones as a key tool for the early detection and management of fires in vulnerable areas of the country. Through an exhaustive review of the scientific literature available in academic databases, advances were identified in the integration of drones with artificial intelligence systems and the Internet of Things (IoT), technologies that allow real-time monitoring and issuing automatic alerts. These alternatives contribute to optimizing emergency response and reducing operating costs. The results highlight the effectiveness of drones in identifying fire outbreaks, proposing them as an accessible and sustainable solution to manage risks in hard-to-reach areas. The article highlights the

importance of incorporating these technologies into environmental management policies in Colombia and suggests future research focused on improving the precision and autonomy of drones for an effective response to forest fires.

Keywords: Climate change, deforestation, forest fires, drones.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el aumento de los incendios forestales ha emergido como un desafío ambiental significativo a nivel mundial, y Colombia se ha visto afectada de manera notable tal como se puede observar en la gráfica 1 (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2023). La interacción de factores como el cambio climático, la expansión de las actividades humanas y el aumento de la temperatura global ha propiciado un incremento en la frecuencia y severidad de estos incendios. Según el IDEAM, en los últimos diez años, Colombia ha experimentado un incremento del 35% en la ocurrencia de incendios forestales, fenómeno que compromete no solo la biodiversidad de los ecosistemas, sino también la seguridad y sostenibilidad de las comunidades cercanas a las zonas afectadas. Estos incendios no solo destruyen áreas naturales esenciales, sino que también aumentan las emisiones de gases de efecto invernadero, exacerbando así los efectos del cambio climático (IDEAM, 2023).



Gráfica 1. Incendios Forestales 2010 – 2024. **Fuente:** IDEAM

Frente a esta situación, la implementación de tecnologías avanzadas como los drones se plantea como una estrategia prometedora para la detección temprana y la gestión de incendios forestales. Diversas investigaciones indican que el uso de drones en la vigilancia ambiental ha crecido aproximadamente un 40% en la última década, permitiendo una detección y evaluación precisa y rápida de las áreas afectadas (IDEAM, 2023). Los drones brindan una plataforma eficaz para el monitoreo aéreo en tiempo real, lo que no solo mejora la capacidad de respuesta ante emergencias, sino que también reduce significativamente los costos operativos, convirtiéndolos en una alternativa viable para las instituciones encargadas de la gestión de incendios forestales.

Este artículo tiene como objetivo revisar estudios recientes sobre el uso de drones en la detección y manejo de incendios forestales a nivel nacional e internacional, evaluando su efectividad e impacto en la conservación de ecosistemas vulnerables y en la protección de las comunidades expuestas a estos eventos. Los hallazgos resaltan la importancia de integrar esta tecnología en las políticas de manejo de incendios del país, tomando en cuenta tanto su viabilidad económica como sus beneficios para la sostenibilidad ambiental.

METODOLOGIA

Para llevar a cabo la recolección de información de este artículo de revisión, se realizó una búsqueda en diferentes bases de datos académicas como Scopus, Google académico, Springer link, ScienceDirect, entre otros. El criterio para la clasificación y selección de los diferentes artículos escogidos fue el uso de naves no tripuladas, o drones como instrumentos claves para generar alertas tempranas en la aparición de incendios forestales alrededor del mundo. Los pasos utilizados para llegar a la información requerida fueron los siguientes:

1. Definición de palabras clave
2. Formulación de la ecuación de búsqueda
3. Depuración y filtración de la información
4. Selección de la base de datos
5. Estudio y comparación de la bibliografía obtenida

Con el fin de mejorar la comprensión del método utilizado, a continuación, se encontrarán clasificados los temas en diferentes secciones en las cuales se explicará de manera detallada cada uno de los pasos que comprenden el procedimiento de selección para esta revisión bibliográfica, las etapas a describir son las siguientes: Definición y formulación, depuración, selección de la base de datos y análisis de datos, este análisis será presentado más adelante en este documento.

Definición de palabras claves

Basados en el título de nuestro proyecto “Insertar título” se escogieron las diferentes palabras claves que llevarían a obtener los distintos artículos correspondientes al tema, estas se presentan en la siguiente tabla.

Palabras Clave	Key words
Incendios	Fire
Forestales	Forest
drones	Drone
detección	Detection
temprana	Early

Tabla 1. Definición de palabras clave. **Fuente:** elaboración propia

Una vez definidas las palabras claves se procede a generar la ecuación de búsqueda en las diferentes bases de datos científicas como Scopus, Science Direct, Google académico, entre otras. Las primeras ecuaciones de búsqueda generaron resultados de alrededor de 186 artículos, razón por la cual se modificaron las palabras claves y se ajustaron al tema requerido, el resultado de este ajuste se muestra en la tabla uno.

Depuración

Con el ajuste de las palabras claves se logró disminuir el número de artículos, sin embargo, los resultados obtenidos no mostraron un ajuste completo al tema requerido por lo que se realizó una filtración de la información a través de criterios específicos de inclusión y limitación.

El primer criterio de inclusión que mostró los mejores resultados fue “AND”, al introducir esta palabra en las ecuaciones de búsqueda se obtuvieron artículos que tenían un ajuste mayor al tema de revisión, sin embargo, en bases de datos como Scopus se pudo apreciar una semejanza considerable al delimitar la búsqueda de información sólo a las palabras clave, es decir, que en lugar de buscar las palabras en todo el documento, incluyendo el título y el resumen, se mostraran solo aquellos que tuvieran la información dentro de sus palabras clave.

Finalmente, se incluyeron criterios de limitación en donde se demarco la búsqueda a temas como “drones”, “riesgos de incendios”, “vehículos aéreos no tripulados”, “UAV”, “detectores de incendios” y “monitoreo de incendios forestales”, esta delimitación logró reducir el número de artículos a 31 los cuales fueron publicados entre 2010 y 2023. La ecuación de búsqueda utilizada se encuentra en la siguiente tabla.

“fire” AND “forest” AND "drone" AND “early” AND “Detection” (LIMIT-TO ("UAV", "fire forest detection", “drone”, “fire risk”))
--

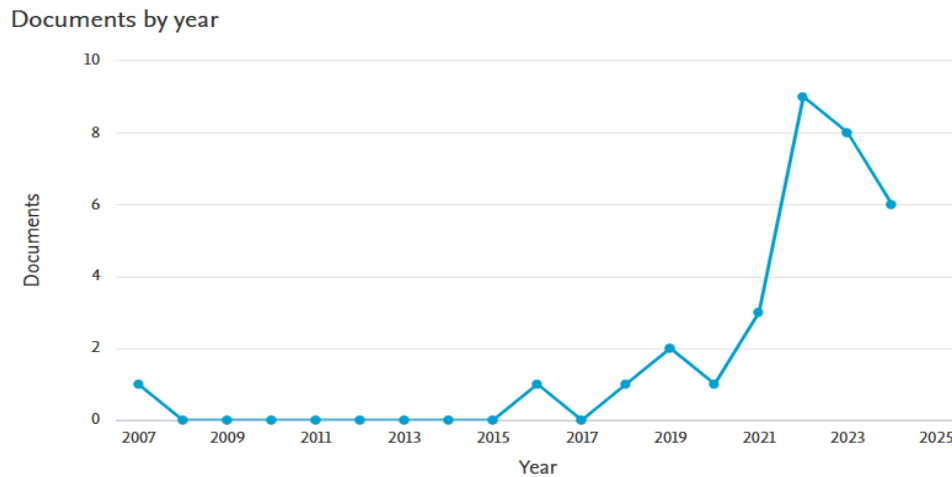
Tabla 2. Ecuación de búsqueda. **Fuente:** elaboración propia

Selección de la base datos

El proceso de búsqueda se llevó a cabo en distintas bases de datos científicas disponibles como: Science direct, Springer link, Google académico y Scopus, la búsqueda arrojó más de 100 artículos, sin embargo a la hora de realizar el proceso de depuración, la base de datos que permite agregar los criterios necesarios para la delimitación de los artículos fue Scopus, razón por la cual se escogió como la principal fuente de búsqueda de esta revisión, el resultado obtenido es el que se menciona en el proceso de depuración, 31 artículos cuya publicación se encuentra entre el 2010 y 2023 los cuales tienen un mayor ajuste al tema de este documento.

Análisis de datos

A continuación, se muestran las gráficas de los resultados obtenidos de la búsqueda en la base de datos Scopus, aquí podremos apreciar tendencias de investigación asociadas a los años de desarrollo del tema en cuestión y los países donde más se han llevado a cabo investigaciones.



Gráfica 2. Documentos encontrados por años. **Fuente:** elaboración propia

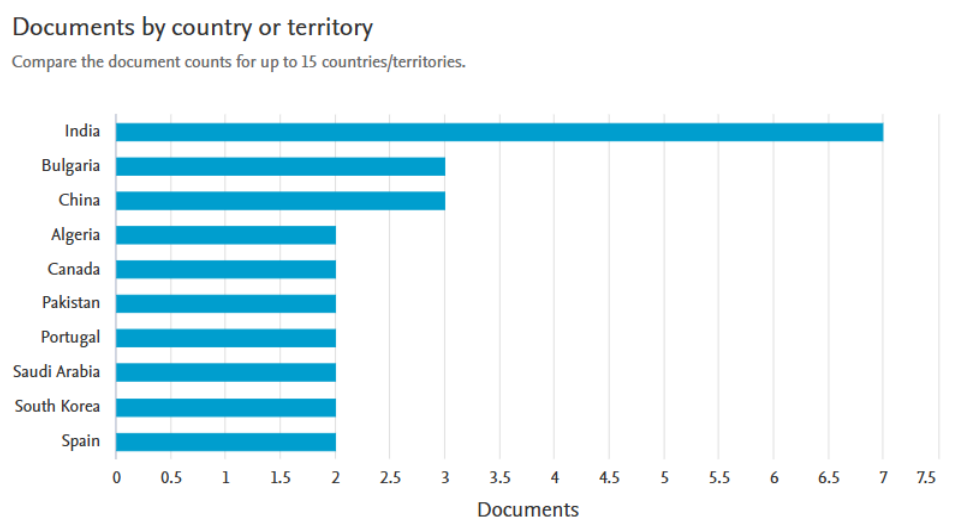


Imagen 3. Documentos encontrados por país. **Fuente:** elaboración propia

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

El análisis de los artículos seleccionados revela varias herramientas clave utilizadas para implementar estrategias ambientales mediante el uso de drones. En el artículo de Sabino et al. (2024) se propone un sistema de monitoreo de incendios forestales basado en vehículos aéreos no tripulados y computación en el borde, evaluando su desempeño a través de redes de Petri estocásticas (SPN). Este sistema se enfoca en la detección temprana de incendios utilizando cámaras integradas en drones para recolectar datos en tiempo real, los cuales se procesan en servidores de borde. De esta manera, se evita la dependencia de la conectividad central, proporcionando respuestas rápidas y eficaces en áreas

vulnerables. Las redes SPN se emplean para medir el tiempo de respuesta, la tasa de descarte de datos y la utilización de recursos, demostrando la eficiencia del sistema para monitorear grandes extensiones de terreno.

Además, el análisis de sensibilidad y el diseño experimental (DoE) permiten identificar factores que optimizan el rendimiento del sistema, como el número de núcleos de procesamiento y la capacidad de la cola de datos. Estos hallazgos facilitan el ajuste dinámico de los recursos, permitiendo la mejora continua de las respuestas ante emergencias por incendios forestales. Otro aspecto relevante del artículo es la integración de variables ambientales, como la temperatura y el viento, que influyen en la propagación de los incendios. Esta capacidad de adaptación a las condiciones cambiantes del entorno brinda una herramienta avanzada y sostenible para la prevención y detección temprana de incendios, contribuyendo a la protección de ecosistemas vulnerables.

En el artículo de Majli Jaafar, Dharmesh Dhabhi y Al-Farouni (2024) sobre el uso de inteligencia artificial (IA) e Internet de las cosas (IoT) para un sistema ambiental inteligente en incidentes de intrusión e incendio, se presenta un sistema avanzado de vigilancia que utiliza drones, IA e IoT para detectar incendios y otros eventos críticos. Los drones están equipados con cámaras térmicas y RGB para identificar fuentes de calor y señales tempranas de incendio, utilizando modelos de aprendizaje profundo como ResNet, VGGNet, MobileNet, AlexNet y GoogLeNet. Además, el sistema emplea optimización de trayectoria (PSO) para guiar a los drones en la contención estratégica de incendios. Esta metodología permite la detección automatizada en tiempo real de sucesos críticos y el envío de alertas a bomberos y autoridades, facilitando una respuesta rápida ante emergencias.

Asimismo, los drones monitorean la calidad del aire y otros factores ambientales, lo cual ayuda a evaluar el riesgo de incendios y la seguridad en áreas vulnerables. Gracias a las capacidades de IA, el sistema muestra una alta precisión en la detección de incendios y una baja tasa de alertas falsas. También se analiza el uso de drones con el modelo de detección YOLOv5, personalizado para identificar seres vivos y detectar incendios en tiempo real, particularmente en zonas de difícil acceso. Mediante la tecnología IoT, esta estrategia proporciona una vigilancia eficaz al enviar alertas inmediatas a los equipos de emergencia, mejorando significativamente la capacidad de respuesta temprana ante incendios forestales.

En el artículo de Srinath, Sri Sathya, Raguvaran, Vachan Girish y Sriram (2024) se destaca la importancia crucial de implementar estrategias efectivas de respuesta de emergencia para mitigar el impacto de los incendios forestales en poblaciones humanas y animales. El modelo YOLOv5 fue ajustado para optimizar la precisión desde vistas aéreas, logrando una precisión media (mAP) de 0.828, lo que demuestra su eficacia para monitorear incendios y localizar seres vivos, tanto animales como humanos, en situaciones de emergencia. El proceso de entrenamiento incluyó un conjunto amplio de datos preprocesados y aumentados, lo cual permite que el sistema funcione bajo diversas condiciones de visibilidad, una capacidad clave para responder en entornos complejos y cambiantes.

Este enfoque mejora los esfuerzos de rescate y reduce los daños a la fauna y a las personas, permitiendo a los equipos de respuesta enviar información crítica en tiempo real, lo cual sería especialmente útil en áreas vulnerables de Colombia. Además, el modelo incrementa su efectividad en condiciones extremas, como la niebla, mediante la integración de la arquitectura ResNet18, que incrementa la eficiencia en la identificación de objetos pequeños. Este sistema muestra un alto potencial para la mitigación de incendios y la protección de la vida y el medio ambiente en situaciones de emergencia forestal.

Wang et al. (2024) propone un sistema de reconocimiento de incendios forestales y humo mediante drones IoT equipados con tecnología de visión artificial, optimizado para superar los desafíos de la detección temprana en entornos forestales complejos. La propuesta presenta la red FWSRNet, que emplea el modelo Vision Transformer (ViT) en lugar de redes convolucionales tradicionales, lo que mejora la precisión en la detección de fuego y humo a partir de imágenes aéreas. El modelo utiliza un mecanismo de autoatención para capturar detalles sutiles en las imágenes y adopta un enfoque de aprendizaje contrastivo que optimiza la discriminación de características, alcanzando una precisión promedio del 94,89% en la identificación de incendios forestales.

El uso de cámaras montadas en drones y conectadas a IoT facilita la monitorización en tiempo real y permite cubrir amplias áreas con alta flexibilidad, lo que responde efectivamente a la necesidad de mejorar la capacidad de respuesta ante emergencias. Este sistema de visión artificial representa un avance en la gestión de incendios forestales al proporcionar un análisis rápido y preciso, superando los métodos manuales y reduciendo los altos índices de falsos positivos que suelen observarse en los enfoques tradicionales.

En el artículo de Acero Calderón et al. (2023) se describe el diseño y desarrollo de un dron equipado con sensores avanzados para la detección temprana de incendios forestales. Este dispositivo incluye cámaras térmicas, cámaras de alta resolución y sensores de gas, permitiendo así un monitoreo constante y preciso en áreas de riesgo. Su capacidad de operación autónoma y programable le permite realizar patrullajes periódicos en zonas críticas, detectando en tiempo real variaciones de temperatura, humo y otras señales de fuego. Los datos capturados son procesados mediante algoritmos de visión artificial que identifican patrones asociados con la presencia de un posible incendio. Una vez detectada una alerta, el dron notifica inmediatamente a las autoridades correspondientes, facilitando una respuesta rápida y eficiente.

El enfoque presentado en el artículo representa un avance significativo en la prevención y respuesta ante incendios forestales, brindando una herramienta eficaz para la protección de ecosistemas vulnerables y comunidades expuestas al riesgo de incendios.

En el artículo de Ibrahim et al. (2023) se revisan diversas técnicas de detección de incendios forestales impulsadas por el Internet de las Cosas (IoT), que incluyen el uso de sensores, cámaras y vehículos aéreos no tripulados (UAV). Se explica cómo los sensores de IoT permiten monitorear continuamente variables ambientales, como la temperatura y el humo, y envían alertas tempranas a los centros de

control. Además, la implementación de cámaras y UAV proporciona imágenes de alta resolución que ayudan a identificar incendios en tiempo real.

El artículo destaca que, en comparación con tecnologías como satélites y cámaras tradicionales, el IoT permite una detección más rápida y económica, lo cual resulta ideal para áreas vulnerables. A pesar de desafíos como la gestión energética de los sensores, el uso de redes de sensores inalámbricos (WSN) y algoritmos de optimización contribuye a mejorar la precisión y reducir los falsos positivos. Este enfoque basado en IoT facilita una respuesta oportuna y efectiva ante incendios forestales, adaptándose a las necesidades de prevención en regiones como Colombia.

El artículo de Galvez, et al. (2023) explora un enfoque innovador para la detección temprana de incendios en zonas semiáridas mediante el uso de drones e Internet de las Cosas (IoT). Este sistema integra drones con cámaras y sensores que monitorean continuamente variables ambientales claves, como la temperatura y la humedad, con el fin de identificar áreas susceptibles a incendios. Utiliza la tecnología de comunicación LoRa para transmitir datos a largas distancias, lo que es particularmente útil en zonas remotas.

El prototipo desarrollado incorpora algoritmos de procesamiento de imágenes y análisis en tiempo real, permitiendo detectar áreas secas con alto riesgo de incendio y emitir alertas que facilitan una intervención oportuna. Además, el sistema proporciona al usuario la posibilidad de visualizar los datos en una plataforma web, mejorando así la toma de decisiones. Este enfoque destaca por su aplicabilidad en zonas vulnerables y por la eficiencia energética y el alcance que ofrece LoRa, características esenciales para la gestión de incendios en Colombia.

El artículo de Jagruthi et al. (2023) resalta la eficacia de los drones equipados con redes neuronales convolucionales (CNN) en la detección temprana de incendios forestales. Utilizando cámaras ópticas, estos drones capturan y transmiten imágenes en tiempo real, lo cual facilita la identificación de incendios en sus primeras etapas y permite una respuesta de emergencia rápida. Este enfoque resulta especialmente útil en áreas de difícil acceso, donde las cámaras y sensores tradicionales pueden ser menos eficaces.

Para el contexto de Colombia, es significativo el potencial del sistema para monitorear extensas zonas vulnerables y detectar señales tempranas de incendios mediante análisis visuales automatizados. Las CNN permiten una clasificación precisa de las imágenes, reduciendo considerablemente las falsas alarmas y proporcionando datos confiables. Además, el sistema envía alertas a las autoridades competentes, incluyendo información importante como la ubicación exacta y condiciones ambientales, optimizando así la gestión de recursos en situaciones críticas.

El artículo también destaca el papel del aprendizaje profundo en el ajuste y la mejora continua de los modelos de detección, lo cual permite que el sistema funcione de manera eficaz en condiciones climáticas adversas, como niebla o humo denso. La implementación de un sistema basado en drones para la gestión de incendios forestales en Colombia podría beneficiarse de estos avances, aumentando la precisión en la detección y disminuyendo la dependencia de infraestructura de monitoreo fija. En

conclusión, la tecnología descrita en el artículo posee un alto potencial para mejorar la respuesta a incendios y proteger tanto la biodiversidad como las comunidades en zonas forestales vulnerables de Colombia.

El artículo de Easwaran & Palanisamy, (2023) explora el uso de redes neuronales profundas ligeras para mejorar la detección de incendios forestales en tiempo real, abordando específicamente el uso de arquitecturas de red como MobileNet y ShuffleNet en dispositivos móviles y drones. La aplicación de estos modelos de aprendizaje profundo permite una detección precisa y rápida en zonas forestales, lo cual es esencial para la respuesta temprana en áreas de difícil acceso y entornos complejos.

Este enfoque de redes neuronales ligeras resulta particularmente valioso en regiones vulnerables donde los recursos tecnológicos y de conectividad son limitados, ya que estos modelos presentan una baja demanda computacional y un alto rendimiento. ShuffleNet, en particular, permite una integración eficiente en drones gracias a su arquitectura optimizada, que reduce el tiempo de inferencia y mejora la velocidad de respuesta en situaciones de emergencia. Asimismo, el sistema emplea técnicas de preprocesamiento de imágenes y segmentación de superpíxeles para distinguir entre áreas con y sin fuego, logrando una precisión del 93,28 % en la detección de incendios, con una significativa reducción en el consumo energético, lo cual es crucial para la autonomía de los drones en tareas prolongadas.

En el contexto de Colombia, la implementación de esta tecnología podría ofrecer una herramienta avanzada para monitorear y gestionar incendios en ecosistemas frágiles, proporcionando datos en tiempo real que faciliten la toma de decisiones y mejoren la coordinación en la respuesta a incendios. Además, la capacidad de realizar un monitoreo continuo de vastas áreas a bajo costo convierte a los drones en una opción sostenible y adaptable para la detección y mitigación de incendios forestales en el país.

El artículo de Sairi et al. (2023) analizan la implementación de redes de sensores inalámbricos (WSN) habilitadas por el Internet de las Cosas (IoT) como un sistema integral para la detección temprana de incendios forestales. Esta tecnología facilita el monitoreo en tiempo real de variables críticas, tales como la temperatura, la humedad y la presencia de gases, que son fundamentales para la identificación precoz de posibles focos de incendio. Los nodos de sensores, estratégicamente distribuidos en la zona de monitoreo, transmiten los datos a través de la red IoT hacia servidores centrales o plataformas en la nube, donde son procesados para emitir alertas dirigidas a las autoridades competentes.

El análisis también detalla el uso de protocolos de comunicación optimizados, como LoRa y ZigBee, los cuales permiten la transmisión de datos de manera eficiente y con bajo consumo energético, asegurando la viabilidad de estos sistemas en regiones forestales de difícil acceso y con infraestructura limitada. La integración de técnicas de inteligencia artificial en el procesamiento de los datos obtenidos incrementa la precisión del sistema y minimiza las falsas alarmas, lo que resulta esencial para una respuesta rápida y eficaz en situaciones de emergencia.

En el contexto de Colombia, la aplicación de estos sistemas basados en WSN e IoT se presenta como una solución avanzada y sostenible para la gestión de incendios forestales en áreas vulnerables. Proveen información en tiempo real que facilita la toma de decisiones y optimiza la coordinación de los equipos de emergencia. Además, se destaca la adaptabilidad de este sistema a distintos entornos y su capacidad de operación continua, características que lo convierten en una herramienta idónea para la conservación de ecosistemas y la protección de comunidades locales.

En el artículo de Yandouzi et al. (2023) presentan un análisis exhaustivo sobre la utilización de drones y algoritmos de aprendizaje profundo en la detección y monitoreo de incendios forestales. Se subraya la creciente amenaza que representan los incendios forestales a nivel global, impulsada por el cambio climático y el incremento de condiciones áridas y cálidas que facilitan la propagación de los incendios. La adopción de tecnologías avanzadas se vuelve esencial para reducir los impactos ecológicos y económicos que estas catástrofes generan.

El estudio destaca la efectividad de los drones equipados con cámaras de alta resolución y sensores especializados para la recopilación de imágenes en tiempo real. Estos dispositivos, en combinación con algoritmos de aprendizaje profundo como YOLOv5 (You Only Look Once) y R-CNN (Region-based Convolutional Neural Network), permiten la detección temprana y precisa de focos de incendio, proporcionando a las autoridades alertas automáticas para una respuesta rápida. Este enfoque es particularmente útil en áreas de difícil acceso y en escenarios donde la velocidad de respuesta es crucial.

Además, se discuten las ventajas de integrar drones de bajo costo y modelos ligeros de aprendizaje profundo, como MobileNet, que optimizan el consumo de energía y extienden el tiempo de operación de los vehículos aéreos no tripulados (UAV). Este aspecto es vital para la vigilancia de áreas extensas y remotas, donde la duración de la batería y la eficiencia operativa son limitantes importantes.

Los resultados obtenidos en la investigación de Yandouzi et al. muestran la viabilidad y adaptabilidad de estos sistemas, que pueden ser integrados con tecnología de sistemas de información geográfica (SIG) para mapear la ubicación y la evolución de los incendios en tiempo real. La aplicación de estos avances ofrece un potencial significativo para la gestión de incendios forestales en áreas vulnerables, como las de Colombia, mejorando la coordinación de esfuerzos y la protección tanto de los ecosistemas como de las comunidades expuestas.

El artículo de Fouda et al. (2022) presenta un modelo innovador de Inteligencia Artificial (IA) jerárquico ligero para la detección temprana de incendios forestales mediante drones, ideal para la gestión en áreas vulnerables. Este sistema combina modelos básicos, como árboles de decisión y regresión logística, con redes neuronales convolucionales (CNN), logrando una precisión de detección del 95.53% y reduciendo significativamente la carga computacional, lo que permite un mayor tiempo de vuelo y monitoreo efectivo.

Diseñado para drones comerciales accesibles como el DJI Mavic Mini 2, el sistema opera con un tiempo de vuelo de 30 minutos y una altitud máxima de 1500 metros, utilizando una cámara de alta resolución (4000 x 2250 píxeles) y transmitiendo datos a través de la banda de 2.4 GHz. La capacidad de procesar imágenes en tiempo real directamente en el dron evita la necesidad de transmitir constantemente datos, lo que es crucial en regiones con recursos limitados.

Este enfoque no solo permite un monitoreo continuo y la detección temprana automatizada de incendios, sino que también reduce costos operativos al minimizar la infraestructura terrestre necesaria. La escalabilidad del sistema permite el uso de múltiples drones simultáneamente, lo que podría mejorar significativamente la capacidad de respuesta ante incendios forestales en Colombia, contribuyendo a la preservación de sus ecosistemas.

En la investigación realizada por (Gupta et al., 2022), sobre cómo desarrollar un sistema autónomo de detección de incendios forestales, los autores emplearon un tipo de inteligencia artificial llamado red neuronal profunda, específicamente el modelo InceptionV3, conocido por su habilidad para analizar patrones complejos en imágenes. La red fue configurada para identificar incendios de manera precisa a partir de imágenes capturadas por drones. Tal como se hace con la enseñanza a seres humanos, el modelo fue entrenado con miles de imágenes de incendios y otras sin fuego, permitiéndole aprender a distinguir características específicas del fuego, como sus colores y formas, de otros objetos que tenían una semejanza, como reflejos de luces o atardeceres.

El proceso de entrenamiento se reforzó con la técnica de dropout, que ayuda a la red a generalizar su aprendizaje y no memorizar en exceso los ejemplos específicos de entrenamiento, evitando así el problema conocido como sobreajuste. Además, para mejorar su rendimiento en condiciones variadas de luz y escenarios complejos, la red fue optimizada mediante algoritmos avanzados que ajustan sus parámetros internos. Este proceso de optimización le permite identificar patrones de fuego de manera precisa en distintas condiciones, lo cual es crucial para un sistema de detección de incendios en ambientes naturales cambiantes.

Como resultado de estas configuraciones, el sistema logró alcanzar una precisión de validación del 96.04%, superando modelos anteriores realizados por el equipo y demostrando ser una herramienta confiable y efectiva para la detección temprana de incendios forestales. La combinación de drones autónomos con inteligencia artificial avanzada permite realizar una vigilancia en tiempo real de grandes áreas forestales, ya que el sistema facilita una respuesta oportuna y efectiva que ayuda a mitigar los daños y proteger el ecosistema.

Otro gran ejemplo de la efectividad de las redes neuronales se encuentra en el artículo de (Chen et al., 2022), en este se describe un sistema de detección y monitoreo de incendios forestales basado en el uso de drones equipados con cámaras RGB e infrarrojas (IR) para identificar y monitorear incendios, aprovechando la combinación de ambos tipos de imágenes para una detección más precisa, para conseguirlo, el sistema utiliza una base de datos llamada FLAME2, que recopila imágenes de incendios controlados con cámaras RGB e IR instaladas en drones. Las imágenes RGB muestran los colores visibles al ojo humano, mientras que las IR capturan el calor del fuego, incluso cuando está

cubierto por humo o vegetación. Esta combinación permite identificar incendios en condiciones donde solo una cámara RGB o una IR no sería suficiente.

Las imágenes son procesadas a través del modelo de aprendizaje de una red neuronal convolucional o CNN, la cual es capaz de analizar las características de cada imagen, pixel a pixel, para poder clasificarlo como “con o sin humo” y “fuego” o “no fuego”. Esto ayuda a los bomberos a localizar áreas críticas y medir la intensidad del incendio en tiempo real.

Como resultado, el sistema FLAME2 presentó una precisión de aproximadamente un 94%, al detectar incendios. Esto fue posible gracias a la combinación de imágenes captadas por las diferentes cámaras instaladas en los drones, esta mezcla logra mejorar la precisión y permite al modelo identificar fuego incluso a través del humo, lo que facilita una respuesta temprana en la gestión de incendios forestales ya que al ser capaz de monitorear en tiempo real el sistema se vuelve más efectivo y rápido.

Una de los mejores resultados encontrados en esta revisión fue el del estudio realizado por (Yandouzi et al., 2022), aquí se presenta un sistema de detección llamado aprendizaje por transferencia profunda. Este método consiste en tomar modelos de inteligencia artificial que ya fueron entrenados con grandes conjuntos de datos y adaptarlos para identificar incendios en imágenes. El aprendizaje por transferencia profunda utiliza un modelo que ya conoce muchas características visuales generales como formas y texturas, en lugar de entrenar un modelo desde cero, pues esto tomaría mucho tiempo y se necesitaría una gran cantidad de información, aquí se utiliza el conocimiento ya existente y se adapta luego a una tarea específica, en este caso, la detección de incendios forestales.

Entre los modelos utilizados en este artículo se encuentran VGG16, ResNet50, y MobilNet, los cuales fueron entrenados con imágenes de incendios forestales y áreas forestales sin incendios, así logran comprender la diferencia entre estas dos situaciones, esta técnica es capaz de reducir el tiempo y los recursos necesarios para la investigación, ya que solo se debe personalizar las últimas capas de configuración ya que allí es donde se realiza la identificación específica de los incendios.

El sistema alcanzó una precisión bastante alta, superior al 99%, en la identificación de incendios en imágenes. Esto significa que casi todas las veces que el modelo evaluó una imagen, acertó en decir si había o no un incendio. Este nivel de precisión es ideal para sistemas de vigilancia ya que permite detectar con rapidez y una alta precisión si hay o no un incendio, además de permitir monitorear grandes extensiones forestales a través de drones equipados con cámaras.

En el artículo de (Hristov et al., 2018), se puede apreciar nuevamente la eficiencia de un dron con cámaras especializadas en el monitoreo de incendios, aquí se describe un sistema de detección temprana de incendios forestales utilizando el dron DJI M300 y la cámara H20T, diseñado para identificar incendios en sus etapas iniciales mediante sensores y algoritmos avanzados de visión por computadora e inteligencia artificial. La cámara H20T integra varios tipos de sensores, incluyendo una cámara de imágenes en color RGB, una cámara Infrarroja para detección térmica y un telémetro láser para medir distancias. Estos sensores permiten al dron captar tanto las imágenes de calor como las visibles para el ojo humano. Las imágenes térmicas ayudan a identificar fuentes de calor que

indican la presencia de un incendio, mientras que las imágenes RGB verifican visualmente la presencia de llamas o de humo.

Para analizar las imágenes, el sistema utiliza dos algoritmos, el primero, es la clasificación basada en ResNet-18, en esta red neuronal se clasifican las imágenes en tres categorías, “normal”, “potencial incendio” y “potencial humo”, ResNet-18 está diseñada para clasificar y extraer imágenes con patrones de llamas o humo, lo que hace que identifique un incendio rápidamente; seguidamente, está la segmentación U-net, este modelo procesa las imágenes para identificar áreas específicas con humo. La U-net es una red avanzada que permite dividir una imagen en secciones para localizar exactamente las zonas con humo, esto es especialmente útil para confirmar la existencia de un incendio o reducir falsas alarmas.

En este sistema, el dron sigue una ruta predefinida sobre el área forestal. Durante su vuelo, captura imágenes RGB e infrarrojas simultáneamente. Si el sistema detecta una señal térmica o visual de posible incendio, se activa un proceso de verificación, el cual consiste en que si ambas cámaras (infrarroja y RGB) confirman la señal del incendio, el sistema envía una alerta, si solo una cámara detecta la señal, el sistema utiliza un umbral de temperatura menor para verificar nuevamente antes de emitir la alarma.

Como resultado el sistema logró reducir la tasa de falsas alarmas y mostró una buena precisión en la detección temprana de incendios en pruebas de campo. El dron puede ubicar el punto exacto del incendio y enviar la alerta con coordenadas a las estaciones de bomberos o guardabosques, facilitando una respuesta rápida.

En la investigación llevada a cabo por (Ul Ain Tahir et al., 2022), se puede apreciar nuevamente la gran eficiencia de la red de aprendizaje profundo. Los autores usaron como modelo la red neuronal llamada YOLOv5 (acrónimo de “You only look once”, o “Solo miras una vez”), la cual está diseñada para identificar objetos en tiempo real, esto lo hace analizando una imagen completa a la vez, en lugar de dividirla en partes. Esto permite que el sistema detecte incendio en una sola pasada de imagen, el modelo toma cada imagen aérea, la divide en cuadrículas y evalúa cada una para determinar si contiene o no signos de incendio. Si detecta algo, traza un recuadro alrededor del área de interés para que los operadores humanos puedan verificar.

Para que el sistema pueda reconocer incendios de forma confiable, fue entrenado con dos conjuntos de datos específicos de incendios, FireNet y FLAME. Estas bases de datos contienen imágenes aéreas de incendios y áreas sin incendios, lo cual permite al modelo aprender a diferenciar entre ambos casos. Se aplicaron técnicas de aumento de datos para simular diferentes condiciones ambientales, lo que ayudó al modelo a mejorar su precisión en situaciones variadas.

Al finalizar el entrenamiento, el modelo obtuvo una alta precisión en la detección de incendios, con un F1-score de 94.44%. Este resultado significa que el sistema es confiable en la identificación de incendios, con muy pocas falsas alarmas. Además, YOLOv5 es rápido y tiene una baja latencia,

entregando las imágenes con un retraso de tan solo 24 milisegundos con respecto a la realidad, lo cual es importante en las aplicaciones en tiempo real, como el monitoreo forestal.

El estudio de (Chowdary et al., 2022), muestra una variación de todos los métodos identificados en este artículo, ya que propone la utilización de una red de cobertura de barrera en redes de sensores inalámbricos (WSN), esta red se basa en un sistema de sensores distribuidos en drones o nodos móviles, que cubren el área de interés formando una barrera de detección. Estos drones están equipados con sensores para detectar humo, temperatura y otros indicadores de incendios. Los datos recolectados se transmiten entre los drones y finalmente llegan a una estación base usando el protocolo X-Bee, lo que permite un monitoreo en tiempo real.

Existen dos configuraciones en esta red, la primera es de tipología estática, la cual emplea sensores fijos en un “cinturón cerrado” alrededor de áreas pobladas o de alta prioridad, como aldeas o zonas turísticas. Esta red está diseñada para advertir sobre incendios antes de que lleguen a las zonas habitadas, la segunda, es la tipología dinámica, esta utiliza sensores móviles (drones) que pueden adaptarse a las condiciones cambiantes del ambiente y cubrir grandes áreas forestales de alto riesgo. Estos drones reorganizan su posición en función de los cambios ambientales, como humedad del suelo o temperatura, maximizando la eficacia de detección.

El sistema de cobertura de barrera presenta varias ventajas sobre métodos tradicionales de detección, como los satélites o cámaras fijas al ofrecer monitoreo en tiempo real, permitiendo la identificación temprana de incendios con mayor precisión, reduciendo el riesgo de falsos positivos al validar la información con múltiples sensores, también presenta movilidad y adaptabilidad, teniendo la capacidad de ajustar la cobertura de los sensores según las condiciones ambientales aumentando así la confiabilidad y precisión en áreas de difícil acceso o con condiciones extremas.

Finalmente, encontramos una gran rapidez en la respuesta, ya que, al detectar rápidamente el inicio de un nuevo incendio, los drones también pueden guiar operaciones de extinción con precisión, como el despliegue de bombas extintoras en áreas críticas, este enfoque logra reducir costos operativos y puede aplicarse en regiones extensas o áreas específicas de alta prioridad.

En el artículo presentado por (Bezas et al., 2021), se puede encontrar un modelo con un algoritmo para planificar rutas de cobertura utilizando enjambres de drones autoorganizados. Este tipo de algoritmos permite que grupos de drones trabajen juntos para cubrir áreas grandes sin necesidad de control humano directo, algo ideal para tareas como detección temprana de incendios o respuesta a desastres. El algoritmo se basa en el concepto de “planeación de rutas de cobertura”, lo cual significa planificar una trayectoria para que los drones cubran toda la zona sin dejar espacio sin explorar. En este caso, se diseñó para áreas con formas simples y sin obstáculos, y se probaron dos tipos de trayectoria.

La primera trayectoria es la ruta en líneas paralelas, los drones se desplazan en líneas rectas paralelas, cubriendo el área de forma ordenada, la segunda es la ruta en espiral, en esta los drones se mueven con una trayectoria en espiral desde el borde hacia el centro. Para lograr una cobertura completa del

área, el algoritmo organiza los drones en una formación en línea, donde cada dron mantiene una distancia igual a su radio de cobertura para evitar duplicar el área ya monitoreada. Además, los drones pueden ajustar su velocidad si detectan un “punto de interés”, que es un área específica que necesita ser observada más detalladamente.

Los desarrolladores del algoritmo evaluaron su desempeño mediante varias métricas, la primera es el tiempo de cobertura, aquí se mide cuánto tarda el enjambre en cubrir toda el área, en segundo lugar se tiene el número de reducciones de velocidad, aquí los drones disminuyen su velocidad cuando detectan un punto de interés, para asegurarse de captar toda la información necesaria, en tercer lugar se encuentra la velocidad promedio, en donde se mide la velocidad media de todos los drones durante la misión, la quinta métrica es el porcentaje de puntos de interés cubiertos, en donde se evalúa la proporción de puntos de interés de los cuales los drones lograron recopilar datos, finalmente se encuentra la distancia total recorrida, la cual indica cuánto viajan los drones en total para cubrir el área.

Los resultados de la simulación mostraron que el camino en líneas paralelas es el más eficiente en términos de tiempo y distancia recorrida comparado con el camino en espiral, ya que se necesitan menos cambios de formación y permite cubrir el área en menos tiempo. Sin embargo, ambos métodos son útiles y permiten a los drones adaptarse a los puntos de interés, reduciendo su velocidad cuando es necesario para capturar más información.

Encontramos otro gran ejemplo de las grandes ventajas del internet de las cosas (IoT) en combinación con drones para la detección de incendios en el estudio realizado por (Tehseen et al., 2021), este sistema utiliza la teoría de grafos para representar la red de dispositivos y formalizar el modelo de funcionamiento. La teoría de grafos ayuda a organizar y verificar la estructura de comunicación entre sensores, drones y la sala de control, permitiendo detectar incendios de manera eficiente, el sistema se compone de diferentes tipos de sensores distribuidos en un bosque y conectados a través de subredes a una sala de control central, estos sensores monitorean condiciones ambientales para identificar incendios en etapas tempranas.

Los sensores que se utilizaron en esta investigación fueron, sensor de temperatura, sensor de humedad y sensor de humo y llama, cada tipo de sensor envía alertas a través de “nodos de gateway” o puertas de enlace, que conectan los sensores con la sala de control. Cuando un sensor detecta una señal de posible incendio, el nodo gateway envía esta información a la sala de control, activando la respuesta de los drones para verificar y gestionar la situación.

Este sistema ofrece además, una guía para la gestión del incendio, esta muestra todo el procedimiento a seguir, el cual inicia con la detección del incendio que hacen los sensores al percatarse de condiciones anormales como temperatura alta, baja humedad o presencia de humo o llamas, estos envían la alerta al nodo que a su vez notifica a la sala de control, en segunda instancia la sala de monitoreo envía drones de monitoreo al área señalada para confirmar si realmente existe un incendio y evaluar su gravedad, estos drones van integrados con una especie de computadora interna que evalúa la situación en tiempo real. Si los drones de monitoreo confirman el incendio la sala de control envía

drones de acción, que están equipados para combatir el fuego, estos drones pueden realizar tareas como lanzar extintores en busca de controlar el fuego.

Para asegurarse de que el sistema funcione correctamente, el modelo utiliza la teoría de grafos donde los vértices (nodos), representan los sensores, gateways y drones, por otro lado, las aristas (enlaces), indican las conexiones entre estos nodos. El modelo formal se implementa con la metodología VDM-SL (Lenguaje de especificación de método de desarrollo de Viena), una técnica que verifica la precisión del sistema mediante condicionantes lógicos y algoritmos para confirmar que cada nodo y enlace opere según lo previsto, así se garantiza que el sistema detecte y gestione incendios de manera confiable.

CONCLUSIONES

El uso de drones en la gestión de incendios forestales ha probado ser una herramienta efectiva y accesible para la detección temprana, el monitoreo y la respuesta ante incendios en diferentes lugares alrededor del mundo. Esta tecnología permite identificar de forma rápida los focos de incendio mediante monitoreos aéreos en tiempo real, optimizando así los recursos y las decisiones de intervención. Los resultados del presente estudio destacan que los drones han reducido significativamente los costos operativos y han aumentado la eficiencia en la respuesta a emergencias, lo cual es particularmente relevante en contextos con recursos limitados. Además, al integrarse con sistemas de inteligencia artificial y el Internet de las Cosas (IoT), los drones han ampliado su capacidad y precisión, posibilitando el monitoreo continuo y la emisión de alertas automáticas en zonas de difícil acceso.

Sin embargo, como se observa en los gráficos de los artículos recopilados para esta revisión, la mayoría de los estudios encontrados fueron realizados en países como China, India, Bulgaria o en naciones desarrolladas como Corea del sur, España, o Canadá. Además, el gráfico que muestra el número de publicaciones por año revela un incremento notable a partir de 2021, lo que sugiere que esta tecnología no solo es bastante reciente, sino que también es escasa en países como Colombia y en el continente sudamericano en general. Esta falta de estudios en la región, puede representar una barrera importante para su implementación, ya que el manejo de drones conlleva directrices específicas en cuanto a climatología y condiciones de vuelo, como regulaciones y normas que deben considerarse para su correcta aplicación.

La adopción de drones para la gestión de incendios forestales representa una oportunidad valiosa para proteger la biodiversidad de Colombia y reforzar la seguridad de las comunidades locales, contribuyendo así a mitigar los impactos negativos de los incendios en los ecosistemas. No obstante, para maximizar el potencial de esta herramienta, es necesario fortalecer la infraestructura tecnológica y promover la capacitación especializada en su operación. La incorporación de drones en las políticas de manejo ambiental y el fomento de la colaboración interinstitucional serán elementos clave para consolidar esta tecnología como una solución sostenible en la prevención y control de incendios forestales.

RECOMENDACIONES

Fomento a la investigación y desarrollo tecnológico, la inversión en tecnología aplicada a drones, enfocada en mejorar su autonomía, alcance y precisión, es esencial para su efectividad en la detección de incendios. La investigación en algoritmos de inteligencia artificial y análisis avanzado de imágenes puede potenciar su uso en la identificación temprana de focos de incendio.

Capacitación de personal especializado, para aprovechar de manera óptima el potencial de los drones, se recomienda implementar programas de formación dirigidos al personal encargado de la gestión de incendios. Esto incluye capacitación en el manejo de drones y en la interpretación de datos para la toma de decisiones fundamentadas.

Establecimiento de políticas públicas inclusivas, la integración de los drones en las políticas de gestión ambiental, tanto a nivel local como nacional, fortalecería su uso sistemático en la prevención y control de incendios forestales. Estas políticas deberían considerar regulaciones claras y apoyo financiero para facilitar el acceso a esta tecnología en diferentes regiones.

Fomento de la cooperación interinstitucional, la colaboración entre diversas instituciones permitiría una respuesta más coordinada y efectiva ante los incendios forestales. La creación de redes de datos y recursos tecnológicos compartidos facilita el establecimiento de un sistema de alerta temprana integral.

Evaluación continua del impacto y la eficiencia, es recomendable implementar un sistema de evaluación que permita medir el impacto de los drones en la reducción de los incendios forestales, adaptando las estrategias a medida que se identifican áreas de mejora o se desarrollan nuevas tecnologías.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acero Calderón, J. G., Chamorro Quijano, S. A., Muñoz Suazo, W. C., & Rivera Paredes, H. H. (2023). Design of a Drone Applying Multisensor Information for Early Detection of Forest Fires. Universidad Continental. <https://ieeexplore-ieee-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/document/10601205>
- Bezas, K., Tsoumanis, G., & Oikonomou, K. (2021). A Coverage Path Planning Algorithm for Self-Organizing Drone Swarms. *2021 International Balkan Conference on Communications and Networking, BalkanCom 2021*, 122–126. <https://doi.org/10.1109/BalkanCom53780.2021.9593145>
- Chen, X., Hopkins, B., Wang, H., O'Neill, L., Afghah, F., Razi, A., Fulé, P., Coen, J., Rowell, E., & Watts, A. (2022). Wildland Fire Detection and Monitoring Using a Drone-Collected RGB/IR Image Dataset. *IEEE Access*, 10, 121301–121317. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3222805>
- Chowdary, V., Deogharia, D., Sowrabh, S., & Dubey, S. (2022). Forest fire detection system using barrier coverage in wireless sensor networks. *Materials Today: Proceedings*, 64, 1322–1327. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.202>
- Cruz, H., Eckert, M., Meneses, J., & Martínez, J. F. (2016). Efficient forest fire detection index for application in Unmanned Aerial Systems (UASs). *Sensors (Switzerland)*, 16(6). <https://doi.org/10.3390/s16060893>
- Easwaran, D., & Palanisamy, S. (2023). Lightweight Deep Neural Network-Based Forest Fire Detection. Proceedings of the 2nd International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Communications, and Computing, IEEE, 1-5. <https://ieeexplore-ieee-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/document/10201047>
- Fouda, M. M., Sakib, S., Fadlullah, Z. M., Nasser, N., & Guizani, M. (2022). A lightweight hierarchical AI model for UAV-enabled edge computing with forest fire detection. *IEEE Network*, 36(6), 38-45. DOI: 10.1109/MNET.003.2100325. <https://ieeexplore-ieee-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/document/9839647>
- Galvez, M., Saroliya, A., & Gutiérrez, S. (2023). A New Approach for Early Fire Detection in a Semi-Arid Zone Using Drones and the Internet of Things. Proceedings of the 3rd International Conference on Technological Advances in Computational Sciences (ICTACS), IEEE, 1340-1345. <https://ieeexplore-ieee-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/document/10390224>
- Gupta, V., Roy, S., Jaiswal, V., Bhardwaj, K., & Rana, P. S. (2022). Drone Assisted Deep Learning based Wildfire Detection System. *PDGC 2022 - 2022 7th International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing*, 162–166. <https://doi.org/10.1109/PDGC56933.2022.10053123>
- Hristov, G., Raychev, J., Kinaneva, D., & Zahariev, P. (2018). *Emerging methods for early detection of forest fires using unmanned aerial vehixles and LoRaWAN sensor networks*. Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Engineering (ICACITE), Pune, India, pp. 20-24. IEEE. <https://ieeexplore-ieee-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/document/10617076>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2023). Reporte anual de incendios forestales en Colombia. IDEAM. <https://www.ideam.gov.co/sala-de-prensa/boletines>

Ibrahim, A. A., Radhi, A. A., Ali, A. M., & Mohammed, K. H. (2023). IoT-Based Forest Fire Detection Techniques: A Review. IEEE Xplore. <https://ieeexplore-ieee-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/document/10461943>

Jagruthi, H., Rao, V. G., & Nayak, V. Y. (2023). Drones en la mitigación de incendios forestales. Proceedings of the 3rd International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME 2023), IEEE, 1-5. <https://ieeexplore-ieee-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/document/10252566>

Kinaneva, D., Hristov, G., Raychev, J., & Zahariev, P. (2019). *Early Forest Fire Detection Using Drones and Artificial Intelligence*.

Li, S., Qiao, L., Zhang, Y., & Yan, J. (2022). An Early Forest Fire Detection System Based on DJI M300 Drone and H20T Camera. *2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2022*, 932–937. <https://doi.org/10.1109/ICUAS54217.2022.9836119>

Majli Jaafar, A. H., Dharmesh Dhabhi, D., & Al-Farouni, M. (2024). Utilizando la comunicación AI e IoT para SMART Sistema Ambiental en Incidentes de Intrusión e Incendio Escenarios. En Actas de la 4ª Conferencia Internacional sobre Computación Avanzada y Tecnologías Innovadoras en

Sabino, A., Lima, L. N., Brito, C., et al. (2024). Forest Fire Monitoring System Supported by Unmanned Aerial Vehicles and Edge Computing: A Performance Evaluation Using Petri Nets. *Cluster Computing*, 27, 9735–9755. <https://link-springer-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/article/10.1007/s10586-024-04504-5>

Srinath, K., Sri Sathya, K. B., Raguvaran, S., Girish, V. G., & Sriram, V. (2024). Integrated Forest Fire Detection System for Identifying Living Beings Using Drones by Employing a Custom Trained YOLOv5 Model. In Proceedings of the International Conference on Science and Technology Engineering (ICSTEM), Coimbatore, India, pp. 2081–2021. IEEE Xplore. <https://ieeexplore-ieee-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/document/10560880>

Pasolli, E., Melgani, F., Tuia, D., Pacifici, F., & Emery, W. J. (2014). SVM active learning approach for image classification using spatial information. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(4), 2217–2223. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2258676>

Tehseen, A., Zafar, N. A., & Ali, T. (2021). Graph Theory-Based Formal Modeling of Forest Fire Management System using IoT and Drone. *3rd International Conference on Communication Technologies, ComTech 2021*, 132–137. <https://doi.org/10.1109/ComTech52583.2021.9616876>

Ul Ain Tahir, H., Waqar, A., Khalid, S., & Usman, S. M. (2022). Wildfire detection in aerial images using deep learning. *2022 2nd International Conference on Digital Futures and Transformative Technologies, ICoDT2 2022*. <https://doi.org/10.1109/ICoDT255437.2022.9787417>

Wang, Y., Wang, Y., Xu, C., Wang, X., & Zhang, Y. (2024). Forest Fire and Smoke Recognition Driven by Computer Vision Using IoT Drone Cameras. Springer Nature. <https://link-springer-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/article/10.1007/s11276-024-03718-0>

Sairi, A., Labed, S., & Miles, B. (2023). A Review on Early Detection of Forest Fires Using IoT-Enabled WSN. *International Conference on Advances in Electronics, Control, and Communication Systems (ICAECCS)*. IEEE. <https://ieeexplore-ieee-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/document/10104887>

Yandouzi, M., Moussaoui, O., Grari, M., Berrahal, M., Idrissi, I., Azizi, M., Ghoumid, K., & Elmiad, A. K. (2023). Investigation on the Combination of Deep Learning Object Recognition with Drones for Forest Fire Detection and Tracking. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 14(3), 377-380. <https://thesai.org/Publications/ViewPaper?Volume=14&Issue=3&Code=IJACSA&SerialNo=42>

Yandouzi, M., Mounir GRARI, M., Boukabous, M., Matsi, L., Moussaoui, O., Ghoumid, K., & Lari, L. (2022). Forest Fires Detection using Deep Transfer Learning Aissa KERKOUR ELMIAID 8. In *IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications* (Vol. 13, Issue 8). www.ijacsa.thesai.org