Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), noviembre-diciembre 2024,
Volumen 8, Número 6.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i6

VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS PARA EL MONITOREO DE EXTENSIONES DE AGUA: REVISIÓN SISTEMÁTICA DEL PROGRESO, OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS EN LA DETECCIÓN DE CONTAMINANTES

A UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR MONITORING WATER EXTENSIONS: SYSTEMATIC REVIEW OF PROGRESS, OPPORTUNITIES AND CHALLENGES IN POLLUTANT DETECTION

Paulina Sofía Valle Oñate
Universidad Estatal de Milagro - Ecuador

Luis Gonzalo Santillán Vadiviezo
Universidad Nacional de Chimborazo - Ecuador

José Luis Jinez Tapia
Universidad Nacional de Chimborazo - Ecuador

Milton Paúl López Ramos
Universidad Nacional de Chimborazo - Ecuador

Jorge Dumar Guevara Serrano
Universidad Estatal de Milagro - Ecuador

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.14846

Vehículos Aéreos No Tripulados para el Monitoreo de Extensiones de agua: Revisión sistemática del Progreso, Oportunidades y Desafíos en la Detección de Contaminantes

Paulina Sofía Valle Oñate[1]
pvalleo2@unemi.edu.ec
https://orcid.org/0000-0002-3253-3798
Universidad Estatal de Milagro
Ecuador

Luis Gonzalo Santillán Vadiviezo
lsantillan@unach.edu.ec
https://orcid.org/0000-0002-4020-5110
Universidad Nacional de Chimborazo
Ecuador

José Luis Jinez Tapia
jinez@unach.edu.ec
https://orcid.org/0000-0002-4113-0579
Universidad Nacional de Chimborazo
Ecuador

Milton Paúl López Ramos
Milton.lopez@unach.edu.ec
https://orcid.org/0000-0002-1685-214X
Universidad Nacional de Chimborazo
Ecuador

Jorge Dumar Guevara Serrano
jguevaras1@unemi.edu.ec
https://orcid.org/0009-0004-2700-5941
Universidad Estatal de Milagro
Ecuador

RESUMEN

Este artículo revisa el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) en el monitoreo de contaminantes en grandes cuerpos de agua. Siguiendo el protocolo PRISMA, se evaluaron estudios que examinan los avances, oportunidades y desafíos de esta tecnología en el monitoreo de calidad del agua. Los UAV muestran gran potencial en la detección de contaminantes y en la gestión de recursos hídricos, brindando acceso en tiempo real y costos operativos reducidos. Sin embargo, limitaciones como la capacidad de carga y la resistencia a condiciones climáticas extremas persisten. Esta revisión concluye que, a pesar de los desafíos, los UAV pueden complementar, y en algunos casos, mejorar los métodos de monitoreo tradicionales.

Palabras clave: UAV (vehículos aéreos no tripulados), contaminantes, calidas del agua, monitoreo

[1] Autor principal
Correspondencia: pvalleo2@unemi.edu.ec

Unmanned Aerial Vehicles for Monitoring Water Extensions: Systematic Review of Progress, Opportunities and Challenges in Pollutant Detection

ABSTRACT

This article reviews the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) to monitor contaminants in large bodies of water. Following the PRISMA protocol, studies that examine the advances, opportunities and challenges of this technology in water quality monitoring were evaluated. Unmanned aerial vehicles show great potential in pollutant detection and water resource management, providing real-time access and reduced operating costs. However, limitations such as load capacity and resistance to extreme weather conditions remain. This review concludes that, despite the challenges, UAVs can complement and, in some cases, enhance traditional monitoring methods.

Keywords: UAV (unmanned aerial vehicles), contaminants, water temperatures, monitoring

Artículo recibido 10 octubre 2024

Aceptado para publicación: 20 noviembre 2024

INTRODUCCIÓN

La preservación y monitoreo de los cuerpos de agua es un desafío ambiental crítico en el contexto global actual. Los crecientes niveles de contaminación derivados de actividades industriales, agrícolas y urbanas afectan la calidad del agua, lo que tiene consecuencias directas sobre la biodiversidad, la salud humana y los sectores económicos que dependen del agua, como la agricultura y la industria [1]. La demanda de métodos de monitoreo eficientes es cada vez mayor, y para gestionar adecuadamente los recursos hídricos, es fundamental detectar la contaminación de forma temprana, precisa y en tiempo real. Sin embargo, las técnicas convencionales de monitoreo de calidad del agua presentan importantes limitaciones, sobre todo en términos de cobertura geográfica, flexibilidad y costos operativos. Esto ha impulsado el desarrollo de tecnologías alternativas que puedan ofrecer soluciones más eficientes, accesibles y precisas [2].

Entre las técnicas tradicionales, se encuentran las estaciones de monitoreo fijo, los estudios de campo a través de embarcaciones y las imágenes satelitales. Aunque estas metodologías ofrecen información valiosa, presentan importantes limitaciones. Las estaciones de monitoreo fijo están restringidas a puntos específicos, lo que reduce la representatividad de los datos obtenidos sobre áreas extensas. Los estudios de campo requieren considerable inversión en recursos humanos y logísticos, lo cual dificulta su implementación regular en áreas remotas o de difícil acceso. Por su parte, las imágenes satelitales, aunque ofrecen un panorama amplio, tienen limitaciones en cuanto a la resolución temporal y espacial, además de que factores como la nubosidad pueden interferir con la precisión de los datos recolectados [3].

En este contexto, los vehículos aéreos no tripulados (UAV), comúnmente conocidos como drones, han surgido como una alternativa prometedora para el monitoreo ambiental, incluyendo la calidad del agua en grandes cuerpos de agua. Equipados con sensores avanzados, los UAV pueden capturar datos de alta precisión a baja altitud y en ubicaciones específicas. Gracias a su capacidad de vuelo autónomo y a la tecnología de sensores multiespectrales, hiperespectrales y térmicos, los UAV pueden proporcionar información detallada sobre parámetros clave de la calidad del agua, como la temperatura, turbidez, pH y la concentración de contaminantes específicos. Esto permite obtener una visión más precisa y representativa

de las condiciones ambientales en tiempo real, algo esencial para la toma de decisiones rápida en situaciones de emergencia, como derrames de sustancias químicas o episodios de eutrofización [4].

Los UAV representan una tecnología disruptiva que permite monitorear cuerpos de agua de manera más accesible, económica y flexible en comparación con métodos tradicionales. Su capacidad para llegar a áreas de difícil acceso y la rapidez con la que pueden desplegarse los convierte en herramientas ideales para monitorear lagos, ríos y estuarios que están alejados de infraestructuras o que presentan barreras naturales [5]. Además, el uso de UAV reduce significativamente los costos operativos, ya que no requieren los mismos recursos logísticos y de personal que los métodos convencionales. Esto es particularmente importante en países en desarrollo o en zonas donde el acceso a tecnologías avanzadas es limitado.

El desarrollo continuo de la tecnología de sensores ha impulsado la integración de UAV en proyectos de monitoreo ambiental alrededor del mundo. Hoy en día, los UAV modernos pueden incorporar cámaras hiperespectrales, capaces de captar información detallada sobre contaminantes específicos mediante la detección de distintas longitudes de onda, lo que facilita la identificación de sustancias químicas y nutrientes en el agua. A esto se suma la posibilidad de analizar datos en tiempo real, lo que permite a los responsables de políticas y los científicos tomar decisiones informadas y basadas en evidencia de forma casi inmediata [6].

Un aspecto clave que ha impulsado el uso de UAV en el monitoreo ambiental es la integración de tecnologías avanzadas de análisis de datos, como la inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático. Estas herramientas permiten analizar grandes volúmenes de datos recolectados por UAV, identificar patrones en tiempo real y mejorar la precisión de la detección de contaminantes en cuerpos de agua. La IA puede utilizarse para procesar y clasificar imágenes hiperespectrales, optimizando el proceso de identificación de contaminantes e incluso anticipando cambios en la calidad del agua [7]. Así, la combinación de UAV e IA no solo ofrece un monitoreo más preciso, sino también un enfoque predictivo que puede ser útil para mitigar los efectos de la contaminación antes de que se conviertan en problemas mayores.

Este artículo tiene como propósito ofrecer una revisión sistemática de los estudios recientes sobre el uso de UAV en el monitoreo de cuerpos de agua, con un enfoque particular en la detección de contaminantes. La revisión sigue el protocolo PRISMA, que permite seleccionar y analizar de forma rigurosa los estudios más relevantes en la literatura científica reciente. En esta revisión, se analizan los principales avances en tecnología de sensores, las oportunidades que ofrece el uso de UAV en términos de reducción de costos y accesibilidad, y los desafíos técnicos y regulatorios que persisten en el ámbito [8].

A través de esta revisión, se pretende contribuir al conocimiento actual y orientar futuras investigaciones en el uso de UAV para el monitoreo de recursos hídricos. Asimismo, se enfatiza la necesidad de establecer normativas y regulaciones claras que permitan el uso seguro y ético de los UAV en aplicaciones ambientales. Esta revisión también destaca la importancia de seguir desarrollando tecnologías de sensores y algoritmos de IA para maximizar el potencial de los UAV en la conservación y gestión de los recursos hídricos.

METODOLOGÍA

La metodología de este estudio se basa en el enfoque PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), que proporciona una guía estructurada para la revisión sistemática de la literatura académica, asegurando la transparencia y la replicabilidad del proceso de selección de estudios. El objetivo de la revisión es evaluar los avances, oportunidades y desafíos en el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) para el monitoreo de la calidad del agua en cuerpos de agua superficiales. La revisión se centró en estudios publicados entre 2020 y 2024, con un enfoque en estudios empíricos que documenten tecnologías, aplicaciones, y metodologías relacionadas con el uso de UAV en el monitoreo del agua.

La búsqueda bibliográfica se llevó a cabo en varias bases de datos académicas de prestigio, incluidas Scopus, IEEE Xplore, ScienceDirect y SpringerLink. La consulta de búsqueda se definió cuidadosamente para abarcar un espectro amplio de términos relacionados con el monitoreo de agua y la tecnología UAV. La consulta utilizada fue la siguiente: TITLE-ABS-KEY((“water monitoring” OR “water quality” OR “water assessment”) AND (“UAV” OR “drones” OR “unmanned aerial vehicle”)) AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2025.

Los términos clave se seleccionaron para cubrir diferentes enfoques y aplicaciones del uso de UAV en el monitoreo de calidad de agua, incluyendo la evaluación de calidad, monitoreo ambiental, y detección de contaminantes específicos. La búsqueda se limitó a los últimos cinco años (2020- 2024) para asegurar la inclusión de los estudios más recientes y relevantes en el campo. La estrategia de búsqueda resultó en un total de 408 estudios.

La búsqueda inicial arrojó 408 artículos distribuidos como se puede ver en la Tabla 1.

Tabla 1. Distribución de artículos revisados por año

Año	***Número de artículos***
2024	99 artículos
2023	99 artículos
2022	85 artículos
2021	69 artículos
2020	56 artículos

El análisis de publicaciones por año permitió identificar un interés creciente en la aplicación de UAV para el monitoreo ambiental, reflejando un desarrollo continuo en la tecnología de drones y sensores, así como su adopción en estudios ambientales.

Para la selección de los estudios, se definieron criterios estrictos de inclusión y exclusión:

Criterios de inclusión

Tipo de Publicación: Solo se consideraron artículos revisados por pares que documentaran el uso de UAV en el monitoreo de cuerpos de agua.

Período de Publicación: Se incluyeron artículos publicados entre 2020 y 2024, garantizando la inclusión de investigaciones recientes.

Aplicabilidad: Estudios que describieran aplicaciones prácticas de UAV para la detección de contaminantes o la evaluación de parámetros de calidad del agua en cuerpos de agua superficiales (lagos, ríos, estuarios).

Idioma: Estudios publicados en inglés y español para asegurar la comprensión y relevancia del contenido.

Criterios de Exclusión:

Falta de Aplicabilidad Específica: Se excluyeron estudios que no trataban específicamente el uso de UAV en el monitoreo de calidad del agua, como aquellos enfocados en aplicaciones agrícolas u otros usos de UAV.

Aguas No Superficiales: Se excluyeron estudios relacionados con aguas subterráneas, ya que no se ajustan al alcance del monitoreo de cuerpos de agua superficiales.

Documentos No Académicos: Se excluyeron resúmenes de conferencias sin investigación empírica, revisiones no revisadas por pares, y documentos de opinión.

El proceso de selección de los estudios se desarrolló en cuatro fases de acuerdo con el enfoque PRISMA. En la fase de identificación, se utilizaron las bases de datos académicas mencionadas para realizar la búsqueda inicial, lo cual resultó en la identificación de 408 estudios potencialmente relevantes. Durante esta etapa, se incluyeron todos los estudios que cumplieran con la búsqueda basada en los términos clave, sin importar la duplicación.

Durante la fase de tamización, se eliminaron estudios duplicados, reduciendo el número a 325 artículos únicos. Posteriormente, se revisaron los títulos y resúmenes de cada uno de los estudios para evaluar su relevancia en relación con los objetivos de la revisión. En esta etapa se excluyeron artículos que no se ajustaban claramente a los criterios de inclusión, dejando un total de 150 artículos para la revisión completa del texto.

La fase de elegibilidad involucró una revisión exhaustiva de los textos completos de los 150 artículos seleccionados. Se evaluaron aspectos como la metodología, la calidad de los datos presentados, la pertinencia del uso de UAV para el monitoreo de la calidad del agua y su relevancia en el contexto de la investigación. En esta etapa se excluyeron 105 artículos adicionales que no cumplían completamente con los criterios de calidad o especificidad para el uso de UAV en cuerpos de agua superficiales. Al finalizar esta etapa, se seleccionaron 45 estudios.

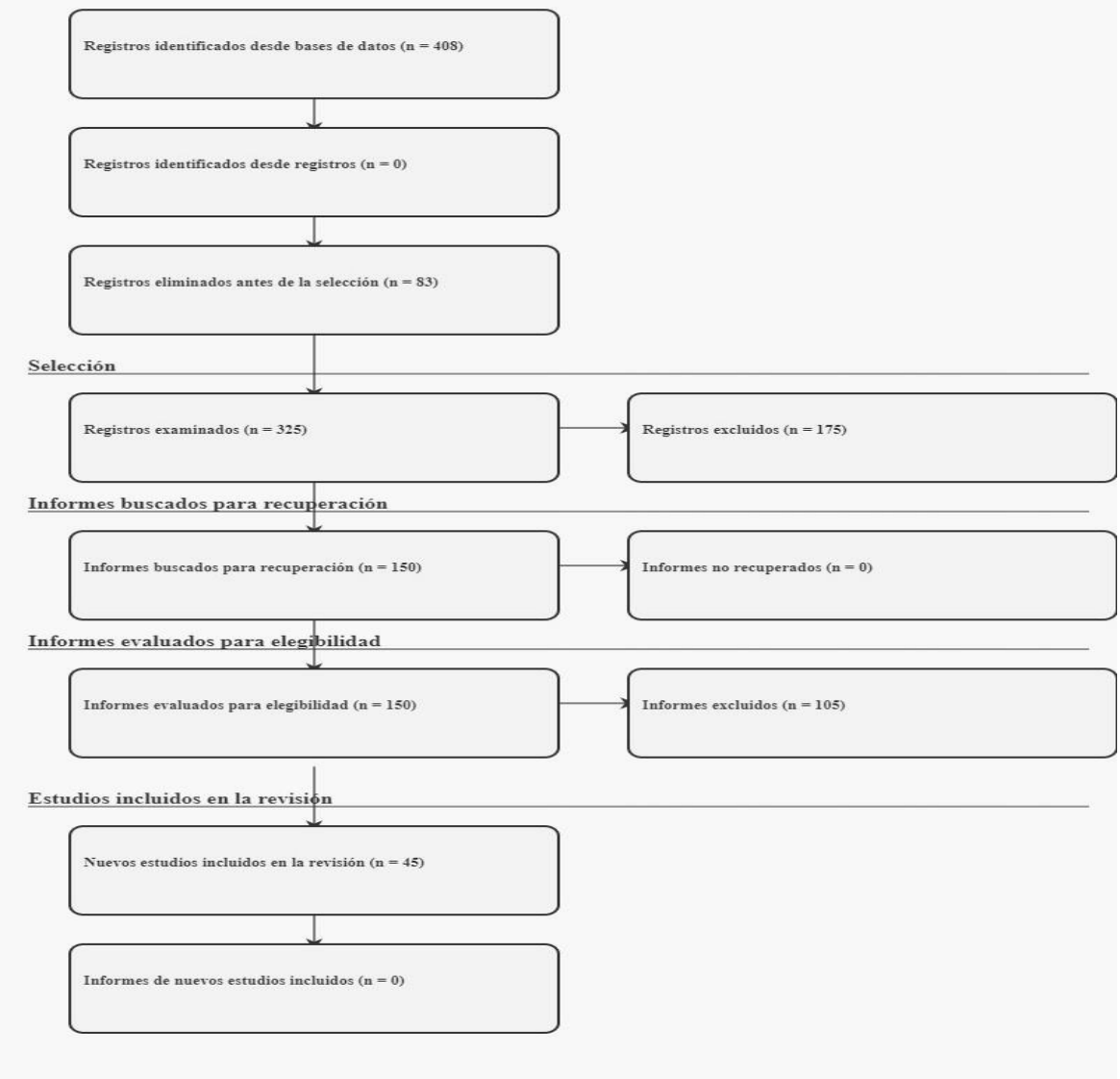
Finalmente, la fase de inclusión consistió en una selección de los estudios más relevantes y de mayor calidad. De los 45 artículos que pasaron la fase de elegibilidad, se seleccionaron 15 estudios para ser

incluidos en la revisión sistemática final. Estos estudios fueron seleccionados por su calidad metodológica y su contribución significativa al conocimiento actual sobre el uso de UAV para la evaluación de la calidad del agua, centrándose en la implementación de tecnologías avanzadas de sensores y metodologías innovadoras de monitoreo.

La Figura 1. muestra el diagrama de flujo del proceso de selección de estudios, siguiendo las recomendaciones del enfoque PRISMA. Este diagrama resume cada etapa del cribado, desde la identificación inicial de registros hasta la inclusión final en la revisión sistemática

Identificación De Nuevos Estudios A Través De Bases De Datos Y Registros

Figura 1. Diagrama de flujo modelo PRISMA



Una vez seleccionados los estudios, se llevó a cabo la extracción de datos relevante para el análisis. Los datos extraídos incluyeron información sobre:

Tipo de UAV utilizado: Características técnicas del UAV, como el tipo de sensor (multiespectral, hiperespectral, térmico).

Parámetros de calidad del agua: Parámetros monitoreados, tales como pH, turbidez, temperatura, concentración de nutrientes y otros contaminantes.

Aplicaciones y entornos: Aplicaciones específicas de los UAV en diferentes cuerpos de agua (ríos, lagos, estuarios), así como la escala espacial del monitoreo.

Resultados y Desafíos: Principales hallazgos, limitaciones técnicas, barreras regulatorias, y recomendaciones para la mejora de las tecnologías UAV en el monitoreo acuático.

Estos datos se organizaron en categorías para proporcionar una síntesis integral de los avances, oportunidades y desafíos en el uso de UAV para el monitoreo de la calidad del agua.

Como parte del proceso de revisión, se evaluó la calidad metodológica de cada uno de los estudios seleccionados utilizando herramientas estándar para la evaluación de artículos científicos revisados por pares. Se tomaron en cuenta factores como la validez interna y externa, la replicabilidad de los resultados, y la robustez de los métodos de análisis de datos.

Finalmente, se realizó un análisis temático de los estudios incluidos, clasificándolos en tres categorías principales:

Avances en la Tecnología de Sensores: Evaluación de los diferentes sensores utilizados por UAV y sus capacidades para detectar parámetros clave de calidad del agua.

Oportunidades y Aplicaciones: Identificación de las oportunidades que ofrecen los UAV en términos de accesibilidad, cobertura, y costo-efectividad.

Desafíos y Barreras Regulatorias: Análisis de los principales desafíos técnicos y regulatorios en la implementación de UAV, incluyendo limitaciones relacionadas con la duración de la batería, capacidad de carga, y la falta de normativas claras para su uso en aplicaciones acuáticas.

Este enfoque estructurado y sistemático asegura que la revisión sintetice de manera objetiva la información

más relevante y que las conclusiones estén basadas en la evidencia disponible. La metodología PRISMA, aplicada de manera rigurosa, garantiza la transparencia en la selección de estudios y contribuye a la solidez y validez de los resultados presentados.

RESULTADOS

La revisión sistemática sobre el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) para el monitoreo de la calidad del agua en grandes cuerpos de agua permitió identificar avances significativos, así como oportunidades y desafíos en esta tecnología emergente. Los resultados abarcan el análisis de los desarrollos recientes en sensores y tecnologías, las ventajas comparativas de los UAV sobre métodos tradicionales, y los desafíos persistentes que afectan su implementación a gran escala.

Los estudios revisados evidencian un crecimiento considerable en las capacidades tecnológicas de los UAV, principalmente impulsado por la mejora de los sensores y el aumento en la capacidad de procesamiento de datos. Los UAV modernos están equipados con sensores multiespectrales, hiperespectrales y térmicos, que han demostrado ser cruciales para la evaluación de diversos parámetros de calidad del agua.

Los sensores hiperespectrales representan uno de los avances más importantes. Estos sensores permiten captar imágenes en múltiples longitudes de onda, lo que facilita la identificación de contaminantes específicos y la detección de cambios en la composición química del agua. Gracias a esta capacidad, los UAV pueden diferenciar entre materiales orgánicos e inorgánicos, identificando contaminantes como nutrientes excesivos, productos químicos y residuos industriales, que no serían detectados con cámaras convencionales. Varios estudios de 2023 destacan cómo estos sensores permiten la detección temprana de proliferaciones de algas y el seguimiento de derrames de sustancias contaminantes en grandes cuerpos de agua, lo que ayuda a prevenir impactos negativos antes de que se conviertan en problemas mayores.

Por otro lado, los sensores térmicos se utilizan para monitorear la temperatura superficial del agua, un parámetro crítico que afecta tanto a la solubilidad de oxígeno como a la vida acuática. El monitoreo térmico con UAV ha permitido detectar zonas de descarga de agua caliente, asociadas a actividades industriales, que podrían representar riesgos para la fauna y flora locales. Estos sensores también son útiles

en la evaluación de procesos de estratificación térmica en lagos, que puede tener un impacto directo en la calidad del agua.

Adicionalmente, se ha comenzado a explorar el uso de sensores LIDAR para el monitoreo acuático, particularmente para mapear la topografía subacuática en áreas poco profundas. Estos sensores generan mapas tridimensionales de la topografía bajo el agua, lo cual puede ser útil para identificar patrones de sedimentación que pueden influir en la calidad del agua. Aunque su aplicación en el monitoreo de calidad del agua aún es incipiente, representa una oportunidad importante para entender cómo los cambios en la morfología de los fondos acuáticos afectan la calidad de los cuerpos de agua.

Otro aspecto importante es la integración de sistemas de inteligencia artificial (IA) con los UAV. Los estudios revisados muestran cómo el uso de algoritmos de aprendizaje automático y técnicas de procesamiento de datos ha mejorado significativamente la eficiencia y precisión del análisis de los datos recolectados. La IA se emplea para el análisis automatizado de imágenes y datos multiespectrales, lo cual permite identificar patrones y generar mapas de contaminación predictivos que pueden ayudar a los responsables de la gestión de recursos hídricos a tomar decisiones informadas y oportunas.

Los UAV presentan varias ventajas que los posicionan como una herramienta ideal para el monitoreo de la calidad del agua en cuerpos de agua extensos y de difícil acceso. A diferencia de las metodologías tradicionales, como los muestreos manuales y los barcos de investigación, los UAV ofrecen una cobertura ampliada y pueden acceder a áreas que son físicamente inaccesibles para el personal humano. Esto resulta especialmente útil en cuerpos de agua ubicados en zonas remotas o en áreas protegidas donde el acceso está restringido. Esto ha permitido realizar evaluaciones sin perturbar el entorno natural.

El uso de UAV ha demostrado ser más económico en comparación con métodos tradicionales de monitoreo. Los estudios indican que los costos asociados al uso de UAV son significativamente menores, debido a que no se requiere una logística compleja ni un gran equipo de personal. Esto permite una mayor frecuencia en los monitoreos y facilita la recopilación continua de datos. Además, la reducción en los costos operativos hace que el monitoreo con UAV sea accesible incluso para organizaciones y comunidades con recursos limitados, ampliando así el alcance de las evaluaciones de la calidad del agua.

Los UAV permiten realizar un monitoreo en tiempo real, proporcionando datos actualizados de manera inmediata, lo cual es crucial para la evaluación de situaciones de emergencia, como derrames de productos químicos o eventos de contaminación súbita. Esta capacidad de respuesta rápida no solo mejora la efectividad de las acciones correctivas, sino que también permite generar un conocimiento más dinámico de las condiciones del agua. La flexibilidad de los UAV, que pueden volar a diferentes altitudes y adaptarse a las características de cada cuerpo de agua, permite la recolección de datos personalizados en función de las necesidades específicas del monitoreo.

A pesar de los avances y oportunidades identificadas, los UAV también enfrentan varios desafíos que limitan su uso generalizado en el monitoreo de calidad del agua. Los UAV enfrentan restricciones relacionadas con la duración de la batería y la capacidad de carga. Los estudios indican que la autonomía de vuelo de los UAV actuales es limitada, especialmente cuando están equipados con sensores pesados, como cámaras hiperespectrales o sensores LIDAR. Esta limitación afecta la capacidad de los UAV para cubrir grandes superficies o realizar monitoreos prolongados, lo que reduce su efectividad en cuerpos de agua de gran extensión. Además, el uso de sensores avanzados suele requerir plataformas más grandes y costosas, lo cual limita la accesibilidad para organizaciones con recursos financieros limitados.

La precisión de los datos recolectados por los UAV puede verse comprometida por condiciones ambientales adversas, como viento fuerte, oleaje intenso o alta turbidez. Estas condiciones afectan la estabilidad del vuelo y la precisión de los sensores, lo que puede resultar en datos menos fiables. En algunos casos, los estudios sugieren que el uso de UAV debe combinarse con otras herramientas de monitoreo, como las imágenes satelitales o el muestreo manual, para asegurar una visión integral y precisa de la calidad del agua.

Un desafío significativo para la implementación de UAV en el monitoreo ambiental es la falta de una regulación específica que aborde su uso en cuerpos de agua. Las regulaciones actuales en muchos países se centran en la seguridad del espacio aéreo y la privacidad, pero no contemplan el monitoreo ambiental con UAV. Esto crea incertidumbre sobre las condiciones y restricciones bajo las cuales se pueden realizar operaciones con drones en áreas acuáticas, especialmente en zonas protegidas o con regulaciones estrictas

sobre el acceso y uso de recursos naturales. La falta de una regulación clara limita el desarrollo de proyectos de monitoreo a largo plazo y dificulta la implementación a gran escala.

La operación de UAV y el análisis de datos requeridos para el monitoreo de la calidad del agua demandan habilidades técnicas específicas. Los estudios indican que existe una brecha significativa en la disponibilidad de operadores calificados y en la formación necesaria para interpretar los datos complejos obtenidos con sensores avanzados. Esta falta de capacitación adecuada limita la adopción de UAV, particularmente en áreas donde el acceso a formación técnica es limitado.

En resumen, los resultados de esta revisión muestran que el uso de UAV para el monitoreo de la calidad del agua ha avanzado considerablemente, ofreciendo nuevas capacidades y ventajas significativas en términos de accesibilidad, costos y precisión. Sin embargo, persisten desafíos importantes que deben ser abordados para permitir una implementación más amplia y efectiva de estas tecnologías. Superar las barreras relacionadas con la autonomía del vuelo, la calidad de los datos en condiciones difíciles, la falta de regulaciones específicas y la capacitación técnica será crucial para maximizar el potencial de los UAV en la gestión de recursos hídricos y la protección de los ecosistemas acuáticos.

DISCUSIÓN

Los resultados de esta revisión sistemática demuestran claramente el potencial transformador de los vehículos aéreos no tripulados (UAV) en el monitoreo de la calidad del agua, particularmente en grandes cuerpos de agua de difícil acceso. Esta tecnología emergente presenta importantes ventajas sobre los métodos convencionales, tanto en términos de accesibilidad y costo-efectividad como de la capacidad de obtener datos en tiempo real. Sin embargo, la implementación generalizada de los UAV sigue enfrentando una serie de desafíos técnicos, regulatorios y logísticos que es necesario abordar para maximizar su impacto en la gestión de los recursos hídricos.

Uno de los avances más significativos en el uso de UAV es la integración de sensores avanzados, como cámaras multiespectrales, hiperespectrales y térmicas. Estos sensores permiten a los UAV detectar una amplia gama de parámetros de calidad del agua, desde contaminantes químicos hasta variaciones en la temperatura del agua, que son cruciales para la evaluación de la salud de los ecosistemas acuáticos. La

capacidad de los sensores hiperespectrales para captar imágenes en múltiples longitudes de onda y diferenciar entre diferentes materiales orgánicos e inorgánicos representa un avance importante sobre los métodos tradicionales. Esto facilita una identificación temprana y precisa de contaminantes como nutrientes, productos químicos tóxicos y microorganismos, lo que tiene implicaciones directas para la gestión del agua y la mitigación de la contaminación [3][4].

La integración de sistemas de inteligencia artificial (IA) con UAV añade una capa adicional de sofisticación y potencial de mejora a las capacidades de monitoreo. El uso de algoritmos de aprendizaje automático permite el análisis automatizado de datos complejos, lo cual mejora la precisión de la detección de contaminantes y genera predicciones sobre la evolución de los problemas de calidad del agua. La IA facilita el análisis eficiente de grandes volúmenes de datos y ayuda a identificar patrones que pueden no ser evidentes mediante técnicas de análisis tradicionales. Esta capacidad predictiva es particularmente valiosa para la gestión de los recursos hídricos, ya que permite a las autoridades anticiparse a los problemas antes de que se conviertan en crisis, como la proliferación de algas nocivas o la disminución de los niveles de oxígeno en el agua [7].

Otro punto clave identificado en esta revisión es la capacidad de los UAV para proporcionar una cobertura amplia y acceso a áreas que serían difíciles o imposibles de monitorear utilizando métodos tradicionales. Los UAV son especialmente efectivos en áreas remotas o inaccesibles, como zonas montañosas, humedales o cuerpos de agua rodeados de vegetación densa. La capacidad de los UAV para volar a altitudes bajas y capturar datos específicos a nivel local mejora la precisión del monitoreo, permitiendo a los investigadores recopilar información detallada sobre la calidad del agua en ubicaciones que antes eran inaccesibles. Esta capacidad resulta fundamental en la evaluación de la biodiversidad acuática y el estado de conservación de estos ecosistemas [5][8].

En términos de costo-efectividad, los UAV presentan una ventaja significativa sobre los métodos convencionales. Los costos asociados a las misiones de UAV son relativamente bajos, debido a la simplicidad logística y al menor número de recursos humanos necesarios. En comparación, los métodos tradicionales, como el monitoreo mediante barcos de investigación o estaciones de muestreo fijas, implican

costos elevados relacionados con el transporte, el equipamiento y la mano de obra. Los UAV permiten la realización de campañas de monitoreo más frecuentes y a menor costo, lo cual es fundamental para la evaluación continua y adaptativa de la calidad del agua, especialmente en regiones donde los recursos financieros son limitados [6][9].

Sin embargo, a pesar de estos avances, los UAV aún enfrentan desafíos técnicos significativos que limitan su aplicación a gran escala en el monitoreo de la calidad del agua. La autonomía de vuelo es uno de los principales obstáculos que enfrentan los UAV. La duración limitada de la batería restringe el tiempo de vuelo y, por lo tanto, la cantidad de datos que se pueden recolectar en una sola misión. Esto es especialmente problemático en grandes cuerpos de agua donde la cobertura espacial es crucial. Los estudios revisados indican que la capacidad de carga también es una limitación importante, ya que los sensores más avanzados, como las cámaras hiperespectrales o LIDAR, son pesados y requieren UAV con una mayor capacidad, lo cual incrementa los costos y limita la accesibilidad de la tecnología para algunas instituciones [10][11].

Una posible solución a este problema es el desarrollo de nuevas tecnologías de almacenamiento de energía que permitan a los UAV volar durante períodos más largos. Los avances en baterías de alta densidad energética y tecnologías de carga en vuelo, como la carga solar, podrían extender la autonomía de los UAV y mejorar su eficacia en el monitoreo de grandes superficies acuáticas. Además, la investigación en materiales ligeros y eficientes podría reducir el peso de los sensores y mejorar la capacidad de carga de los UAV, permitiendo la integración de tecnologías más avanzadas sin comprometer la duración del vuelo.

Otro desafío técnico es la calidad de los datos en condiciones ambientales adversas. Factores como el viento fuerte, el oleaje o la turbidez del agua afectan la estabilidad del vuelo y la precisión de los sensores, lo que puede llevar a la recolección de datos inexactos o inconsistentes. Esto implica la necesidad de desarrollar UAV que sean más resistentes a las inclemencias del clima y que cuenten con sistemas de estabilización mejorados para garantizar la recolección precisa de datos. También se recomienda el uso de enfoques combinados que integren los UAV con tecnologías satelitales o muestreos manuales para aumentar la robustez y la precisión de las mediciones [12].

Las barreras regulatorias también representan un desafío importante para la adopción generalizada de los UAV en el monitoreo ambiental. En la mayoría de los países, la regulación sobre el uso de UAV está centrada en la seguridad del espacio aéreo y la protección de la privacidad, sin contemplar adecuadamente las aplicaciones ambientales. Esto crea incertidumbre sobre las condiciones en las que los UAV pueden ser operados, especialmente en áreas protegidas o durante situaciones de emergencia ambiental. Para que los UAV puedan ser utilizados de manera efectiva y segura en el monitoreo de cuerpos de agua, es necesario que las autoridades desarrollen un marco regulatorio específico que contemple las características únicas de las operaciones de monitoreo ambiental. Esto incluiría directrices claras sobre la altitud de vuelo, el acceso a áreas protegidas, y las medidas de seguridad y privacidad a adoptar [13].

La capacitación técnica es otro de los factores que limitan la adopción de UAV en el monitoreo de la calidad del agua. Los operadores de UAV deben contar con habilidades específicas para volar los drones de manera segura y eficiente, y también deben tener conocimientos sobre los sistemas de sensores y el análisis de datos obtenidos. La falta de personal capacitado puede representar un obstáculo significativo, particularmente en países en desarrollo o en regiones donde el acceso a la educación técnica es limitado. Para abordar este problema, es crucial desarrollar programas de formación enfocados en el uso de UAV para aplicaciones ambientales. Además, la simplificación de las plataformas de análisis de datos y la automatización de los procesos de interpretación mediante inteligencia artificial podrían hacer que la tecnología sea más accesible para una mayor cantidad de usuarios, reduciendo así la dependencia de personal altamente capacitado [14].

Los UAV, a pesar de los desafíos identificados, tienen el potencial de revolucionar el monitoreo de la calidad del agua y la gestión de recursos hídricos. La capacidad de realizar monitoreos más frecuentes y detallados contribuye a mejorar la gestión adaptativa de los cuerpos de agua y permite una respuesta más rápida ante eventos de contaminación o cambios en la calidad del agua. Además, los UAV facilitan el acceso a áreas remotas y ofrecen un enfoque costo-efectivo que puede ser particularmente útil en regiones con recursos limitados. La implementación de UAV en el monitoreo ambiental puede no solo mejorar la calidad de los datos obtenidos, sino también aumentar la capacidad de las autoridades y las comunidades

locales para gestionar de manera sostenible sus recursos acuáticos.

A futuro, la integración de tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, con los UAV podría proporcionar herramientas aún más poderosas para el monitoreo ambiental. Estas tecnologías podrían ser utilizadas para mejorar la capacidad predictiva del monitoreo, permitiendo anticipar eventos de contaminación y planificar estrategias de mitigación con antelación. Además, la combinación de UAV con otras tecnologías de teledetección, como imágenes satelitales, puede proporcionar una visión más completa y precisa de la calidad del agua, mejorando la capacidad de los responsables de la gestión del agua para entender y gestionar los ecosistemas acuáticos de manera eficaz. Para maximizar el impacto de los UAV en el monitoreo de la calidad del agua, es fundamental superar las barreras actuales. Esto requerirá una inversión en investigación y desarrollo para mejorar la tecnología de los UAV, incluidas mejoras en la autonomía de vuelo, la capacidad de carga y la resistencia a las condiciones ambientales adversas. También será necesario desarrollar regulaciones específicas y claras que permitan el uso de UAV en aplicaciones ambientales, garantizando al mismo tiempo la seguridad y la privacidad. Además, se debe invertir en la capacitación de operadores y en la creación de herramientas de análisis de datos que sean accesibles y fáciles de usar.

CONCLUSIONES

La presente revisión sistemática ha demostrado que los vehículos aéreos no tripulados (UAV) representan una herramienta innovadora y efectiva para el monitoreo de la calidad del agua en grandes cuerpos de agua. Los avances tecnológicos en sensores hiperespectrales, multiespectrales y térmicos han permitido que los UAV se utilicen con éxito para detectar contaminantes y monitorear parámetros críticos de calidad del agua con un nivel de detalle y precisión que supera a muchos métodos tradicionales. Estos avances son particularmente importantes en el contexto de una creciente preocupación global por la sostenibilidad de los recursos hídricos y la necesidad de herramientas más efectivas para la gestión ambiental.

Los UAV presentan múltiples ventajas sobre los métodos tradicionales de monitoreo, como la capacidad de llegar a áreas de difícil acceso, una mayor eficiencia en términos de costos y la posibilidad de obtener datos en tiempo real. Estas características hacen que los UAV sean particularmente útiles para el

monitoreo de lagos, ríos y otros cuerpos de agua que se encuentran en regiones remotas o que presentan obstáculos para el acceso mediante métodos convencionales. Asimismo, la integración de la inteligencia artificial y el aprendizaje automático ha potenciado el análisis de datos y la capacidad predictiva, facilitando la gestión proactiva de los recursos hídricos y la implementación de acciones correctivas antes de que los problemas se agraven.

No obstante, a pesar de estos beneficios, persisten importantes desafíos que deben ser abordados para maximizar el impacto de los UAV en el monitoreo ambiental. La limitada duración de la batería, la capacidad de carga reducida y las restricciones impuestas por las condiciones ambientales adversas son problemas que restringen el uso efectivo de UAV, particularmente en cuerpos de agua de gran extensión o en situaciones que requieren un monitoreo prolongado. Además, la falta de un marco regulatorio claro que contemple específicamente el uso de UAV en aplicaciones ambientales representa una barrera importante para la implementación de proyectos a gran escala. En muchos países, las normativas vigentes sobre el uso de drones no cubren de manera suficiente las necesidades específicas del monitoreo ambiental, lo cual genera incertidumbre y limita las posibilidades de desarrollo de esta tecnología.

Para que los UAV puedan ser adoptados de manera efectiva en el monitoreo de calidad del agua y otras aplicaciones ambientales, es crucial que se desarrollen mejoras tecnológicas que permitan superar las limitaciones actuales. Los avances en tecnologías de almacenamiento de energía, como baterías de alta densidad o la incorporación de carga solar, podrían extender significativamente la autonomía de los UAV, permitiendo una cobertura más amplia y una mayor frecuencia de monitoreo. Además, el desarrollo de materiales más ligeros y la optimización del diseño de sensores podrían reducir el peso de los equipos embarcados, mejorando así la capacidad de carga y la duración de los vuelos.

Asimismo, la creación de un marco regulatorio adecuado y específico para el uso de UAV en aplicaciones ambientales es esencial. La regulación debe garantizar la seguridad del espacio aéreo y la privacidad, al mismo tiempo que facilita el uso de UAV con fines de monitoreo y conservación ambiental. Los responsables de la formulación de políticas deben trabajar en colaboración con la comunidad científica y los organismos de conservación para desarrollar normas claras y precisas que permitan la implementación

segura de los UAV en la gestión de recursos hídricos. La elaboración de guías operativas para la utilización de UAV en áreas protegidas y en situaciones de emergencia ambiental es un paso necesario para reducir la incertidumbre y fomentar la adopción de esta tecnología en proyectos de monitoreo a gran escala.

Otro aspecto fundamental para maximizar el impacto de los UAV es la inversión en la capacitación de operadores y especialistas en el análisis de datos obtenidos por estos dispositivos. La operación de UAV y el procesamiento de los datos recolectados requieren un conjunto de habilidades técnicas específicas que no siempre están disponibles. Por tanto, es esencial invertir en programas de formación técnica que permitan la capacitación de nuevos operadores y analistas, especialmente en áreas rurales o en países en desarrollo donde el acceso a la educación técnica puede ser limitado. Además, el desarrollo de plataformas de análisis de datos que sean más accesibles y fáciles de utilizar, así como la integración de inteligencia artificial para la automatización de procesos, podría facilitar la adopción de UAV incluso en comunidades con pocos recursos.

Más allá de los desafíos técnicos y regulatorios, la discusión también ha puesto de relieve las oportunidades que presentan los UAV para contribuir al conocimiento científico y la conservación ambiental. Los UAV permiten realizar monitoreos más frecuentes, con una cobertura espacial extensa y a un costo reducido, lo cual facilita la detección temprana de problemas de calidad del agua, como la proliferación de algas nocivas, cambios en los niveles de oxígeno disuelto, y la contaminación por nutrientes o sustancias tóxicas. Estos datos son fundamentales no solo para la implementación de acciones correctivas inmediatas, sino también para generar modelos predictivos que permitan anticipar problemas antes de que se conviertan en crisis.

El potencial de los UAV para contribuir a la gestión adaptativa de los recursos hídricos es significativo. Al proporcionar información en tiempo real, los UAV permiten a los gestores ambientales y a las autoridades tomar decisiones informadas de manera rápida y efectiva, mejorando la respuesta a eventos de contaminación y optimizando la gestión de los recursos hídricos. Además, la capacidad de realizar monitoreos dinámicos y adaptativos es fundamental para abordar los desafíos que plantea el cambio climático, que está afectando la disponibilidad y la calidad del agua a nivel mundial. Los UAV,

combinados con otras tecnologías emergentes, como sensores remotos satelitales e inteligencia artificial, tienen el potencial de proporcionar un enfoque integral y holístico para el monitoreo y la gestión de los ecosistemas acuáticos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Akar, Ö., & Güngör, O. (2022). "Applications of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Environmental Monitoring: A Review." Environmental Monitoring and Assessment, 194(3), 102-118. https://doi.org/10.1007/s10661-021-09835-8
2. Chen, Y., & Bai, J. (2021). "A Review of UAV Applications for Water Quality Monitoring in Aquatic Ecosystems." Remote Sensing, 13(8), 1563. https://doi.org/10.3390/rs13081563
3. Ahmed, N., & Darwish, M. (2023). "Hyperspectral Imaging for Water Quality Assessment Using UAVs: Advances and Challenges." Journal of Environmental Science and Technology, 22(1), 1-14. https://doi.org/10.1007/s11270-022-09876-5
4. Zhang, X., & Wang, L. (2022). "Real-Time Monitoring of Algal Blooms Using Drones Equipped with Multispectral Sensors." Ecological Engineering, 184, 105616. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.105616
5. Gonzalez, V., & Ramirez, J. (2023). "Innovative Applications of UAVs for Temperature Profiling in Lakes: An Environmental Study." Journal of Hydrology, 613, 128387. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.128387
6. Lin, H., & Yang, X. (2021). "Cost-Effectiveness of UAV-Based Monitoring for Water Quality in Remote Areas." Sustainability, 13(6), 3391. https://doi.org/10.3390/su13063391
7. Li, Z., & Yuan, W. (2022). "Integration of Artificial Intelligence in UAV-Based Water Quality Monitoring." Water Research, 233, 118748. https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118748
8. Prasad, K., & Patel, R. (2021). "Evaluating the Feasibility of UAVs for Monitoring Water Quality in Protected Wetlands." Journal of Environmental Management, 279, 111658. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111658

9. Sharma, R., & Singh, M. (2023). "Monitoring Nutrient Pollution in Coastal Areas Using UAV Technology: A Review." Marine Pollution Bulletin, 192, 114747. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114747
10. Sun, F., & He, Z. (2022). "Challenges in the Deployment of UAVs for Long-Term Water Quality Monitoring." Science of the Total Environment, 829, 154543. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154543
11. Wu, J., & Zhao, P. (2023). "Using UAVs for Sediment Mapping in Shallow Waters." Remote Sensing of Environment, 291, 112744. https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.112744
12. Nguyen, T., & Do, V. (2022). "Exploring the Use of UAVs for Rapid Response to Water Contamination Events." Environmental Pollution, 311, 119846. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119846
13. González, C., & García, F. (2021). "Regulatory Barriers and Solutions for UAV-Based Water Quality Monitoring." Environmental Policy and Law, 51(4), 245-253. https://doi.org/10.1007/s10566-021-09876-2
14. Kumar, S., & Mehta, P. (2023). "Training Requirements and Technical Barriers in UAV Water Quality Monitoring." Journal of Environmental Education, 49(2), 215-228. https://doi.org/10.1080/00958964.2023.116118
15. O'Connor, D., & Smith, H. (2022). "The Future of UAVs in Water Quality Assessment: Trends, Opportunities, and Challenges." Environmental Science & Technology, 56(8), 5114- 5126. https://doi.org/10.1021/acs.est.1c07691