

DOI: <https://doi.org/10.63618/omd/revinvlid/v1/n1/9>

Oportunidades y limitaciones de la inteligencia artificial aplicada al monitoreo ambiental.

Opportunities and limitations of artificial intelligence applied to environmental monitoring.

Guerrero-Calero, Juan Manuel ¹; Salvatierra-Pilozo, Darwin Marco ²

¹ Universidad Estatal del Sur de Manabí; Ecuador ; <https://orcid.org/0000-0002-1356-0475> ; juan.querrero@unesum.edu.ec.

² Universidad Estatal del Sur de Manabí ; Ecuador ; <https://orcid.org/0000-0002-2659-4471> ; darwin.salvatierra@unesum.edu.ec.

Cita: Guerrero-Calero, J. M., & Salvatierra-Pilozo, D. M. (2024). Oportunidades y limitaciones de la inteligencia artificial aplicada al monitoreo ambiental. *Revista De Investigación Y Liderazgo*, 1(1), 42-55. <https://doi.org/10.63618/omd/revinvlid/v1/n1/9>.

Resumen

El monitoreo ambiental en Ecuador y América Latina enfrenta crecientes presiones climáticas, pérdida de cobertura forestal, contaminación y limitaciones institucionales para procesar información oportuna. El estudio tuvo como objetivo analizar las oportunidades y limitaciones de la inteligencia artificial aplicada al monitoreo ambiental, considerando su uso en bosques, biodiversidad, agua, aire y riesgos climáticos. Se desarrolló una investigación cualitativa, documental, no experimental y transversal, basada en la revisión de literatura científica, informes institucionales y fuentes técnico-normativas publicadas entre 2020 y 2025. Los resultados evidenciaron que la inteligencia artificial se aplica principalmente en clasificación, predicción, detección temprana e integración de datos multifuente, con mayor consolidación en calidad del aire, observación terrestre y monitoreo forestal. La discusión permitió interpretar que su utilidad depende de la calidad de los datos, la infraestructura disponible, la interoperabilidad institucional y los criterios éticos de gobernanza. Se concluye que la inteligencia artificial puede fortalecer el monitoreo ambiental si se integra con validación contextual, capacidades técnicas locales y principios de transparencia, trazabilidad y responsabilidad pública.

Palabras clave: inteligencia artificial; monitoreo ambiental; teledetección; gobernanza de datos; Ecuador.

Abstract

Environmental monitoring in Ecuador and Latin America faces growing pressures from climate change, loss of forest cover, pollution, and institutional limitations in processing timely information. The study aimed to analyze the opportunities and limitations of artificial intelligence applied to environmental monitoring, considering its use in forests, biodiversity, water, air, and climate risks. A qualitative, documentary, non-experimental, and cross-sectional study was conducted, based on a review of scientific literature, institutional reports, and technical and regulatory sources published between 2020 and 2025. The results showed that artificial intelligence is primarily applied to classification, prediction, early detection, and the integration of multi-source data, with the most established applications in air quality, Earth observation, and forest monitoring. The discussion led to the conclusion that its usefulness depends on data quality, available infrastructure, institutional interoperability, and ethical governance criteria. It is concluded that artificial intelligence can strengthen environmental monitoring if it is integrated with contextual validation, local technical capabilities, and principles of transparency, traceability, and public accountability.

Keywords: artificial intelligence; environmental monitoring; remote sensing; data governance; Ecuador.

1. Introducción

La inteligencia artificial aplicada al monitoreo ambiental adquiere relevancia estratégica en Ecuador y América Latina porque conecta la gestión de ecosistemas, datos públicos y decisiones territoriales en una región expuesta a presiones climáticas, extractivas y urbanas. En Ecuador, la población proyectada alcanza 18.815.497 habitantes en 2024, con 11.467.010 residentes urbanos y 6.636.650 rurales en 2025, lo que amplía la demanda de información ambiental útil para prevenir riesgos y orientar políticas (INEC, 2024). La unidad de análisis de este estudio se delimita en los sistemas, flujos de datos y prácticas institucionales de monitoreo ambientales sensores, estaciones, imágenes satelitales, cámaras, registros de calidad de aire y agua aplicados a ecosistemas terrestres, hídricos y urbanos. Esta delimitación resulta pertinente porque Ecuador mantiene cerca de 14 millones de hectáreas de bosque natural, equivalentes al 56 % de su superficie terrestre, y forma parte de los países megadiversos del planeta (Global Forest Watch, 2026; CBD, s. f.).

La urgencia de fortalecer el monitoreo ambiental se intensifica cuando los fenómenos climáticos y la degradación ecológica se traducen en pérdidas humanas, económicas e institucionales. En 2023, América Latina y el Caribe registra daños económicos por aproximadamente US\$21.000 millones asociados a eventos hidrometeorológicos, con 82 % de las pérdidas vinculadas a tormentas e inundaciones, mientras que en 2024 la región enfrenta huracanes, incendios, sequías e inundaciones que afectan medios de vida, cadenas alimentarias y seguridad hídrica (WMO, 2024, 2025). En Ecuador, la pérdida reciente de bosque natural se expresa en miles de hectáreas anuales y en emisiones asociadas; Global Forest Watch estima 33 mil hectáreas perdidas en 2025 y 22 Mt de CO₂ equivalente (Global Forest Watch, 2026). No abordar estas brechas reduce la capacidad estatal para anticipar incendios, contaminación, deforestación, pérdida de biodiversidad y conflictos socioambientales, lo que debilita la prevención y encarece la respuesta pública (Olawade et al., 2024).

La literatura reciente muestra un crecimiento acelerado de la inteligencia artificial en monitoreo ambiental, pero también evidencia un desequilibrio entre innovación técnica y apropiación territorial. Una revisión bibliométrica identifica 4.762 publicaciones entre 1991 y 2024, con una tasa de crecimiento anual de 28,1 % en publicaciones y 35,6 % en citaciones, aunque la producción se concentra en países con alta capacidad tecnológica y deja menos representadas a regiones con infraestructura limitada (Alotaibi & Nassif, 2024). Los avances en aprendizaje profundo, observación terrestre y sensores permiten clasificar coberturas, detectar anomalías, estimar calidad del agua y proyectar riesgos; aun así, persisten limitaciones por opacidad algorítmica, sesgos de entrenamiento, baja calidad de datos, privacidad, interoperabilidad y dependencia computacional (Tuia et al., 2024; Yuan et al., 2020). Esta brecha importa porque los modelos pueden ser precisos en laboratorio y menos confiables en territorios andino-amazónicos, costeros o insulares con datos incompletos (Zhong et al., 2021).

El estudio se justifica porque ofrece una lectura integrada de oportunidades y limitaciones, en lugar de presentar la inteligencia artificial como una solución automática o como un riesgo homogéneo. Ecuador dispone de condiciones iniciales para sostener este análisis: el Sistema Nacional de Monitoreo de Bosques articula actores,

metodologías y procesos para generar información espacial, biofísica y socioeconómica, mientras que el MAATE impulsa desde 2024 procesos de estandarización de información ambiental e hídrica mediante cinco talleres de cocreación en Quito, Puyo, Manta, Guayaquil y Loja (MAATE, 2024; MAATE, s. f.). Esta base permite discutir viabilidad técnica sin asumir permisos inexistentes, pues el estudio puede apoyarse en fuentes abiertas, literatura científica, datos institucionales y criterios éticos de gobernanza. Su valor social reside en mejorar alertas y priorización ambiental; su valor teórico, en precisar condiciones de adopción; y su utilidad metodológica, en ordenar variables técnicas, institucionales y éticas comparables (UNESCO, 2021; Olawade et al., 2024).

El propósito del artículo consiste en analizar las oportunidades y limitaciones de la inteligencia artificial aplicada al monitoreo ambiental en Ecuador y América Latina, considerando su potencial para procesar datos masivos y sus restricciones de gobernanza, infraestructura y validación local. Para alcanzar este propósito, se plantean dos objetivos específicos: describir las principales aplicaciones de la inteligencia artificial en el monitoreo de bosques, biodiversidad, agua, aire y riesgos ambientales; y determinar las limitaciones técnicas, institucionales y éticas que condicionan su adopción en escenarios latinoamericanos con capacidades heterogéneas. La contribución esperada radica en proponer una lectura crítica que conecte evidencia científica, datos ambientales y necesidades de política pública, especialmente cuando la región combina alta biodiversidad, pérdidas climáticas multimillonarias y brechas de datos persistentes (Alotaibi & Nassif, 2024). Así, la originalidad del trabajo se sitúa en evaluar la inteligencia artificial no solo por su precisión, sino por su capacidad real de fortalecer decisiones ambientales responsables, verificables y contextualizadas (Tuia et al., 2024).

2. Materiales y Métodos

La investigación se organizó desde una lógica cualitativa porque el propósito no consistió en medir el rendimiento de un algoritmo específico, sino en interpretar cómo la inteligencia artificial fue descrita, justificada y problematizada en el monitoreo ambiental de Ecuador y América Latina. Esta orientación permitió examinar oportunidades, restricciones técnicas, condiciones institucionales y dilemas éticos a partir de documentos científicos y técnico-normativos, sin reducir el fenómeno a indicadores aislados. La elección resultó coherente con un tema en el que la literatura reciente identificó aplicaciones en calidad del aire, agua, biodiversidad, desastres y observación terrestre, junto con limitaciones de datos, privacidad y capacidad técnica (Alotaibi & Nassif, 2024; Olawade et al., 2024).

La indagación se desarrolló con un diseño no experimental y transversal, debido a que no se manipuló ninguna variable tecnológica, ambiental o institucional, ni se implementaron modelos de inteligencia artificial en campo. El análisis se efectuó mediante un corte documental único, centrado en publicaciones y fuentes emitidas entre 2020 y 2025, con énfasis en evidencia reciente sobre inteligencia artificial, monitoreo ambiental, observación de la Tierra y gobernanza de datos. Esta decisión permitió captar

el estado actual del debate sin atribuir cambios temporales que requerirían seguimiento longitudinal. El carácter transversal fue pertinente porque las tecnologías de observación ambiental evolucionaron rápidamente y exigieron una síntesis situada del conocimiento disponible (Tuia et al., 2025; WMO, 2025).

La investigación se asumió como documental, puesto que las unidades de análisis fueron artículos científicos, revisiones especializadas, informes institucionales, lineamientos éticos y plataformas oficiales vinculadas con monitoreo ambiental e inteligencia artificial. Se priorizaron documentos con revisión por pares, DOI verificable o respaldo institucional, y se utilizaron fuentes oficiales cuando aportaron información contextual sobre Ecuador o América Latina. La revisión documental se estructuró para evitar una lectura meramente acumulativa, ya que la literatura metodológica reciente señaló que las revisiones deben explicitar búsqueda, selección, síntesis y contribución conceptual (Banister, 2024).

El razonamiento combinó procedimientos inductivos, deductivos y analíticos para ordenar la evidencia sin perder sensibilidad al contexto latinoamericano. La fase inductiva permitió reconocer categorías emergentes, como automatización del monitoreo, integración de sensores, sesgos de datos, opacidad algorítmica y dependencia de infraestructura. La fase deductiva contrastó esas categorías con dimensiones previamente identificadas por la literatura: calidad de datos, interpretación del modelo, aplicabilidad, transparencia y gobernanza. El procedimiento analítico descompuso cada documento en aportes, limitaciones y condiciones de implementación, siguiendo la necesidad de interpretar adecuadamente los modelos de aprendizaje automático en ciencias ambientales (Zhong et al., 2021; Alotaibi & Nassif, 2024).

El alcance se mantuvo descriptivo, dado que el estudio buscó caracterizar oportunidades y limitaciones de la inteligencia artificial aplicada al monitoreo ambiental, no estimar efectos causales ni validar empíricamente la precisión de sistemas algorítmicos específicos. La descripción se orientó a identificar usos frecuentes, beneficios esperados, riesgos técnicos, condiciones de adopción y vacíos de implementación en escenarios con capacidades institucionales heterogéneas. Para sostener la coherencia interpretativa, se elaboraron matrices de extracción con cinco dimensiones: aplicación ambiental, fuente de datos, técnica de inteligencia artificial, oportunidad reportada y limitación asociada. Este procedimiento fue compatible con el análisis temático cualitativo, que facilitó organizar patrones sin convertirlos en frecuencias estadísticas concluyentes (Braun & Clarke, 2021; Page et al., 2021).

La búsqueda documental se realizó en bases académicas y repositorios especializados como Scopus, Web of Science, ScienceDirect, IEEE Xplore, SpringerLink, Google Scholar y organismos internacionales. Se incorporaron, además, fuentes oficiales relacionadas con Ecuador, entre ellas el Sistema Nacional de Monitoreo de Bosques y documentos de cooperación técnica sobre información forestal, por su pertinencia para comprender la disponibilidad de datos ambientales nacionales. Los criterios de inclusión consideraron publicaciones entre 2020 y 2025, pertinencia directa con inteligencia artificial y monitoreo ambiental, acceso a resumen o texto completo y aplicabilidad regional o global transferible. Se excluyeron documentos sin autoría identificable, textos

comerciales, duplicados, opiniones no académicas y fuentes sin relación verificable con monitoreo ambiental (FAO, 2025; MAATE, s. f.; Page et al., 2021).

La codificación de los documentos se efectuó mediante lectura completa o lectura analítica de secciones metodológicas, resultados, discusión y conclusiones, según la disponibilidad de cada fuente. Cada registro se clasificó por ámbito ambiental — bosques, biodiversidad, agua, aire, riesgos climáticos u observación terrestre— y por tipo de oportunidad o limitación. Las oportunidades incluyeron predicción, detección temprana, automatización, integración multifuente y apoyo a decisiones; las limitaciones incluyeron sesgo, falta de explicabilidad, brecha de infraestructura, gobernanza de datos y privacidad. Esta estrategia permitió comparar evidencia científica reciente con criterios de inteligencia artificial responsable en observación terrestre y monitoreo ambiental (Ghamisi et al., 2025; Tuia et al., 2025).

Las consideraciones éticas se abordaron desde el uso responsable de información secundaria, por lo que no se recopilaban datos personales, no se contactó a participantes humanos ni se procesaron bases sensibles. Aun así, el análisis incorporó principios de transparencia, trazabilidad de fuentes, reconocimiento de autoría, prevención de sesgos y precaución frente a inferencias no sustentadas. La interpretación evitó presentar la inteligencia artificial como solución universal y se concentró en condiciones verificables de adopción ambiental, especialmente en contextos con desigualdad tecnológica. Este resguardo fue coherente con los principios de proporcionalidad, seguridad, privacidad, supervisión humana y sostenibilidad propuestos para la gobernanza ética de la inteligencia artificial (UNESCO, 2021; Ghamisi et al., 2025).

3. Resultados

Aplicaciones de la inteligencia artificial en el monitoreo ambiental

El análisis documental permitió organizar las aplicaciones de la inteligencia artificial en cinco ámbitos ambientales: calidad del aire, calidad del agua, monitoreo forestal y de cobertura terrestre, biodiversidad y ecosistemas, y gestión de riesgos climáticos. Esta clasificación se sostuvo en una literatura que mostró una expansión rápida del campo: un análisis bibliométrico reciente registró 4.762 documentos publicados entre 1991 y 2024, procedentes de 1.580 fuentes, con 16.844 autores, una media de 5,08 coautores por documento y 30,24 % de trabajos con coautoría internacional (Alotaibi & Nassif, 2024). El mismo conjunto evidenció una tasa anual de crecimiento de 28,1 % en publicaciones y 35,6 % en citaciones, lo que indicó que el uso de aprendizaje automático, aprendizaje profundo, sensores, teledetección e IoT se consolidó como una línea aplicada del monitoreo ambiental (Alotaibi & Nassif, 2024).

La distribución temática mostró que las aplicaciones no se concentraron en una sola disciplina, sino que articularon ciencias ambientales, computación e ingeniería. En la producción revisada por Alotaibi y Nassif (2024), las ciencias ambientales concentraron 25 % de las publicaciones, seguidas por ciencias de la computación con 16 % e

ingeniería con 12 %, mientras que ciencias de la Tierra y planetarias aportaron 6 % y ciencias agrícolas y biológicas 5 %. Este patrón permitió observar que las técnicas de inteligencia artificial se aplicaron tanto al procesamiento de datos ambientales como al diseño de sistemas operativos de monitoreo. Como se observa en la Tabla 1, las aplicaciones identificadas se agruparon por dominio ambiental, tipo de dato y función principal del modelo (Alotaibi & Nassif, 2024; Olawade et al., 2024).

Tabla 1
Aplicaciones identificadas de inteligencia artificial en el monitoreo ambiental

Dominio aplicación	de Datos mayor frecuencia	utilizados con Técnicas reportados	o sistemas Indicadores cuantitativos disponibles	o hallazgos
Calidad del aire	Sensores fijos, sensores de bajo costo, meteorológicos, imágenes satelitales	Random forest, datos ensamblados, bayesiana, profundo	Modelos de PM2.5 explicaron entre 83 % y 91 % de la variabilidad; un modelo global integró 5.446 estaciones en 65 países y alcanzó RMSE = 7,86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
Calidad agua	Sensores, del históricas, laboratorio, hidrológicas	series de datos de artificiales, variables modelos detección de anomalías	Redes neuronales, XGBoost, híbridos, y 0,9 en predicción de parámetros de calidad del agua	Se reportaron coeficientes de eficiencia Nash–Sutcliffe entre 0,8 y 0,9 en predicción de parámetros de calidad del agua
Bosques cobertura terrestre	Imágenes satelitales, drones, geoespaciales, inventarios forestales	Clasificación de cobertura, datos detección de cambios, CNN, plataformas de big data geoespacial	En Ecuador, el monitoreo forestal fue pertinente ante una pérdida acumulada de 1,1 Mha de cobertura arbórea entre 2001 y 2025	
Biodiversidad y ecosistemas	Cámaras trampa, imágenes UAV, registros de especies, variables ambientales	Reconocimiento imágenes, modelos de distribución de especies, detección de objetos	Se identificó uso de IA para clasificación automática de especies y seguimiento de poblaciones en zonas remotas	
Riesgos climáticos desastres	Imágenes satelitales, y sensores, climáticos, redes sociales	Modelos de susceptibilidad, regresión de gaussianos, Monte Carlo	Se reportaron aplicaciones para inundaciones, huracanes, incendios, deslizamientos y alertas tempranas	

Nota: La tabla sintetiza hallazgos documentales reportados en revisiones recientes y fuentes institucionales. Los valores numéricos corresponden a indicadores publicados por las fuentes consultadas, no a estimaciones inferenciales propias del presente estudio (Alotaibi & Nassif, 2024; Global Forest Watch, 2026; Olawade et al., 2024).

La calidad del aire fue el ámbito con mayor disponibilidad de indicadores de desempeño, especialmente en modelos orientados a estimar concentraciones de PM2.5 y a mejorar la resolución espacial de redes convencionales de monitoreo. Los resultados documentados mostraron que un modelo basado en random forest explicó 83 % de la variabilidad de PM2.5, mientras que los modelos ensamblados alcanzaron valores de R^2 entre 0,86 y 0,89 en validación cruzada; además, un modelo global de aprendizaje automático profundo integró 5.446 estaciones de monitoreo en 65 países, con resolución espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$, explicó 91 % de la variabilidad observada y obtuvo un RMSE de 7,86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Alotaibi & Nassif, 2024). Estos hallazgos ubicaron la predicción de contaminación atmosférica como una aplicación madura frente a otros dominios, aunque el estudio no calculó valores p ni intervalos de confianza porque su diseño fue documental y descriptivo (Alotaibi & Nassif, 2024).

El monitoreo del agua, los bosques y la biodiversidad mostró una aplicación más heterogénea, con modelos usados para estimar parámetros de calidad hídrica, detectar anomalías, clasificar coberturas, identificar cambios y automatizar registros de fauna. En calidad del agua, las redes neuronales artificiales reportaron coeficientes Nash–Sutcliffe entre 0,8 y 0,9, lo que evidenció capacidad predictiva en variables como nutrientes y oxígeno disuelto; en bosques y cobertura terrestre, los resultados se asociaron con clasificación de uso del suelo, detección de deforestación y análisis de imágenes satelitales o de drones (Alotaibi & Nassif, 2024; Tuia et al., 2024). Para Ecuador, esta aplicación resultó especialmente visible porque el Sistema Nacional de Monitoreo de Bosques generó, recopiló, analizó y reportó información espacial, biofísica y socioeconómica sobre bosques y biodiversidad asociada, mientras que Global Forest Watch registró una pérdida acumulada de 1,1 millones de hectáreas de cobertura arbórea entre 2001 y 2025, equivalente al 6,0 % de la cobertura del año 2000 (Global Forest Watch, 2026; MAATE, s. f.).

La síntesis descriptiva del subtema mostró que la inteligencia artificial se aplicó con mayor claridad en tareas de predicción, clasificación, detección temprana e integración de datos multifuente. La evidencia revisada indicó un núcleo dominante compuesto por teledetección, sensores ambientales, IoT, aprendizaje automático y aprendizaje profundo, con usos específicos en contaminación atmosférica, calidad hídrica, deforestación, biodiversidad y riesgos climáticos (Alotaibi & Nassif, 2024; Olawade et al., 2024). El hallazgo central fue que las aplicaciones más consolidadas correspondieron a dominios con series de datos abundantes y mediciones recurrentes, mientras que las aplicaciones en biodiversidad y territorios de baja disponibilidad de datos aparecieron como áreas operativas en crecimiento, pero todavía dependientes de infraestructura, datos de entrenamiento y validación contextual (Alotaibi & Nassif, 2024; Tuia et al., 2024).

Oportunidades operativas para la detección, predicción y toma de decisiones ambientales

Las oportunidades operativas reportadas para convertir datos ambientales dispersos en información útil para detección temprana, predicción y apoyo a decisiones. Los hallazgos mostraron que la inteligencia artificial se aplicó principalmente en tareas de clasificación, predicción, reconocimiento de patrones, detección de anomalías e integración de datos multifuente, especialmente cuando existieron series temporales, sensores o imágenes satelitales disponibles. La evidencia bibliométrica revisada registró 4.762 publicaciones sobre inteligencia artificial y monitoreo ambiental entre 1991 y 2024, con una tasa anual de crecimiento de 28,1 % en publicaciones y 35,6 % en citas, lo que indicó una expansión sostenida del campo como soporte operativo para la gestión ambiental (Alotaibi & Nassif, 2024).

La concentración disciplinar de las aplicaciones permitió identificar un patrón operativo dominante en torno a ciencias ambientales, computación e ingeniería. En el corpus bibliométrico revisado, las ciencias ambientales reunieron 25 % de las publicaciones, ciencias de la computación 16 % e ingeniería 12 %, lo que mostró que las oportunidades no se limitaron al desarrollo algorítmico, sino que se orientaron a resolver problemas de observación, medición y respuesta ambiental (Alotaibi & Nassif, 2024). Dentro de este

patrón, los sistemas basados en inteligencia artificial se utilizaron para procesar grandes volúmenes de datos, automatizar monitoreos repetitivos y producir salidas aplicables a mapas, alertas, estimaciones de riesgo y priorización de intervenciones (Olawade et al., 2024).

Los resultados con mayor precisión documentada se ubicaron en la predicción de contaminación atmosférica, especialmente en modelos de PM_{2.5}. En este dominio, se reportó que un modelo basado en *random forest* explicó 83 % de la variabilidad observada, mientras que modelos ensamblados alcanzaron valores de R² entre 0,86 y 0,89; de forma complementaria, un modelo global de aprendizaje profundo integró 5.446 estaciones de monitoreo en 65 países, trabajó con resolución espacial de 0,1° × 0,1°, explicó 91 % de la variabilidad y obtuvo un RMSE de 7,86 µg/m³ (Alotaibi & Nassif, 2024). Estos indicadores describieron una oportunidad operativa concreta: aumentar la cobertura analítica de redes convencionales sin depender exclusivamente de estaciones físicas densas (Alotaibi & Nassif, 2024).

Las oportunidades también se observaron en calidad del agua, bosques, biodiversidad y riesgos climáticos, aunque con desempeños y niveles de madurez más heterogéneos. En calidad hídrica, las redes neuronales artificiales y modelos híbridos reportaron coeficientes de eficiencia Nash–Sutcliffe entre 0,8 y 0,9 para parámetros ambientales, lo que evidenció capacidad predictiva en escenarios con datos históricos suficientes (Alotaibi & Nassif, 2024). En observación terrestre, los modelos de visión computacional, aprendizaje profundo y enfoques explicables se aplicaron para pasar de imágenes satelitales sin procesar a información utilizable sobre coberturas, cambios territoriales, eventos extremos y dinámicas ecosistémicas (Tuia et al., 2024).

El análisis regional mostró que estas oportunidades tuvieron mayor relevancia cuando se relacionaron con pérdidas económicas y riesgos ambientales crecientes en América Latina y el Caribe. La Organización Meteorológica Mundial reportó que en 2024 la región enfrentó huracanes, inundaciones, sequías, incendios y retroceso glaciar, mientras que los informes climáticos recientes destacaron daños económicos de al menos US\$21.000 millones en 2023 asociados a eventos hidrometeorológicos (WMO, 2024, 2025). A partir de esos datos, los hallazgos ubicaron la inteligencia artificial como una herramienta operativa para anticipar amenazas, mejorar alertas, priorizar recursos y reducir tiempos de respuesta, sin que ello implicara demostrar causalidad o impacto económico directo en este estudio documental (Olawade et al., 2024; WMO, 2025).

La síntesis descriptiva del subtema mostró que la principal oportunidad operativa de la inteligencia artificial no estuvo en reemplazar los sistemas de monitoreo ambiental, sino en ampliar su capacidad de detección, predicción y uso decisional cuando existieron datos suficientes, infraestructura mínima y criterios de validación. Los hallazgos evidenciaron mayor consolidación en contaminación atmosférica y observación terrestre, mientras que agua, biodiversidad y riesgos climáticos presentaron oportunidades relevantes, pero dependientes de calidad de datos, interoperabilidad y contexto territorial. En conjunto, el patrón central indicó que la inteligencia artificial funcionó como un componente de aceleración analítica para convertir observaciones ambientales en señales tempranas y productos de decisión (Alotaibi & Nassif, 2024; Tuia et al., 2024).

Limitaciones técnicas, institucionales y éticas para la adopción en Ecuador y América Latina

Las restricciones que condicionaron la adopción de inteligencia artificial en el monitoreo ambiental, con énfasis en la disponibilidad de datos, infraestructura digital, gobernanza institucional y resguardos éticos. Los hallazgos mostraron que las limitaciones no se concentraron únicamente en el desempeño de los algoritmos, sino en el entorno que permitió entrenarlos, validarlos, interpretarlos y usarlos en decisiones públicas. La revisión bibliométrica de 4.762 publicaciones entre 1991 y 2024 evidenció un crecimiento anual de 28,1 % en publicaciones y 35,6 % en citaciones, pero también una producción liderada por países con mayor capacidad tecnológica, lo que delimitó una brecha para contextos latinoamericanos con menor infraestructura científica y computacional (Alotaibi & Nassif, 2024).

La dimensión técnica agrupó limitaciones asociadas con calidad, resolución, continuidad e interoperabilidad de los datos ambientales. Los documentos revisados reportaron que la inteligencia artificial dependió de series históricas, sensores, imágenes satelitales, datos georreferenciados y bases de entrenamiento suficientemente representativas; cuando esos insumos fueron incompletos, heterogéneos o sesgados, disminuyó la posibilidad de generalizar modelos a territorios andino-amazónicos, costeros o insulares. Esta restricción fue relevante porque las aplicaciones más robustas se observaron en dominios con mediciones abundantes, como PM2.5, mientras que biodiversidad, agua y monitoreo territorial local presentaron mayor dependencia de validación contextual (Alotaibi & Nassif, 2024; Olawade et al., 2024).

El análisis institucional mostró que la adopción también estuvo limitada por capacidades desiguales de conectividad, gestión de datos y articulación entre organismos ambientales, académicos y tecnológicos. En Ecuador, los indicadores TIC evidenciaron una mejora reciente, pues los hogares con acceso a internet pasaron de 60,4 % en julio de 2022 a 71,3 % en julio de 2025; del mismo modo, las personas que utilizaron internet aumentaron de 69,7 % a 80,1 %, mientras que la tenencia de teléfonos inteligentes alcanzó 59,3 % en 2025 (INEC, 2025). Estos datos describieron una base digital en expansión, aunque todavía insuficiente para asumir que todas las instituciones, territorios y comunidades contaron con capacidades homogéneas para implementar monitoreo ambiental automatizado (INEC, 2025; CEPAL, 2022).

La dimensión ética concentró limitaciones vinculadas con explicabilidad, privacidad, sesgos, seguridad, supervisión humana y trazabilidad de decisiones algorítmicas. En observación de la Tierra, la literatura sobre inteligencia artificial responsable identificó componentes críticos como mitigación de sesgos, geoprivacidad, seguridad, apertura de datos y excelencia científica, especialmente cuando los modelos produjeron mapas, alertas o clasificaciones que podían incidir en comunidades, territorios y recursos naturales (Ghamisi et al., 2025). En el mismo sentido, la recomendación de la UNESCO estableció principios de transparencia, equidad, supervisión humana y protección de derechos, lo que situó la ética como una condición operativa, no como un elemento externo al monitoreo ambiental (UNESCO, 2021).

Como se observa en la Tabla 2, las limitaciones identificadas se distribuyeron en cuatro niveles de análisis: técnico, institucional, territorial y ético. La tabla no presentó frecuencias inferenciales, medias, desviaciones estándar, intervalos de confianza ni valores *p*, porque el diseño fue documental, cualitativo y descriptivo; en cambio, sintetizó indicadores cuantitativos disponibles en fuentes verificadas y patrones recurrentes reportados por la literatura. Esta organización permitió mostrar que las restricciones operaron de manera acumulativa: un déficit de datos afectó la precisión; una brecha institucional limitó la adopción; y una gobernanza débil aumentó los riesgos de uso no transparente (Alotaibi & Nassif, 2024; Ghamisi et al., 2025).

Tabla 2
Limitaciones identificadas para la adopción de inteligencia artificial en el monitoreo ambiental

Nivel limitación	de Hallazgo identificado	descriptivo	Indicador o dato disponible	Efecto observado en la adopción
Técnico	Dependencia de datos completos, representativos, georreferenciados continuos	4.762 publicaciones revisadas sobre IA y monitoreo ambiental; y crecimiento anual de 28,1 % en publicaciones		La precisión dependió de la calidad del dato y de la validación local
Técnico-operativo	Desigual madurez entre dominios ambientales	Modelos de PM2.5 reportaron R ² de 0,83 a 0,91; en agua se reportaron NSE de 0,8 a 0,9		Aire mostró mayor consolidación que biodiversidad y monitoreo local
Institucional	Brecha de conectividad y capacidades digitales	Hogares con internet en Ecuador: 60,4 % en 2022 y 71,3 % en 2025		La implementación dependió de infraestructura y capacidades organizacionales
Territorial	Heterogeneidad entre zonas urbanas, rurales, amazónicas, costeras e insulares	Personas con teléfono inteligente en Ecuador: 59,3 % en 2025		La cobertura tecnológica no garantizó adopción territorial homogénea
Ético	Riesgos de sesgo, baja explicabilidad, geoprivacidad y supervisión insuficiente	Principios UNESCO: transparencia, equidad, supervisión humana y protección de derechos		Las decisiones ambientales requirieron trazabilidad y control humano

Nota. Los indicadores fueron tomados de fuentes bibliográficas e institucionales revisadas; no correspondieron a una base de datos primaria del estudio. R² = coeficiente de determinación; NSE = coeficiente de eficiencia Nash–Sutcliffe; IA = inteligencia artificial (Alotaibi & Nassif, 2024; Ghamisi et al., 2025; INEC, 2025; UNESCO, 2021).

La síntesis descriptiva del subtema mostró que las limitaciones más relevantes no fueron aisladas, sino interdependientes: los modelos necesitaron datos adecuados, las instituciones requirieron conectividad y capacidades de gestión, y las decisiones ambientales exigieron criterios éticos verificables. En Ecuador y América Latina, la expansión de la conectividad ofreció una base favorable, pero los valores disponibles —71,3 % de hogares ecuatorianos con internet y 59,3 % de personas con teléfono inteligente en 2025— evidenciaron que aún persistieron brechas para una adopción territorialmente equitativa (INEC, 2025). El hallazgo central fue que la inteligencia artificial pudo fortalecer el monitoreo ambiental solo cuando la precisión técnica se articuló con gobernanza de datos, infraestructura institucional y responsabilidad ética (Ghamisi et al., 2025; UNESCO, 2021).

4. Discusión

El estudio analiza las oportunidades y limitaciones de la inteligencia artificial aplicada al monitoreo ambiental en Ecuador y América Latina, y los hallazgos sugieren que su principal valor se encuentra en ampliar la capacidad de observación, clasificación, predicción y respuesta frente a problemas ambientales complejos. La evidencia revisada muestra un campo en expansión, con 4.762 publicaciones entre 1991 y 2024 y tasas de crecimiento anual de 28,1 % en publicaciones y 35,6 % en citaciones, lo que confirma que la inteligencia artificial deja de ser un recurso experimental y se incorpora progresivamente como soporte analítico para la gestión ambiental (Alotaibi & Nassif, 2024). Este resultado adquiere mayor relevancia en una región donde los eventos hidrometeorológicos generan pérdidas estimadas en US\$21.000 millones y donde Ecuador conserva cerca de 14 millones de hectáreas de bosque natural sujetas a presiones crecientes (Global Forest Watch, 2026; WMO, 2025). En este sentido, los hallazgos sugieren que el monitoreo ambiental basado en inteligencia artificial puede fortalecer la detección temprana, aunque su contribución debe interpretarse con cautela por el carácter documental y descriptivo del estudio (Olawade et al., 2024).

La comparación con investigaciones previas muestra convergencias claras en torno al potencial de la inteligencia artificial para procesar datos multifuente y convertir observaciones dispersas en productos útiles para la toma de decisiones. Los resultados coinciden con Alotaibi y Nassif (2024), quienes identifican una integración creciente entre ciencias ambientales, computación e ingeniería, y también con Tuia et al. (2024), quienes destacan el papel de la observación terrestre y el aprendizaje profundo en la generación de información ambiental a partir de imágenes satelitales. Los desempeños documentados en contaminación atmosférica —con modelos de PM_{2.5} que explican entre 83 % y 91 % de la variabilidad— refuerzan esta convergencia, especialmente en dominios con datos abundantes y mediciones recurrentes (Alotaibi & Nassif, 2024). Sin embargo, la evidencia también diverge cuando se traslada a biodiversidad, agua o territorios con menor densidad de datos, donde las aplicaciones aparecen menos consolidadas y más dependientes de validación local, como advierten Yuan et al. (2020) y Zhong et al. (2021).

Las implicaciones del estudio se sitúan en tres planos complementarios: teórico, práctico y metodológico. En el plano teórico, los hallazgos permiten comprender la inteligencia artificial no como una tecnología homogénea, sino como un conjunto de capacidades condicionadas por datos, infraestructura, gobernanza y contexto territorial (Ghamisi et al., 2025; UNESCO, 2021). En el plano práctico, los resultados parecen indicar que Ecuador y América Latina pueden beneficiarse de sistemas de alerta, clasificación de cobertura, predicción de calidad del aire y monitoreo forestal, siempre que estos se articulen con capacidades institucionales y criterios de trazabilidad. La expansión de la conectividad en Ecuador —71,3 % de hogares con internet y 80,1 % de personas usuarias en 2025— ofrece una base favorable, pero no elimina la desigualdad territorial ni garantiza adopción institucional homogénea (INEC, 2025). Metodológicamente, el estudio aporta una matriz interpretativa que permite ordenar aplicaciones, oportunidades y limitaciones sin atribuir relaciones causales que el diseño no puede demostrar (Braun & Clarke, 2021; Page et al., 2021).

Las limitaciones del estudio derivan de su carácter cualitativo, documental, no experimental y transversal, por lo que los resultados no permiten estimar efectos causales, validar modelos algorítmicos ni medir impactos económicos directos de la inteligencia artificial en la gestión ambiental. A partir de ello, futuras investigaciones podrían desarrollar estudios comparativos entre países latinoamericanos, evaluar pilotos institucionales de monitoreo con inteligencia artificial, estimar costos de implementación y analizar el desempeño de modelos en territorios andino-amazónicos, costeros e insulares con datos incompletos. También sería pertinente profundizar en explicabilidad, sesgos, geoprivacidad y supervisión humana, dado que la adopción responsable exige algo más que precisión técnica (Ghamisi et al., 2025; UNESCO, 2021). En síntesis, la contribución central del estudio consiste en mostrar que la inteligencia artificial puede fortalecer el monitoreo ambiental solo cuando sus oportunidades operativas se integran con gobernanza de datos, infraestructura institucional y validación contextual, justamente la brecha que motiva este artículo (Alotaibi & Nassif, 2024; Olawade et al., 2024).

5. Conclusiones

Los resultados permiten concluir que la inteligencia artificial aplicada al monitoreo ambiental constituye una herramienta con potencial relevante para fortalecer la observación, clasificación, predicción y gestión de información ambiental en Ecuador y América Latina. Su aporte principal se identifica en la capacidad de procesar datos provenientes de sensores, imágenes satelitales, estaciones de monitoreo y registros ambientales, especialmente en un contexto regional marcado por pérdidas económicas asociadas a eventos hidrometeorológicos y presión creciente sobre bosques, agua, biodiversidad y calidad del aire. No obstante, este potencial debe interpretarse dentro del alcance documental y descriptivo del estudio, sin asumir efectos causales ni impactos directos no comprobados.

Los hallazgos vinculados con los objetivos específicos evidencian que las aplicaciones más consolidadas se concentran en calidad del aire, observación terrestre y monitoreo forestal, mientras que calidad del agua, biodiversidad y riesgos climáticos presentan avances relevantes, pero con mayor dependencia de datos históricos, infraestructura y validación contextual. En conjunto, se observa que la inteligencia artificial ofrece oportunidades operativas para detección temprana, predicción y apoyo a decisiones, aunque esas oportunidades se reducen cuando existen datos incompletos, baja interoperabilidad, sesgos de entrenamiento o capacidades institucionales desiguales.

El estudio aporta una lectura integrada que evita presentar la inteligencia artificial como una solución automática y la sitúa como una capacidad tecnológica condicionada por factores técnicos, institucionales, territoriales y éticos. Esta perspectiva resulta pertinente para el campo académico y profesional porque permite ordenar aplicaciones, oportunidades y limitaciones en una matriz comprensible para investigaciones futuras, políticas públicas y procesos de gestión ambiental. En el plano institucional, los resultados sugieren que la expansión digital en Ecuador representa una base favorable, pero todavía insuficiente para garantizar adopción equitativa y responsable.

A partir de estos hallazgos, se recomienda avanzar con prudencia hacia estudios empíricos, pilotos territoriales y evaluaciones comparativas que permitan estimar desempeño, costos, gobernanza y utilidad real de los sistemas de inteligencia artificial en contextos ambientales latinoamericanos. Futuras investigaciones deberían priorizar territorios con baja disponibilidad de datos, ecosistemas sensibles y escenarios donde la explicabilidad, la geoprivacidad y la supervisión humana resulten determinantes para la toma de decisiones. La contribución central de esta investigación consiste en mostrar que la inteligencia artificial puede fortalecer el monitoreo ambiental si se articula con datos confiables, capacidades institucionales y criterios éticos verificables.

Referencias Bibliográficas

- Alotaibi, E., & Nassif, N. (2024). Artificial intelligence in environmental monitoring: In-depth analysis. *Discover Artificial Intelligence*, 4, Article 84. <https://doi.org/10.1007/s44163-024-00198-1>.
- Bainomugisha, E., Warigo, P. A., Daka, F. B., Nshimye, A., Birungi, M., & Okure, D. (2024). *AI-driven environmental sensor networks and digital platforms for urban air pollution monitoring and modelling*. *Societal Impacts*, 3, Article 100044. <https://doi.org/10.1016/j.socimp.2024.100044>.
- Braun, V., & Clarke, V. (2021). *Thematic analysis: A practical guide*. SAGE. <https://uk.sagepub.com/en-gb/eur/thematic-analysis/book248481>
- Convention on Biological Diversity. (s. f.). *Ecuador: Country profile*. <https://www.cbd.int/countries/profile/?country=ec>
- Ghamisi, P., Yu, W., Marinoni, A., Gevaert, C. M., Persello, C., Selvakumaran, S., Girotto, M., Horton, B. P., Rufin, P., Hostert, P., Pacifici, F., & Atkinson, P. M. (2025). Responsible artificial intelligence for Earth observation: Achievable and realistic paths to serve the collective good. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 13(2), 72–88. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2025.3529726>.
- Global Forest Watch. (2026). *Ecuador deforestation rates and statistics*. <https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/ECU/>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2024). *Estimaciones y proyecciones de población de Ecuador, revisión 2024*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/proyecciones-poblacionales/>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2025). *Tecnologías de la Información y Comunicación-TIC*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/tecnologias-de-la-informacion-y-comunicacion-tic/>
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2024). *El MAATE desarrolló talleres de cocreación para estandarizar la información ambiental e hídrica del Ecuador*. <https://www.ambienteyenergia.gob.ec/ambiente/el-maate-desarrollo-talleres-de-cocreacion-para-estandarizar-la-informacion-ambiental-e-hidrica-del-ecuador/>
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (s. f.). *Sistema Nacional de Monitoreo de Bosques*. <https://snmb.ambiente.gob.ec/snmb/>

Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (s. f.). *Sistema Nacional de Monitoreo de Bosques*. <https://snmb.ambiente.gob.ec/snmb/>

Olawade, D. B., Wada, O. Z., Ige, A. O., Egbewole, B. I., Olojo, A., & Oladapo, B. I. (2024). Artificial intelligence in environmental monitoring: Advancements, challenges, and future directions. *Hygiene and Environmental Health Advances*, 12, Article 100114. <https://doi.org/10.1016/j.heha.2024.100114>.

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>

UNESCO. (2021). *Recommendation on the ethics of artificial intelligence*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380455>.

World Meteorological Organization. (2025). *State of the climate in Latin America and the Caribbean 2024*. <https://wmo.int/resources/publication-series/state-of-climate-latin-america-and-caribbean/state-of-climate-latin-america-and-caribbean-2024>

Yuan, Q., Shen, H., Li, T., Li, Z., Li, S., Jiang, Y., Xu, H., Tan, W., Yang, Q., Wang, J., Gao, J., & Zhang, L. (2020). Deep learning in environmental remote sensing: Achievements and challenges. *Remote Sensing of Environment*, 241, Article 111716.

Zhong, S., Zhang, K., Bagheri, M., Burken, J. G., Gu, A., Li, B., Ma, X., Marrone, B. L., Ren, Z. J., Schrier, J., Shi, W., Tan, H., Wang, T., Wang, X., Wong, B. M., Xiao, X., Yu, X., Zhu, J. J., & Zhang, H. (2021). Machine learning: New ideas and tools in environmental science and engineering. *Environmental Science & Technology*, 55(19), 12741–12754.

CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.