

HACIA UNA GESTIÓN CIRCULAR DE RESIDUOS TECNOLÓGICOS MEDIANTE IA, IOT Y BLOCKCHAIN: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA

TOWARDS A CIRCULAR MANAGEMENT OF TECHNOLOGICAL WASTE THROUGH IA, IOT Y BLOCKCHAIN: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

Tipo de Publicación: Artículo Científico

Recibido: 09/04/2026

Aceptado: 10/05/2026

Publicado: 18/05/2026

Código Único AV: e728

Páginas: 1(1076-1096)

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.20271248>

Autores:

Yermy Vasquez Salis

Licenciada en Educación

Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible

 <https://orcid.org/0009-0002-3249-2057>

E-mail: yvasquez@unheval.edu.pe

Afiliación: Universidad Nacional Hermilio Valdizán de Huánuco

País: República del Perú

José Luis Villavicencio Guardia

Ingeniero Civil

Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible

 <https://orcid.org/0000-0001-5016-6242>

E-mail: jvillavicencio@unheval.edu.pe

Afiliación: Universidad Nacional Hermilio Valdizán de Huánuco

País: República del Perú

Wilder Mondragon Saavedra

Licenciado en Física

Maestro en Ciencias, mención Gestión Ambiental

 <https://orcid.org/0009-0001-2580-4799>

E-mail: wmondragon@unitru.edu.pe

Afiliación: Universidad Nacional de Trujillo

País: República del Perú

Sandra Elena Pajares Centeno

Ingeniero Químico

Maestro en Administración y Dirección de Proyectos

 <https://orcid.org/0000-0003-0459-2827>

E-mail: sandraelena.pajares@epnewman.edu.pe

Afiliación: Escuela de Posgrado Newman

País: República del Perú

Resumen

La gestión de residuos tecnológicos representa un desafío ambiental creciente debido al aumento del consumo de aparatos eléctricos y electrónicos, la rápida obsolescencia de dispositivos y la necesidad de recuperar materiales bajo criterios de economía circular. En este contexto, resulta relevante examinar cómo las tecnologías emergentes pueden fortalecer los procesos de gestión de RAEE y reducir las limitaciones de los modelos tradicionales. El objetivo del artículo fue analizar las sinergias, barreras y oportunidades reportadas en la literatura para la integración conjunta de inteligencia artificial, Internet de las Cosas y blockchain en los procesos de recolección, clasificación, trazabilidad y reciclaje de residuos tecnológicos. Se desarrolló un artículo de revisión sistemática siguiendo criterios de búsqueda, selección y análisis de estudios científicos recientes indexados en Scopus, organizando la evidencia mediante una matriz de extracción orientada por preguntas de investigación. Los resultados evidenciaron que el IoT facilita la captura de datos y el monitoreo en tiempo real, la inteligencia artificial optimiza la clasificación y la toma de decisiones, mientras que blockchain fortalece la trazabilidad, transparencia e integridad de la información. Sin embargo, persisten barreras asociadas con infraestructura, interoperabilidad, costos, capacidades técnicas y regulación. Se concluye que la convergencia IA-IoT-blockchain ofrece un modelo promotor para una gestión de RAEE más eficiente, trazable y sostenible.

Palabras Clave Inteligencia artificial, internet de las cosas, blockchain, residuos tecnológicos, economía circular.

Abstract

Technological waste management represents a growing environmental challenge due to the increased consumption of electrical and electronic equipment, the rapid obsolescence of devices, and the need to recover materials under circular economy principles. In this context, it is relevant to examine how emerging technologies can strengthen WEEE management processes and reduce the limitations of traditional models. The objective of this article was to analyze the synergies, barriers, and opportunities reported in the literature for the joint integration of artificial intelligence, the Internet of Things, and blockchain in the processes of collection, classification, traceability, and recycling of technological waste. A systematic review article was developed following search, selection, and analysis criteria for recent scientific studies indexed in Scopus, organizing the evidence using an extraction matrix guided by research questions. The results showed that IoT facilitates data capture and real-time monitoring, artificial intelligence optimizes classification and decision-making, while blockchain strengthens traceability, transparency, and data integrity. However, barriers related to infrastructure, interoperability, costs, technical capabilities, and regulation remain. It is concluded that the AI-IoT-blockchain convergence offers a promising model for more efficient, traceable, and sustainable WEEE management.

Keywords Artificial intelligence, internet of things, blockchain, e-waste, circular economy.

Introducción

La gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) se ha convertido en una preocupación ambiental relevante, asociada al aumento constante del consumo de tecnología y al reemplazo acelerado de equipos. En este contexto, distintas tecnologías emergentes han cobrado importancia como medios para modernizar los sistemas de gestión de residuos. La inteligencia artificial (IA) se ha utilizado para mejorar la clasificación y el tratamiento de residuos mediante algoritmos de aprendizaje automático y aprendizaje profundo, lo que facilita el reconocimiento oportuno de materiales reciclables y respalda decisiones técnicas durante el proceso (Alabdali, 2025).

De igual manera, el Internet de las Cosas (IoT), vinculado con la Industria 4.0, permite interconectar dispositivos de recolección, controlar el nivel de ocupación de los contenedores y mejorar la organización logística de los residuos. Estas aplicaciones favorecen modelos urbanos más eficientes y sostenibles (Aragão & Júnior, 2021). A su vez, blockchain ofrece condiciones para reforzar la trazabilidad, la transparencia y la seguridad de los datos dentro de las cadenas de gestión de residuos, debido a que permite registrar información de forma protegida e inalterable en cada etapa del proceso (Gulyamov, 2024). Desde este enfoque, la IA, el IoT y blockchain se vinculan con la economía circular y

la sostenibilidad urbana, por lo que constituyen la base teórica de la presente revisión.

La literatura reciente ha mostrado avances importantes en el estudio de estas tecnologías aplicadas a la gestión de residuos, aunque en muchos casos su análisis se ha realizado de manera individual o en contextos distintos a los RAEE. Szpilko et al., (2023) desarrollaron una revisión sistemática con apoyo de análisis bibliométrico sobre 1768 publicaciones indexadas en Scopus y Web of Science, en la que clasificaron la producción científica relacionada con la gestión de residuos en ciudades inteligentes. Sus hallazgos permitieron identificar líneas futuras vinculadas con el avance tecnológico, la digitalización, la recuperación energética y el diseño de políticas públicas. Este estudio aportó una visión amplia sobre las tendencias de investigación en la materia, aunque su alcance se concentró en residuos urbanos en general y no profundizó de manera específica en los residuos tecnológicos.

Por otro lado, Sharma et al., (2024) realizaron una revisión sistemática sobre la transformación digital en la gestión de residuos sanitarios, en la cual evidenciaron que tecnologías como la IA, blockchain, el IoT y los sensores pueden contribuir a resolver problemas asociados con la planificación de rutas, la optimización de recursos y el seguimiento en tiempo real. En esa misma línea, Sira (2024) examinó el potencial de tecnologías

avanzadas, entre ellas la IA, blockchain, big data y el IoT, dentro de los sistemas de gestión ambiental, destacando su utilidad para fortalecer la sostenibilidad y el desempeño ambiental en distintos sectores productivos. Estos aportes reflejan un interés académico creciente por la convergencia tecnológica en la gestión de residuos; sin embargo, también muestran que el conocimiento disponible aún se encuentra fragmentado y disperso.

A pesar de los avances señalados, la literatura revisada presenta vacíos relevantes que justificaron el desarrollo de esta investigación. Yafeng & Shevchenko (2023) indicaron que, aunque China ha impulsado iniciativas vinculadas con el reciclaje electrónico inteligente, los estudios sobre la integración conjunta de varias tecnologías digitales en la gestión de RAEE todavía se encuentran en una etapa inicial. Además, señalaron que muchas soluciones proceden principalmente del sector empresarial y no necesariamente del ámbito académico, lo que evidencia una distancia entre la práctica industrial y la producción científica.

De manera complementaria, Carrasco et al., (2024) demostraron, mediante un análisis bibliométrico, que la aplicación combinada de tecnologías emergentes en la gestión de residuos específicos sigue siendo limitada, pues identificaron únicamente 116 publicaciones en un periodo de siete años. Este resultado confirma la escasez de evidencia empírica sobre enfoques tecnológicos

integrados. Asimismo, Gulyamov (2024) identificó que, aunque los sistemas inteligentes de gestión de residuos pueden reducir costos entre un 25 % y un 40 %, así como mejorar las tasas de reciclaje en más del 40 %, su adopción enfrenta barreras vinculadas con los costos de infraestructura, la insuficiencia de capacidades técnicas y las dificultades asociadas a la gestión del cambio, especialmente en economías emergentes. En conjunto, estos vacíos evidencian la necesidad de una síntesis sistemática que articule las sinergias, barreras y oportunidades derivadas de la integración de IA, IoT y blockchain en la gestión de RAEE.

A partir de los vacíos identificados, el presente artículo de revisión sistemática tuvo como objetivo analizar las sinergias, barreras y oportunidades reportadas en la literatura sobre la integración conjunta de IA, IoT y blockchain en los procesos de recolección, clasificación, trazabilidad y reciclaje de residuos tecnológicos.

Metodología

La presente investigación se desarrolló bajo el enfoque de una revisión sistemática de la literatura. La presente revisión sistemática se diseñó siguiendo las directrices establecidas en la declaración PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (Page et al., 2021).

La búsqueda bibliográfica se realizó exclusivamente en la base de datos Scopus. La selección de esta única base de datos se justifica por múltiples razones metodológicas y prácticas, donde la utilización de una única base de datos robusta permite mantener la consistencia en los metadatos extraídos y facilita la replicabilidad del estudio, criterio fundamental en las revisiones sistemáticas.

Con el propósito de orientar la búsqueda, el análisis y la síntesis de la evidencia científica, se formularon cuatro preguntas de investigación que guiaron el desarrollo de la revisión sistemática: PI1: ¿Cuáles son las tecnologías emergentes (IA, IoT, blockchain) que han sido implementadas de manera individual o combinada en la gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) según la literatura científica reciente? PI2: ¿Qué sinergias se han identificado entre la IA, el IoT y el blockchain cuando se aplican de forma integrada en los procesos de recolección, clasificación, trazabilidad y reciclaje de residuos tecnológicos? PI3: ¿Cuáles son las principales barreras tecnológicas, organizacionales, regulatorias y económicas que limitan la integración conjunta de estas tres tecnologías en la gestión de RAEE? PI4: ¿Qué oportunidades y direcciones futuras de investigación se reportan en la literatura para potenciar la convergencia de IA, IoT y blockchain en la gestión integral de residuos tecnológicos?

La estrategia de búsqueda se diseñó mediante la combinación de palabras clave específicas relacionadas con las tres tecnologías emergentes y la gestión de residuos tecnológicos, conectadas a través de operadores booleanos. La fórmula booleana empleada en Scopus fue la siguiente:

TITLE-ABS-KEY (("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning") AND ("Internet of Things" OR "IoT") AND ("blockchain" OR "distributed ledger" OR "smart contract") AND ("e-waste" OR "electronic waste" OR "WEEE" OR "waste electrical and electronic equipment" OR "technological waste" OR "waste management" OR "solid waste" OR "recycling"))

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Estudios sobre al menos dos tecnologías: IA, IoT o blockchain, aplicadas a residuos sólidos, tecnológicos o electrónicos.	Artículos duplicados.
Artículos indexados en Scopus.	Documentos no científicos o sin revisión por pares.
Publicaciones entre 2020 y 2026.	Publicaciones anteriores a 2020.
Estudios empíricos, teóricos, conceptuales o revisiones sobre recolección, clasificación, trazabilidad o reciclaje.	Estudios sin relación directa con la gestión de residuos o RAEE.
Artículos en texto completo, en inglés o español.	Artículos sin acceso al texto completo.
Estudios que analicen sinergias, barreras u oportunidades tecnológicas.	Estudios con deficiencias metodológicas o resultados no verificables.

Tabla 1. Criterios de inclusión y exclusión

El proceso completo de selección, desde la identificación inicial hasta la inclusión final, fue

documentado mediante un diagrama de flujo fase, garantizando la transparencia y replicabilidad PRISMA que detalla el número de registros en cada del procedimiento metodológico.

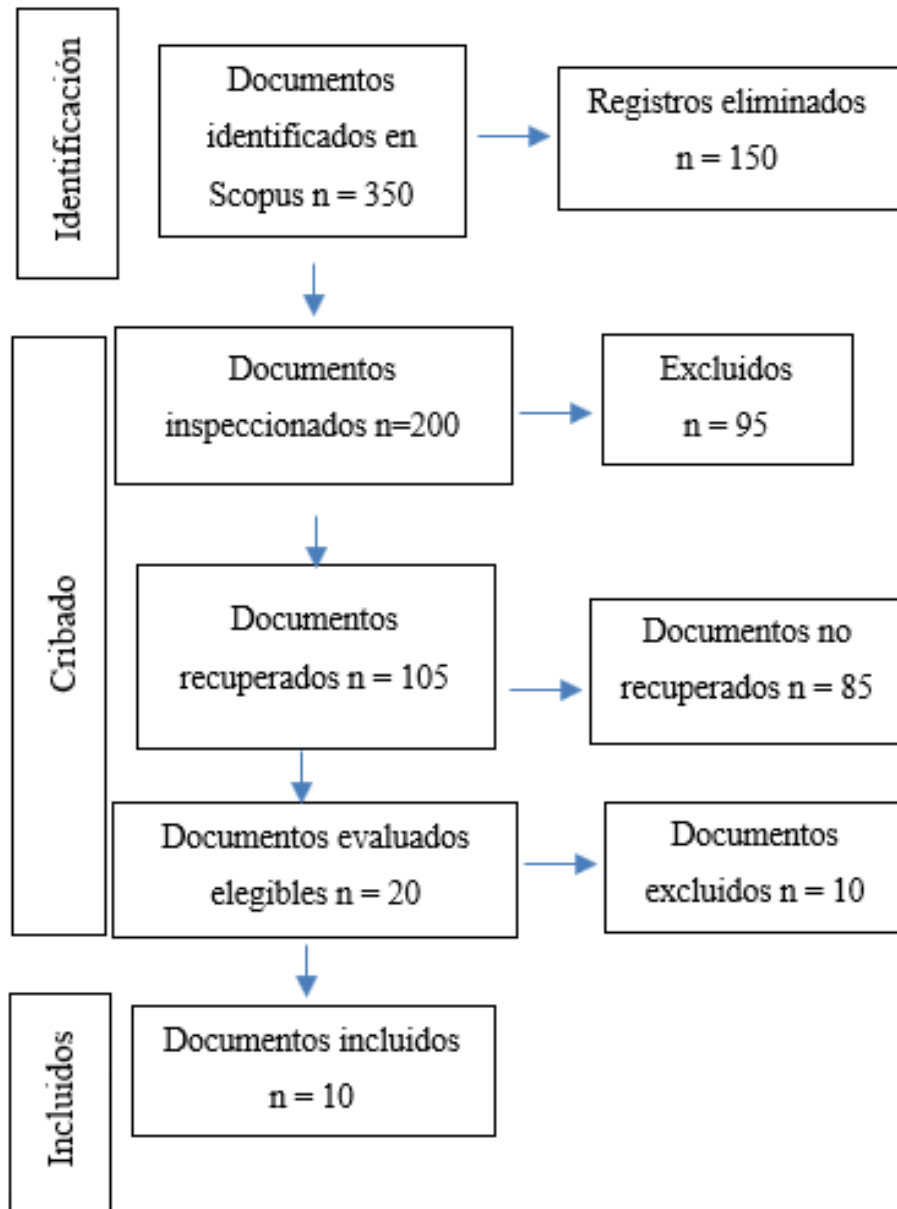


Figura 1. Identificación de estudios que utilizan el método prismático

Resultados

Autor	Tecnología abordada	Proceso de gestión de residuos analizado	PI1: tecnologías implementadas	PI2: sinergias entre IA, IoT y blockchain	PI3: barreras identificadas	PI4: oportunidades y líneas futuras
Alabdali (2025)	IA, IoT y blockchain	Clasificación, monitoreo, trazabilidad, recolección inteligente y reciclaje	El estudio aporta a la PI1 porque presenta una arquitectura que articula IA para clasificación, IoT para monitoreo en tiempo real y blockchain para trazabilidad y seguridad de datos. Aunque se orienta a residuos sólidos en general, su modelo resulta transferible a RAEE por su utilidad en clasificación automatizada y seguimiento del flujo de residuos.	Responde a la PI2 porque muestra que las tres tecnologías pueden operar de forma complementaria: el IoT captura datos, la IA procesa y clasifica, y blockchain registra la información de forma segura y verificable.	Permite identificar barreras asociadas con infraestructura digital, interoperabilidad, calidad de datos, seguridad de la información y capacidad de procesamiento. Estas limitaciones son relevantes para RAEE por la heterogeneidad de componentes y la necesidad de trazabilidad confiable.	Plantea oportunidades vinculadas con clasificación inteligente, automatización de la recolección, trazabilidad descentralizada y mejora de tasas de recuperación de materiales.
Alaoui et al., (2025)	Principalmente IoT; también menciona IA y blockchain	Recolección inteligente, monitoreo, clasificación, rutas inteligentes y reciclaje	Aporta a la PI1 porque identifica tecnologías IoT aplicadas a la gestión de residuos, como sensores, contenedores inteligentes, redes de comunicación, GPS, monitoreo en tiempo real y plataformas de análisis. También reconoce el uso complementario de IA y blockchain.	Su aporte a la PI2 es parcial, porque no desarrolla empíricamente una integración completa de IA, IoT y blockchain, pero sostiene que los enfoques híbridos pueden mejorar la eficiencia, seguridad y trazabilidad de los sistemas de residuos.	Identifica barreras como seguridad de datos, interoperabilidad, escalabilidad, costos de implementación, privacidad, conectividad y ausencia de estándares.	Propone futuras líneas orientadas a soluciones IoT más asequibles, escalables y seguras, integradas con IA y blockchain para mejorar trazabilidad y toma de decisiones.

Autor	Tecnología abordada	Proceso de gestión de residuos analizado	PI1: tecnologías implementadas	PI2: sinergias entre IA, IoT y blockchain	PI3: barreras identificadas	PI4: oportunidades y líneas futuras
Borandag (2023)	Blockchain, IA, IoT, códigos QR, procesamiento de imágenes y deep learning	Clasificación, recolección, trazabilidad y reciclaje de objetos reciclables	Responde de manera directa a la PI1 porque desarrolla una plataforma denominada Recycle Chain , que integra blockchain, IA e IoT. Incorpora un dispositivo inteligente IoT para recolectar objetos reciclables, software de IA para identificarlos y blockchain para registrar el proceso.	Aporta sólidamente a la PI2 porque muestra una integración funcional: la IA identifica y clasifica objetos reciclables, el IoT comunica datos del dispositivo al sistema central y blockchain garantiza un registro seguro, transparente e inalterable de los objetos reciclados.	No desarrolla ampliamente barreras regulatorias u organizacionales, pero permite inferir barreras técnicas relacionadas con infraestructura IoT, entrenamiento de modelos, conectividad, precisión del reconocimiento y seguridad del sistema.	Propone oportunidades relacionadas con plataformas inteligentes de reciclaje, incentivos digitales, sistemas de depósito, clasificación automatizada y trazabilidad blockchain.
Atofarati et al., (2025)	IA, IoT, blockchain, automatización y análisis de datos	Recolección, clasificación, monitoreo, trazabilidad, reciclaje, reutilización y valorización energética	Responde parcialmente a la PI1 porque identifica el uso de IA, IoT y blockchain en sistemas inteligentes de gestión de residuos urbanos. Su propuesta de gestión centralizada incorpora sensores, monitoreo predictivo, clasificación automatizada y trazabilidad.	Aporta a la PI2 porque describe una arquitectura donde el IoT captura datos, la IA optimiza rutas y clasificación, y blockchain puede asegurar registros inviolables sobre cantidades, tiempos y destinos de residuos.	Identifica barreras de infraestructura, altos costos iniciales, brechas regulatorias, falta de capacidades técnicas, conectividad limitada y necesidad de participación de actores.	Plantea oportunidades vinculadas con estudios piloto, análisis costo-beneficio, escalabilidad, alianzas público-privadas, incentivos regulatorios y colaboración entre gobierno, empresas y comunidades.
Ciano et al., (2025)	Tecnologías de Industria 4.0: IoT, IA, blockchain, big data, gemelos digitales, realidad aumentada/virtual, manufactura aditiva y robótica	Economía circular, reciclaje, recuperación de materiales, reutilización, reacondicionamiento, remanufactura y extensión de vida útil	Aporta a la PI1 de manera indirecta porque identifica tecnologías digitales aplicables a estrategias circulares. Destaca que IoT, IA y blockchain pueden apoyar reciclaje y	Contribuye parcialmente a la PI2 porque explica cómo las tecnologías de Industria 4.0 pueden complementar estrategias circulares: IoT para visibilidad,	Señala una brecha de conocimiento sobre cómo las organizaciones pueden integrar efectivamente tecnologías de Industria 4.0 con estrategias de economía circular.	Propone futuras investigaciones sobre estrategias menos exploradas como reutilización, reparación, reacondicionamiento, remanufactura y repurposing, todas

Autor	Tecnología abordada	Proceso de gestión de residuos analizado	PI1: tecnologías implementadas	PI2: sinergias entre IA, IoT y blockchain	PI3: barreras identificadas	PI4: oportunidades y líneas futuras
			recuperación de materiales, aspectos relevantes para RAEE.	IA para análisis y automatización, y blockchain para trazabilidad y transparencia.	También advierte que los marcos existentes suelen ser limitados por sector, tecnología o modelo circular.	pertinentes para ampliar el enfoque de RAEE más allá del reciclaje final.
Jiang et al., (2023)	Blockchain, IoT, IA, machine learning, big data, cloud/edge computing, smart contracts y LCA	Segregación, trazabilidad, reciclaje, tratamiento, disposición final, logística de residuos y economía circular	Responde directamente a la PI1 porque identifica tecnologías digitales aplicadas a la gestión de residuos, con énfasis en blockchain y su integración con IoT, IA, machine learning, cloud/edge computing y smart contracts. Además, menciona aplicaciones de trazabilidad de e-waste.	Aporta sólidamente a la PI2 porque explica que blockchain puede integrarse con IoT e IA para conectar actores, asegurar autenticidad de datos, monitorear etapas del residuo y facilitar trazabilidad digital en sistemas de economía circular.	Identifica barreras como baja aceptación de usuarios, problemas de transparencia en la adquisición de datos, dificultades de adopción, balance costo-beneficio, inmadurez de algunas aplicaciones y desajuste entre capacidad tecnológica y capacidad de gestión.	Propone oportunidades relacionadas con integración blockchain-IoT-IA, smart contracts, digitalización de residuos, LCA, economía circular, cuantificación de carbono y mejora de trazabilidad en residuos complejos.
Liu et al., (2023)	Cloud services, IA, big data analytics, blockchain e IoT	Gestión sostenible de cadenas de suministro, economía circular, diseño, producción, distribución, uso y fin de vida del producto	Aporta a la PI1 de forma indirecta porque identifica tecnologías digitales de Industria 4.0 que permiten implementar cadenas de suministro circulares. Su énfasis en fin de vida, reutilización, remanufactura y reciclaje es aplicable a residuos tecnológicos.	Contribuye a la PI2 mediante el marco CAB ³ IN, que integra servicios en la nube, IA, big data, blockchain e IoT para generar y procesar datos a lo largo del ciclo de vida del producto.	Señala como barrera la falta de investigación sobre cómo las tecnologías digitales benefician la gestión sostenible de cadenas de suministro desde la lógica de economía circular. También identifica poca claridad sobre funciones, métodos de implementación y capacidades físicas y virtuales.	Plantea oportunidades sobre cadenas de suministro digitalizadas, trazabilidad de productos, gestión del fin de vida, decisiones sostenibles basadas en datos y modelos circulares habilitados por tecnologías digitales.



Autor	Tecnología abordada	Proceso de gestión de residuos analizado	PI1: tecnologías implementadas	PI2: sinergias entre IA, IoT y blockchain	PI3: barreras identificadas	PI4: oportunidades y líneas futuras
Rodrigues et al., (2025)	IoT, IA, big data analytics, cloud computing y blockchain	Logística inversa: recolección, transporte, almacenamiento, clasificación, remanufactura, reciclaje y disposición final	Responde a la PI1 porque identifica tecnologías de Industria 4.0 aplicables a acciones de logística inversa. Aunque se enfoca en residuos sólidos, su estructura es transferible a RAEE por los procesos de recolección, clasificación, reciclaje, remanufactura y disposición.	Aporta a la PI2 porque sostiene que la combinación de IoT, IA, big data, computación en la nube y blockchain mejora trazabilidad, automatización, sostenibilidad y toma de decisiones en logística inversa.	Identifica barreras propias de la logística inversa tradicional: ineficiencias operativas, altos costos, limitada trazabilidad, deficiente recuperación de materiales y dificultades para reintegrar residuos al ciclo productivo.	Propone oportunidades para optimizar rutas, clasificación automatizada, mantenimiento predictivo, smart tracking, reciclaje eficiente y reintegración de materiales mediante tecnologías digitales.
Stephen et al., (2026)	IA, IoT, blockchain, sensores, edge computing, digital twin, Hyperledger Fabric y analítica en la nube	Clasificación, monitoreo, trazabilidad, recuperación circular y reciclaje de residuos industriales	Responde a la PI1 porque presenta una arquitectura integrada de IA, IoT y blockchain para optimizar el reciclaje de residuos industriales. Aunque se aplica a residuos de carbón, el modelo es transferible a RAEE por su énfasis en clasificación automatizada, sensores, trazabilidad y recuperación circular.	Aporta directamente a la PI2: la IA realiza reconocimiento y clasificación, el IoT monitorea en tiempo real, y blockchain asegura trazabilidad, integridad de datos y reportes verificables.	Identifica barreras relacionadas con integración a gran escala, viabilidad económica, consumo energético, infraestructura tecnológica, escalabilidad y transición laboral.	Propone oportunidades sobre digital twins, trazabilidad blockchain, visión artificial, sensores IoT, análisis costo-beneficio, recuperación circular y modelos de transición justa.
Vesmaş et al., (2026)	IoT, IA, blockchain, Web 3.0, smart containers y PAYT	Gestión inteligente de residuos municipales, identificación de usuarios, monitoreo, cálculo tarifario, trazabilidad, separación	Aporta a la PI1 porque identifica tecnologías emergentes aplicadas a la gestión inteligente de residuos. Aunque se enfoca en residuos	Responde a la PI2 porque integra IoT como capa de adquisición de datos, IA como mecanismo de optimización	Identifica barreras como fragmentación tecnológica, inversión inicial, necesidad de infraestructura digital, conectividad, gestión de	Propone oportunidades sobre pilotos de implementación, sistemas PAYT digitalizados, monitoreo en tiempo real, automatización tarifaria,



Autor	Tecnología abordada	Proceso de gestión de residuos analizado	PI1: tecnologías implementadas	PI2: sinergias entre IA, IoT y blockchain	PI3: barreras identificadas	PI4: oportunidades y líneas futuras
		en fuente y optimización de rutas	municipales, su marco puede transferirse a RAEE mediante sistemas de retorno, identificación de usuarios, incentivos y trazabilidad.	predictiva y blockchain/Web 3.0 como soporte de trazabilidad, transparencia y gobernanza descentralizada.	datos, aceptación ciudadana y ausencia de validación empírica del modelo.	incentivos conductuales y gobernanza basada en datos.

Tabla 2. Tecnologías emergentes en la gestión de RAEE

Discusión de resultados

La acción conjunta de inteligencia artificial, Internet de las Cosas y blockchain constituye una línea emergente para optimizar la gestión de residuos tecnológicos, especialmente en los procesos de recolección, clasificación, trazabilidad y reciclaje. Sin embargo, también se observó que la evidencia disponible todavía se encuentra en una fase de consolidación, pues una parte importante de los estudios incluidos no se enfocó exclusivamente en RAEE, sino en residuos sólidos, logística inversa, economía circular o residuos industriales. Esta situación confirma que la convergencia tecnológica IA-IoT-blockchain presenta un alto potencial de transferencia hacia la gestión de residuos tecnológicos, aunque aún requiere mayor validación empírica en escenarios específicos de RAEE.

Un primer resultado relevante fue que las tecnologías emergentes se han implementado de manera diferenciada según el proceso de gestión de residuos. La IA apareció principalmente asociada con la clasificación automatizada, el reconocimiento de objetos, la predicción de volúmenes y la optimización de decisiones operativas. Este hallazgo coincide con Alabdali (2025), quien propuso un sistema de clasificación de residuos basado en IA, seguimiento inteligente e integración IoT, orientado a mejorar la identificación y gestión de residuos. De forma

similar, Borandag (2023) desarrolló una plataforma de reciclaje con procesamiento de imágenes, aprendizaje profundo, códigos QR, IoT y blockchain, demostrando que la IA puede fortalecer la clasificación de materiales reciclables. Estos resultados también convergen con Stephen et al., (2026), quienes validaron un marco AI-IoT-Blockchain para residuos industriales, donde la IA permitió mejorar la precisión en la clasificación y apoyar la recuperación circular de recursos.

No obstante, la evidencia revisada muestra una divergencia importante respecto al objeto de aplicación. Mientras Borandag (2023), Alabdali (2025) y Stephen et al., (2026) demostraron aplicaciones tecnológicas concretas en reciclaje o residuos industriales, los estudios específicamente centrados en RAEE fueron menos frecuentes. Esta diferencia sugiere que la investigación sobre tecnologías inteligentes en residuos ha avanzado más rápidamente en residuos sólidos generales, residuos industriales y sistemas urbanos que en la gestión específica de aparatos eléctricos y electrónicos. Esta brecha coincide con lo señalado por Yafeng & Shevchenko (2023), quienes indicaron que las investigaciones sobre tecnologías digitales aplicadas al e-waste todavía se encuentran en desarrollo y que muchas soluciones proceden del sector empresarial antes que del ámbito académico.

Un segundo resultado fue que el IoT cumplió un rol estructural como tecnología de captura,

conexión y monitoreo de datos. En los estudios revisados, el IoT se vinculó con sensores, contenedores inteligentes, monitoreo de llenado, identificación de usuarios, seguimiento de rutas y transmisión de datos en tiempo real. Este hallazgo converge con Alaoui et al., (2025), quienes identificaron que los sistemas IoT permiten mejorar la recolección inteligente, el monitoreo operativo y la optimización de rutas en ciudades inteligentes. Del mismo modo, Rodrigues et al., (2025) sostuvieron que el IoT fortalece las acciones de logística inversa al mejorar la trazabilidad de productos, materiales y residuos durante la recolección, transporte, almacenamiento, clasificación y disposición final. En el caso de RAEE, esta función resulta especialmente relevante debido a la necesidad de registrar el recorrido de equipos, componentes y materiales críticos desde el punto de descarte hasta su valorización o disposición segura.

Sin embargo, los resultados también muestran que el IoT por sí solo no resuelve los problemas estructurales de la gestión de RAEE. Su valor depende de su articulación con sistemas de análisis, plataformas de trazabilidad y mecanismos institucionales capaces de convertir los datos capturados en decisiones operativas. Esta interpretación coincide con Vesmaş et al., (2026), quienes argumentaron que el monitoreo en tiempo real solo adquiere eficacia cuando se integra con incentivos económicos, análisis predictivo y

gobernanza digital. Por tanto, el IoT debe ser entendido como una capa inicial de adquisición de datos, pero no como una solución integral aislada.

Un tercer resultado central fue que blockchain se presentó como la tecnología más vinculada con la trazabilidad, la transparencia, la integridad de datos y la confianza entre actores. Jiang et al., (2023) señalaron que blockchain puede fortalecer la gestión de residuos mediante registros distribuidos, contratos inteligentes, trazabilidad de datos y articulación con IoT, IA y análisis de ciclo de vida. Este resultado converge con Borandag (2023), quien utilizó blockchain para registrar objetos reciclables, gestionar incentivos y garantizar transparencia en la plataforma Recycle Chain. Asimismo, Vesmaş et al., (2026) destacaron que blockchain y Web 3.0 pueden sostener modelos de gobernanza descentralizada y registro verificable en sistemas inteligentes de residuos.

En el caso de los RAEE, la trazabilidad blockchain adquiere una relevancia particular porque estos residuos contienen materiales de valor económico, componentes reutilizables y sustancias potencialmente peligrosas. Por ello, su gestión exige registros confiables sobre origen, transporte, clasificación, tratamiento, reciclaje y disposición final. Este resultado se alinea con Gulyamov (2024), quien sostuvo que los sistemas inteligentes de residuos basados en IoT, blockchain y análisis de datos pueden mejorar la eficiencia operativa, reducir

costos y fortalecer la trazabilidad. No obstante, los hallazgos también evidencian que blockchain aún enfrenta limitaciones de adopción, especialmente por los costos de implementación, la interoperabilidad con sistemas existentes y la necesidad de aceptación institucional y social.

En cuanto a las sinergias tecnológicas, los resultados muestran que la integración IA-IoT-blockchain genera un modelo funcional de tres capas. En primer lugar, el IoT permite capturar datos desde contenedores, sensores, dispositivos o centros de acopio. En segundo lugar, la IA procesa esos datos para clasificar residuos, predecir volúmenes, optimizar rutas o apoyar decisiones de reciclaje. En tercer lugar, blockchain registra la información relevante y garantiza trazabilidad, seguridad e integridad. Esta lógica se observa en Alabdali (2025), Borandag (2023), Jiang et al., (2023), Stephen et al., (2026) y Vesmaş et al., (2026), aunque con diferencias en el tipo de residuo y en el nivel de validación empírica.

Estos resultados convergen con Rodrigues et al., (2025), quienes afirmaron que las tecnologías de Industria 4.0 pueden mejorar la logística inversa mediante automatización, trazabilidad, análisis de datos y sostenibilidad operativa. También se relacionan con Liu et al., (2023), quienes propusieron el marco CAB²IN para integrar servicios en la nube, IA, big data, blockchain e IoT en cadenas de suministro circulares. Desde esta

perspectiva, la gestión de RAEE no debe limitarse al reciclaje final, sino que debe comprenderse como una cadena circular que involucra diseño, consumo, devolución, recolección, clasificación, recuperación, remanufactura y disposición. Esta interpretación coincide con Ciano et al., (2025), quienes señalaron que las tecnologías de Industria 4.0 pueden apoyar estrategias de economía circular más amplias, como reutilización, reparación, reacondicionamiento, remanufactura, reciclaje y recuperación de materiales.

Respecto a las barreras, los estudios revisados evidenciaron obstáculos tecnológicos, organizacionales, regulatorios y económicos. Las barreras tecnológicas incluyeron interoperabilidad limitada, baja calidad de datos, conectividad insuficiente, ciberseguridad, escalabilidad y necesidad de infraestructura digital. Estas limitaciones coinciden con Alaoui et al., (2025), quienes identificaron problemas de privacidad, seguridad de datos, conectividad, costos y ausencia de estándares en sistemas IoT aplicados a residuos. De igual modo, Jiang et al., (2023) señalaron que la adopción de blockchain enfrenta dificultades relacionadas con la aceptación de usuarios, la gestión de datos, el balance costo-beneficio y la inmadurez de algunas aplicaciones. En el caso de RAEE, estas barreras se intensifican por la heterogeneidad de los dispositivos, la diversidad de materiales, la presencia de actores informales y la

necesidad de cumplir regulaciones ambientales específicas.

Las barreras organizacionales y regulatorias también resultaron significativas. Atofarati et al., (2025) resaltaron que la implementación de sistemas inteligentes de residuos requiere capacidades institucionales, participación de actores, inversión pública y marcos regulatorios adecuados. Rodrigues et al., (2025) también señalaron que la logística inversa tradicional enfrenta problemas de trazabilidad limitada, altos costos operativos y dificultades para reincorporar materiales al ciclo productivo. Estos hallazgos son consistentes con Gulyamov (2024), quien identificó que la adopción de tecnologías inteligentes puede verse limitada por costos de infraestructura, falta de capacidades técnicas y resistencia al cambio. En consecuencia, la integración tecnológica en RAEE no depende únicamente de la disponibilidad de herramientas digitales, sino también de condiciones institucionales, normativas y económicas que permitan su aplicación sostenible.

En relación con las oportunidades, la revisión permitió identificar cuatro líneas principales. La primera corresponde a la clasificación automatizada de residuos tecnológicos mediante IA y visión artificial. Esta línea se sustenta en Borandag (2023), Alabdali (2025) y Stephen et al., (2026), quienes demostraron que la IA puede mejorar la identificación y separación de residuos. La segunda

oportunidad se relaciona con la trazabilidad blockchain de los flujos de RAEE, especialmente para garantizar transparencia en la recolección, transporte, reciclaje y disposición final. Esta línea coincide con Jiang et al., (2023) y Vesmaş et al., (2026). La tercera oportunidad se vincula con la logística inversa inteligente, apoyada en IoT, IA, big data, computación en la nube y blockchain, tal como plantearon Rodrigues et al., (2025) y Liu et al., (2023). La cuarta oportunidad corresponde a la integración de la gestión de RAEE con estrategias de economía circular, especialmente reparación, reutilización, remanufactura, recuperación de materiales críticos y reducción del descarte prematuro, como señalaron Ciano et al., (2025).

Estos resultados permiten sostener que la integración de IA, IoT y blockchain no debe concebirse únicamente como una innovación tecnológica, sino como una estrategia sistémica para mejorar la sostenibilidad, la eficiencia y la responsabilidad en la gestión de residuos tecnológicos. Sin embargo, la literatura aún muestra un predominio de marcos conceptuales, revisiones y modelos transferibles, con menor cantidad de estudios empíricos centrados específicamente en RAEE. Por tanto, el principal aporte de esta revisión radica en organizar y sintetizar una evidencia dispersa, identificando cómo estas tecnologías pueden articularse en los procesos clave de recolección, clasificación, trazabilidad y reciclaje.

La primera limitación fue el uso exclusivo de Scopus como base de datos. Aunque esta base ofrece cobertura amplia y estándares de indexación reconocidos, la exclusión de Web of Science, IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink u otras bases especializadas pudo haber dejado fuera estudios técnicos o aplicaciones de ingeniería relevantes para IA, IoT y blockchain en RAEE. Esta decisión favoreció la consistencia metodológica, pero pudo limitar la amplitud de la evidencia recuperada.

La segunda limitación fue la escasez de estudios centrados exclusivamente en RAEE. Varios artículos incluidos abordaron residuos sólidos, residuos municipales, residuos industriales, logística inversa o economía circular en general. Si bien estos estudios fueron pertinentes por su valor transferible, su inclusión exige cautela al interpretar los resultados, porque no todos los hallazgos pueden generalizarse directamente a residuos tecnológicos.

La tercera limitación se relacionó con la heterogeneidad metodológica de los estudios incluidos. La matriz integró revisiones sistemáticas, estudios conceptuales, marcos tecnológicos, simulaciones y artículos aplicados. Esta diversidad enriqueció el análisis, pero impidió realizar una comparación cuantitativa homogénea o una evaluación estadística del impacto de las tecnologías en indicadores como eficiencia, costos, reducción de emisiones o tasas de reciclaje.

La cuarta limitación fue la ausencia de metaanálisis. Debido a la naturaleza heterogénea de los estudios y a la diversidad de métricas reportadas, no fue posible estimar efectos agregados sobre el rendimiento de la integración IA–IoT–blockchain. En consecuencia, los hallazgos deben interpretarse como una síntesis cualitativa y analítica, no como una medición cuantitativa del desempeño tecnológico.

La quinta limitación fue el predominio de evidencia conceptual o transferible. Aunque algunos estudios reportaron desarrollos tecnológicos y validaciones, gran parte de la literatura analizada se orientó a proponer marcos, arquitecturas o rutas futuras. Esto limita la posibilidad de afirmar que la integración de IA, IoT y blockchain ya se encuentra plenamente implementada en la gestión real de RAEE.

La sexta limitación corresponde al periodo de análisis. Al concentrarse en publicaciones recientes entre 2020 y 2026, la revisión permitió capturar tendencias actuales, pero pudo excluir antecedentes previos que explican la evolución histórica de la gestión digital de residuos, la logística inversa o la economía circular aplicada a aparatos eléctricos y electrónicos.

Futuras investigaciones deberían desarrollar estudios empíricos centrados específicamente en RAEE, especialmente en plantas de reciclaje, centros de acopio, sistemas municipales de retorno,

programas de responsabilidad extendida del productor y cadenas de recuperación de materiales críticos. Estos estudios permitirían validar si los modelos transferibles identificados en residuos sólidos, industriales o municipales funcionan de manera efectiva en residuos tecnológicos.

También se recomienda realizar estudios piloto que integren simultáneamente IA, IoT y blockchain en procesos concretos de RAEE. Por ejemplo, podrían diseñarse sistemas en los que sensores IoT registren el ingreso de dispositivos, algoritmos de IA clasifiquen componentes reutilizables o peligrosos, y blockchain almacene la trazabilidad del residuo desde su recolección hasta su reciclaje o disposición final.

Otra línea futura relevante consiste en evaluar el costo-beneficio de estas tecnologías. La literatura revisada identifica beneficios potenciales en eficiencia, trazabilidad y sostenibilidad, pero todavía se requiere evidencia sobre inversión inicial, costos de mantenimiento, retorno económico, ahorro operativo y viabilidad para municipios, empresas recicladoras y economías emergentes.

Asimismo, se recomienda profundizar en la interoperabilidad de plataformas. La gestión de RAEE involucra fabricantes, distribuidores, consumidores, recicladores, autoridades ambientales y operadores logísticos. Por ello, futuros estudios deberían analizar estándares de datos, arquitectura de plataformas, compatibilidad

tecnológica y gobernanza de la información entre actores.

Futuras investigaciones también deberían examinar el papel de la regulación ambiental y la responsabilidad extendida del productor en la adopción de IA, IoT y blockchain. La trazabilidad digital podría fortalecer el cumplimiento normativo, pero requiere marcos legales que reconozcan registros digitales, contratos inteligentes, certificaciones de reciclaje y mecanismos de auditoría tecnológica.

Finalmente, se recomienda incorporar dimensiones sociales y laborales. La automatización de procesos de clasificación y reciclaje puede modificar las funciones de trabajadores, recicladores y operadores logísticos. Por ello, futuros estudios deberían analizar estrategias de capacitación, transición justa, inclusión de recicladores informales y aceptación social de sistemas inteligentes de gestión de residuos tecnológicos.

Los hallazgos de esta revisión sistemática muestran que la articulación de la IA, el IoT y blockchain puede contribuir de manera relevante a la modernización de la gestión de RAEE. La IA favorece el análisis de información y la clasificación automatizada de materiales; el IoT facilita la conectividad, el seguimiento operativo y la generación de datos en tiempo real; mientras que blockchain refuerza la trazabilidad, la transparencia

y la confiabilidad de la cadena de gestión. No obstante, la adopción de estas tecnologías exige atender limitaciones técnicas, económicas, normativas y organizacionales, además de ampliar la evidencia empírica centrada específicamente en los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

Conclusiones

Los resultados de esta revisión evidenciaron que la integración de la inteligencia artificial, el Internet de las Cosas y blockchain constituye una estrategia emergente con alto potencial para fortalecer la gestión de residuos tecnológicos. La IA se identificó como una tecnología clave para la clasificación automatizada, el reconocimiento de materiales, la predicción de volúmenes y el apoyo a la toma de decisiones operativas. El IoT permitió ampliar las capacidades de monitoreo mediante sensores, contenedores inteligentes, identificación de usuarios y seguimiento en tiempo real. Blockchain, por su parte, aportó valor en la trazabilidad, transparencia, integridad de datos y verificación de las etapas del proceso. En conjunto, estos hallazgos contribuyen al campo de estudio al demostrar que la gestión de RAEE puede avanzar desde modelos fragmentados y reactivos hacia sistemas inteligentes, trazables y orientados a la economía circular.

En relación con el objetivo de investigación, el estudio permitió analizar que las principales sinergias entre IA, IoT y blockchain se producen

cuando estas tecnologías operan de forma complementaria: el IoT captura datos en tiempo real, la IA procesa y optimiza esos datos, y blockchain asegura su registro confiable e inalterable. Esta integración resulta especialmente pertinente para los procesos de recolección, clasificación, trazabilidad y reciclaje de residuos tecnológicos. No obstante, también se identificaron barreras relevantes, entre ellas la limitada interoperabilidad, los altos costos de implementación, la insuficiente infraestructura digital, la baja calidad de datos, los riesgos de ciberseguridad, la falta de estándares y las debilidades regulatorias. Frente a ello, las oportunidades más importantes se relacionan con el desarrollo de sistemas de clasificación inteligente, logística inversa digitalizada, trazabilidad mediante contratos inteligentes, incentivos para la devolución de equipos, recuperación de materiales críticos y modelos de responsabilidad extendida del productor apoyados en tecnologías digitales.

El presente trabajo correspondió a un artículo de revisión sistemática, orientado a sintetizar y analizar la literatura científica reciente sobre tecnologías emergentes aplicadas a la gestión de residuos tecnológicos. Este enfoque permitió organizar la evidencia disponible, comparar estudios previos y reconocer patrones comunes en torno a las aplicaciones, limitaciones y posibilidades de integración tecnológica. Asimismo, la revisión

permitió advertir que una parte considerable de la evidencia proviene de estudios sobre residuos sólidos, residuos municipales, residuos industriales, logística inversa o economía circular, por lo que varios aportes fueron considerados como transferibles al campo de los RAEE y no como evidencia exclusivamente específica de residuos tecnológicos.

Finalmente, esta revisión permite sostener que la convergencia entre IA, IoT y blockchain puede contribuir de manera significativa a la transición hacia sistemas de gestión de RAEE más eficientes, transparentes y sostenibles. Sin embargo, su consolidación requiere estudios empíricos específicos, pilotos tecnológicos, análisis costo-beneficio y marcos regulatorios que faciliten la interoperabilidad, la trazabilidad y la gobernanza de datos. Futuras investigaciones deberían evaluar aplicaciones reales en centros de acopio, plantas de reciclaje, programas de responsabilidad extendida del productor y cadenas de recuperación de materiales críticos.

También resulta necesario incorporar dimensiones sociales y laborales, especialmente en contextos donde participan recicladores informales, operadores logísticos y actores municipales. De este modo, el conocimiento generado podrá avanzar desde modelos conceptuales hacia soluciones aplicables, escalables y ambientalmente responsables.

Referencias

- Alabdali, A. M. (2025). Blockchain based solid waste classification with AI powered tracking and IoT integration. *Scientific Reports*, 15(1). Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97030-2>
- Alaoui, M. L. T., Belhiah, M., & Ziti, S. (2025). IoT-enabled waste management in smart cities: A systematic literature review. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 16(4), 131–138.
- Aragão, W. R., & Júnior, A. I. de O. (2021). Internet das coisas na gestão de resíduos sólidos: revisão sistemática com análise bibliométrica da literatura. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 6(3), 194–209. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.24221/jeap.6.3.2021.4245.194-209>
- Atofarati, E. O., Adogbeji, V. O., & Enweremadu, C. C. (2025). Sustainable smart waste management solutions for rapidly urbanizing African cities. *Utilities Policy*, 95, 101961. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.jup.2025.101961>
- Borandag, E. (2023). A blockchain-based recycling platform using image processing, QR codes, and IoT system. *Sustainability*, 15(7), 6116. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.3390/su15076116>
- Carrasco, D. I. C., Ruiz, M. G. T., López, D., Hermida, C. E. C., Arellano, V. M. L., Zavala-Tobar, M. A., & Godoy, M. M. P. (2024). Bibliometric analysis of the applicability of artificial intelligence in the integrated management of medical waste. *Data & Metadata*, 3. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.56294/dm2024.375>
- Ciano, M. P., Peron, M., Panza, L., & Pozzi, R. (2025). Industry 4.0 technologies in support of circular economy: A 10R-based integration framework. *Computers & Industrial Engineering*, 201, 110867. Documento en línea.

- Disponibile
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.110867>
- Gulyamov, S. (2024). Intelligent waste management using IoT, blockchain technology and data analytics. *E3s Web of Conferences*, 501, 01010. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450101010>
- Jiang, P., Zhang, L., You, S., Fan, Y. V., Tan, R. R., Klemeš, J. J., & You, F. (2023). Blockchain technology applications in waste management: Overview, challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 421, 138466. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138466>
- Liu, L., Song, W., & Liu, Y. (2023). Leveraging digital capabilities toward a circular economy: Reinforcing sustainable supply chain management with Industry 4.0 technologies. *Computers & Industrial Engineering*, 178, 109113. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109113>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Rodrigues, S. P., Gomes, L. de C., Peres, F. A. P., Correa, R. G. de F., & Baierle, I. C. (2025). A framework for leveraging digital technologies in reverse logistics actions: A systematic literature review. *Logistics*, 9(2), 54. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.3390/logistics9020054>
- Sharma, V., Jamwal, A., Agrawal, R., & Pratap, S. (2024). A review on digital transformation in healthcare waste management: Applications, research trends and implications. *Waste Management & Research the Journal for a Sustainable Circular Economy*, 43(6), 828–849. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1177/0734242x241285420>
- Sira, M. (2024). Potential of Advanced Technologies for Environmental Management Systems. *Management Systems in Production Engineering*, 32(1), 33–44. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.2478/mspe-2024-0004>
- Stephen, A. O., Liu, C., & Xin, G. (2026). A smart AI–IoT–blockchain framework for sustainable coal gangue waste systems and circular resource recovery. *Cleaner Waste Systems*, 14, 100497. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2026.100497>
- Szpilko, D., Gallegos, A. de la T., Naharro, F. J., Rzepka, A., & Remiszewska, A. (2023). Waste Management in the Smart City: Current Practices and Future Directions. *Resources*, 12(10), 115. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.3390/resources12100115>
- Vesmaš, D.-M., Dragomir, A. N., Bayraktar, D., & Morari Bayraktar, A. (2026). Integrating PAYT and emerging technologies for smart waste management: Towards a circular economy framework. *Sustainability*, 18(7), 3510. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.3390/su18073510>
- Yafeng, H., & Shevchenko, T. (2023). Exploring Digital Technologies and Smart Systems Used in E-Waste Management in China: Seminal Research Themes. *Bulletin of Sumy National Agrarian University*, (3 (95), 3-9. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.32782/bsnau.2023.3.1>