

Sistema Inteligente Aplicado al Reciclaje de Residuos Electrónicos con Big Data e IoT: Estudio de caso en empresas recicladoras de Medellín

Intelligent System Applied to Electronic Waste Recycling with Big Data and IoT: A Case Study in Recycling Companies of Medellín

Sistema Inteligente Aplicado à Reciclagem de Resíduos Eletrônicos com Big Data e IoT:
Estudo de Caso em Empresas de Reciclagem em Medellín

Luis Carlos Quintero Botero, <https://orcid.org/0009-0005-9381-5165>

Fundación Universitaria del Área Andina

*Autor para correspondencia: luis.quintero@uniremington.edu.co

RESUMEN

El artículo desarrollado establece como objetivo principal el observar las características y retos en la utilización de tecnologías emergentes tales como; Big Data, (IoT) en lo referente a los sistemas de reciclaje de residuos electrónicos en tres empresas recicladoras de la ciudad de Medellín. Lo anterior por medio de una metodología cualitativa de estudio de multicaso (Stake, 1995).

Las fuentes de información utilizadas están estructuradas en tres modelos: Tres (3) entrevistas semiestructuradas a personal directivo, treinta (30) encuestas al personal operativo y la observación directa a las tres (3) empresas seleccionadas. Esta recolección se estableció para estrictos principios éticos, cláusula de confidencialidad y su respectivo consentimiento informado.

En la fasea de recopilación de datos, se consiguió un 100 % respecto a la muestra estimada. Esta información demuestra la cobertura total de las herramientas cualitativas, garantizando la profundidad analítica y la fiabilidad de los hallazgos.

Los resultados emanados reflejan una escasa implementación de las tecnologías emergentes, todo ello enmarcado en la estructura rudimentaria de los procesos de reciclaje, altos costos, baja capacitación en temas tecnológicos y vacíos normativos y legales en Colombia. No obstante, se identificaron aspectos positivos que permiten deslumbrar un panorama más alentador en temas de innovación tecnológica que permitan generar mejoras en la eficiencia operativa y administrativas de las organizaciones dedicadas al reciclaje de residuos electrónicos. La información presentada fua estructurada y analizada bajo procedimientos de categorización abierta y axial (Strauss & Corbin, 2002), alcanzando criterios de saturación teórica y validez por triangulación (Hernández-Sampieri, Fernández-Collado, & Baptista-Lucio, 2014).

Acorde a los resultados obtenidos se sugiere la implementación de un moldeo de gestión apalancado de la utilización de tecnologías emergente el cual integre sensores IoT, almacenamiento en la nube y herramientas de algoritmos predictivos (Big Data, IA), las cuales permitan obtener eficiencia en los procesos relacionados con la trazabilidad de rutas, recolección y la respectiva clasificación de los residuos electrónicos. La utilización de un modelo bajo esta perspectiva establecería el punto de partida en la economía circular local en lo relacionado con la gestión operacional de los residuos electrónicos, pero con un potencial significativo para su implementación a nivel regional.

Palabras clave: Teoría Big Data, IoT, Economía Circular, Reciclaje Electrónico, Gestión Sostenible, Innovación Tecnológica, Medellín

ABSTRACT

The main objective of this article is to observe the characteristics and challenges in the use of emerging technologies such as Big Data and the Internet of Things (IoT) in relation to electronic waste recycling systems in three recycling companies in the city of Medellín. This is done using a qualitative multi-case study methodology (Stake, 1995).

The sources of information used are structured into three models: three (3) semi-structured interviews with management personnel, thirty (30) surveys of operational personnel, and direct observation of the three (3) selected companies. This data collection was established in accordance with strict ethical principles, confidentiality clauses, and informed consent.

In the data collection phase, 100% of the estimated sample was achieved. This information demonstrates the total coverage of the qualitative tools, guaranteeing the analytical depth and reliability of the findings.

The results reflect a low implementation of emerging technologies, all within the framework of rudimentary recycling processes, high costs, low training in technological issues, and regulatory and legal gaps in Colombia. However, positive aspects were identified that offer a more encouraging outlook in terms of technological innovation, which could lead to improvements in the operational and administrative efficiency of organizations dedicated to e-waste recycling. The information presented was structured and analyzed using open and axial categorization procedures (Strauss & Corbin, 2002), achieving criteria of theoretical saturation and validity through triangulation (Hernández-Sampieri, Fernández-Collado, & Baptista-Lucio, 2014).

Based on the results obtained, we suggest implementing a management model that leverages emerging technologies, integrating IoT sensors, cloud storage, and predictive algorithm tools (Big Data, AI), which would improve the efficiency of processes related to route traceability, collection, and classification of electronic waste. The use of a model from this perspective would establish the starting point in the local circular economy in relation to the operational management of electronic waste, but with significant potential for implementation at the regional level.

Keywords: Big Data, IoT, Economía Circular, Reciclaje Electrónico, Gestión Sostenible, Innovación Tecnológica, Medellín

RESUMO

O principal objetivo deste artigo é observar as características e os desafios do uso de tecnologias emergentes, como Big Data (IoT), em relação aos sistemas de reciclagem de resíduos eletrônicos em três empresas de reciclagem na cidade de Medellín. Isso é alcançado por meio de uma metodologia qualitativa de estudo multicaso (Stake, 1995). As fontes de dados utilizadas estão estruturadas em três modelos: três (3) entrevistas semiestruturadas com a equipe de gestão, trinta (30) pesquisas com a equipe operacional e observação direta das três (3) empresas selecionadas. Essa coleta foi realizada em conformidade com rigorosos princípios éticos, uma cláusula de confidencialidade e o consentimento informado. Na fase de coleta de dados, 100 % da amostra estimada foi alcançada. Essas informações demonstram a cobertura total das ferramentas qualitativas, garantindo a profundidade analítica e a confiabilidade dos resultados. Os resultados refletem uma implementação limitada de tecnologias emergentes, tudo isso dentro da estrutura rudimentar dos processos de reciclagem, altos custos, treinamento tecnológico limitado e lacunas regulatórias e legais na Colômbia. No entanto, foram identificados aspectos positivos que nos permitem lançar luz sobre uma perspectiva mais promissora em relação à inovação tecnológica que pode gerar melhorias na eficiência operacional e administrativa de organizações dedicadas à reciclagem de resíduos eletrônicos. As informações apresentadas foram estruturadas e analisadas utilizando procedimentos de categorização aberta e axial (Strauss & Corbin, 2002), atendendo aos critérios de saturação teórica e validade por triangulação (Hernández-Sampieri, Fernández-Collado & Baptista-Lucio, 2014). Com base nos resultados obtidos, sugerimos a implementação de um modelo de gestão alavancando o uso de tecnologias emergentes. Este modelo integra sensores de IoT, armazenamento em nuvem e ferramentas de algoritmos preditivos (Big Data, IA), permitindo eficiência nos processos relacionados à rastreabilidade de rotas, coleta e a correspondente classificação de resíduos eletrônicos. A utilização de um modelo sob essa perspectiva estabeleceria o ponto de partida para a economia circular local em termos de gestão operacional de resíduos eletrônicos, mas com potencial significativo para implementação em nível regional. Medellín.

Palavras-chave: Teoria da contingência, variáveis contingentes, custos, setor têxtil

Recibido: 20/9/2025 Aprobado: 1/10/2025

Introducción

Entre las principales problemáticas mundiales términos ambientales y de sustentabilidad, se encuentra la gestión de desechos de difícil disposición y no biodegradables, en ellos, aquellos que más contaminan, al respecto, los residuos electrónicos constituyen un gran reto; además de los efectos contaminantes de dichos residuos, se le suma su rápido incremento en el proceso natural de migración en el uso de la tecnología a nivel mundial y la rápida obsolescencia de cada uno de estos dispositivos. En tal sentido, para la gestión de los residuos electrónicos se deben tener en cuenta tres procesos importantes, en primer lugar, el riesgo de

salud pública, el impacto ambiental y los procesos de gestión, que se deriva de su mala disposición, al respecto Kumar, Kumar y Thakur (2024) describen las sustancias tóxicas y graves consecuencias en la salud que tienen estos dispositivos, sobre todo al ser objeto de una disposición inadecuada en fuentes de agua o suelos. El crecimiento de los residuos electrónicos en Colombia ha sido exponencial en el último tiempo. Acorde a los informes generador por Global E-waste Monitor (Forti *et al.*, 2020), Colombia genero alrededor de 130 mil toneladas de residuos electrónicos en el año 2019, equivalente a 2.6 kilos de residuos por persona. Tan solo el 3 % de este tipo de residuos recibe un tratamiento acorde a sus características, esto refleja las falencias que en materia de infraestructura, normatividad y tecnología enfrentan las empresas colombianas. La escasa investigación científica en Colombia respecto a la utilización de tecnologías emergentes como el internet de las cosas (IoT) y el Big Data es reducida, sin ver el marco de acción y como este tipo de tecnologías pueden convertirse en el vehículo que impulse una gestión más eficiente de los residuos electrónicos en Colombia. La mayoría de los estudios disponibles se centran en aspectos normativos o técnicos de disposición, sin integrar perspectivas de transformación digital o modelos de innovación organizacional en el sector reciclador.

Este vacío en la investigación es un factor que impulsa el generar este tipo de artículos, que pretende alinear el diagnóstico actual de la empresa dedicadas al reciclaje de este tipo de residuos y las fortalezas reales de estas bajo un contexto de desarrollo e implementación de tecnologías emergentes. Para dar una respuesta a ello, en este artículo se busca presentar el estudio de tres empresas recicadoras de la ciudad de Medellín identificando la utilización la utilización o no de sistemas inteligentes de reciclaje que integren Big Data e IoT (Internet de las Cosas) como una alternativa para mejorar la eficiencia en la gestión de los residuos electrónicos, específicamente en los procesos de reciclaje de estos. Para ello se realiza una revisión documental que permita identificar alternativas exitosas en la literatura, analizar aquellas que puedan ser replicadas en el contexto nacional y presentar una reflexión acerca de su validez práctica e impacto, buscando responder la pregunta ¿En qué medida las empresas recicadoras de Medellín han incorporado tecnologías como Big Data e IoT en sus procesos, con miras a configurar un sistema inteligente de reciclaje de residuos electrónicos? Para el desarrollo de esta investigación se adoptó un enfoque metodológico cualitativo con diseño de estudio de caso instrumental y múltiple, según lo propuesto por Stake (1995). Esta metodología resulta adecuada para analizar a profundidad un fenómeno complejo como la incorporación de tecnologías emergentes en procesos de reciclaje electrónico a partir del análisis comparativo de varios casos representativos.

Metodología

Para el desarrollo de esta investigación se adoptó un enfoque metodológico cualitativo con diseño de estudio de caso instrumental y múltiple, según lo propuesto por Stake (1995). Esta metodología resulta adecuada para analizar a profundidad un fenómeno complejo como la incorporación de tecnologías emergentes en procesos de reciclaje electrónico a partir del análisis comparativo de varios casos representativos.

Herramientas e Instrumentos para la Ejecución del Trabajo de Campo

Para asegurar que los datos recolectados durante el trabajo de campo sean confiables y válidos, se diseñaron diferentes herramientas metodológicas que se ajustan a los objetivos específicos del estudio y al enfoque mixto que proponemos. Estas herramientas que incluyen encuestas estructuradas, entrevistas semiestructuradas y plantillas de observación se crearon teniendo en cuenta criterios técnicos como la coherencia interna, la posibilidad de repetir las pruebas y la relevancia del tema. Además, su diseño tomó en cuenta tanto los fundamentos teóricos del estudio como las recomendaciones metodológicas para investigaciones en entornos organizacionales (Sampieri, Collado, & Lucio, 2014).

La aplicación cuidadosa de estas herramientas nos permite obtener información desde diferentes fuentes, lo que facilita verificar y contrastar los datos, fortaleciendo así la calidad del análisis. Este proceso también cumple con los estándares de investigación avanzada utilizados en programas de estudios de posgrado, donde la precisión en la recopilación de datos es crítica para que los resultados sean creíbles y sólidos.

Resultados y Discusión

Con base a los técnicas e instrumentos de recolección utilizados se efectuó el análisis cualitativo de las respuestas generadas por las compañías bajo investigación; ReciVeci Medellín S A S CicloEko S A S y Eco Metales del Sur. En el desarrollo del análisis se logran identificar sistemáticamente los patrones, coincidencias y diferencias de las empresas objeto de estudios. Esto facilitó el proceso de la categorización de percepciones en torno a barreras, beneficios, expectativas y necesidades relacionadas con la adopción de tecnologías inteligentes en el

reciclaje electrónico. La estructuración de la información cualitativa favorece el análisis comparativo, eleva la confiabilidad de los resultados y aporta profundidad interpretativa al estudio, especialmente en investigaciones con enfoque mixto (Hernández-Sampieri, Fernández-Collado & Baptista-Lucio, 2014).

Nivel de Adopción Tecnológicas Emergentes

El 60 % de las empresas señalaron el alto costo inicial como principal barrera para adoptar IoT y Big Data. La falta de formación técnica y la normativa poco clara fueron mencionadas por el 40% respectivamente. Otras barreras como la escasa oferta tecnológica confiable y presupuesto limitado fue otra causal a destacar. Esto evidencia que los frenos no son de orden actitudinal, sino estructural: tecnológicos, financieros y regulatorios, lo que limita la escalabilidad de cualquier iniciativa de modernización en el sector.

Principales Barreras para la Implementación

Uno de los resultados a resaltar es como el 80 % de las organizaciones enfatizan en la importancia de la participación gubernamental en lo referente a las políticas fiscales y el apoyo financiero por parte del estado que impulsen el desarrollo y la implementación de tecnologías emergentes en los procesos relacionados con el reciclaje de residuos electrónicos. Tan solo un 20 % han generado algún tipo de solicitud en pro percibir beneficios por parte de los diferentes entes estatales.

De igual manera se establece una falencia importante en el sector de reciclaje de residuos electrónicos respecto al uso de tecnologías emergentes. El primer aspecto relevante es como las organizaciones objeto de estudios no cuenta con uso de sensores IoT o sistema automatizado que genere eficiencia en el proceso productivo. Los pesajes de los residuos electrónicos se generan por medio de basculas manuales y su correspondiente control se establece de manera manual, exceptuando CicloEko S.A.S., que utiliza herramientas ofimáticas (Excel), para incluir la información.

Respecto al manejo de los datos, tan solo una de las organizaciones (33 %) recurre al registro digital de su operación (básico), evidenciando poco nivel de sistematización y por ende la ausencia de herramientas como el Big Data o analítica predictiva que sirvan de apoyo a la gestión estratégica. Las dos empresas restantes trabajan bajo la manualidad.

Los resultados obtenidos en las tres empresas recicadoras de Medellín evidencian una incorporación mínima de tecnologías emergentes como el Big Data y el IoT en sus procesos operativos. Esta realidad refuerza los planteamientos de Forti *et al.* (2020), quienes advierten que, en países de ingresos bajos y medios, la gestión de residuos electrónicos aún depende de prácticas manuales, sin regulación técnica, lo que genera riesgos ambientales y sanitarios. Las empresas estudiadas aún operan bajo esquemas empíricos, con registros físicos y procesos de clasificación no estandarizados, lo cual limita la eficiencia y la trazabilidad de sus operaciones. Este panorama también coincide con lo señalado por Brown (2019), quien identifica barreras estructurales como la falta de infraestructura tecnológica, la resistencia al cambio organizacional y la escasa capacitación del personal como factores que impiden la adopción de soluciones tecnológicas avanzadas. La investigación confirma que estas barreras están presentes en el contexto colombiano, lo que dificulta la transición hacia un modelo de economía circular basado en datos.

A pesar de estas limitaciones, se identificó una disposición positiva por parte de los actores entrevistados hacia la implementación tecnológica, siempre que existan políticas públicas de apoyo, incentivos y acompañamiento técnico. Esta apertura podría ser la base para una futura transformación digital del sector, tal como lo proponen Ilankoon *et al.* (2018), quienes destacan que la transición hacia una gestión sostenible del WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) requiere articulación entre gobiernos, empresas y academia.

Implicaciones prácticas

El desarrollo de un modelo de gestión inteligente, basado en sensores IoT, almacenamiento en la nube y algoritmos predictivos, podría mejorar significativamente la eficiencia, trazabilidad y sostenibilidad del proceso de reciclaje electrónico. Este tipo de sistemas ya ha demostrado su eficacia en otros contextos, como el caso de Lahore, Pakistán (Saberian *et al.*, 2023), donde la implementación de sensores y analítica en la nube logró mejoras operativas superiores al 30 %.

Limitaciones

Entre las limitaciones del estudio se encuentran el tamaño reducido de la muestra, la falta de acceso a datos financieros de las empresas y el hecho de centrarse exclusivamente en el contexto urbano de Medellín. Además, al ser un estudio cualitativo, los resultados no son generalizables estadísticamente, aunque sí ofrecen un marco profundo para la comprensión del fenómeno.

Líneas futuras de investigación

Es recomendable extender el alcance a otras ciudades del país para validar la replicabilidad del modelo propuesto. Asimismo, sería útil realizar estudios cuantitativos que evalúen el impacto económico y ambiental

de la implementación de tecnologías emergentes en el sector reciclador. Finalmente, explorar mecanismos de gobernanza y políticas públicas que impulsen la transformación digital del reciclaje electrónico será clave para cerrar las brechas identificadas.

Matriz de brechas y oportunidades tecnológicas en recicadoras de Medellín

Podemos visualizar de forma sintética las principales brechas tecnológicas identificadas en las empresas recicadoras objeto de estudio, contrastadas con referentes teóricos recientes y buenas prácticas internacionales. Su análisis evidencia no solo los rezagos estructurales en automatización, infraestructura digital y gestión del conocimiento, sino también las oportunidades concretas de transformación hacia modelos más eficientes, sostenibles y escalables.

Tal como advierten Kumar, Kumar y Thakur (2024), la inadecuada disposición de residuos electrónicos no solo agrava la contaminación ambiental, sino que también compromete la salud pública y la sostenibilidad a largo plazo. Además, Bousdekis, Apostolou y Mentzas (2020) destacan que los sistemas inteligentes aumentan la visibilidad del proceso productivo, fortaleciendo la confianza institucional y permitiendo decisiones basadas en datos.

Apoyados en lo evidenciado en las empresas objeto de estudio se establece la necesidad de avanzar a un sistema de gestión eficiente apoyado en tecnologías emergentes que permita operaciones eficientes de los residuos electrónicos, proyectando las organizaciones la visión de la innovación sustentable que vaya acorde a las exigencias de una economía circular mundial.

Conclusiones

La investigación evidencia cómo las empresas de reciclaje de residuos tecnológicos observadas, carecen de modelos o sistema de gestión que estén soportado bajo el uso de las tecnologías emergentes como IoT y Big Data, realizando sus operaciones bajo modelos manuales y empíricos, aumentando el nivel de riesgo economía, ambiental y social. De igual manera, perjudica directamente la eficiencia operativa y la toma de decisiones estratégicas.

La falta de algún tipo de automatización y herramientas de apoyo al análisis predictivo establece una falta de interés y pone de manifiesto las vulnerabilidades estructurales de las empresas objeto de estudio, entre estas podemos mencionar: los costos de implementación, la falta de competencias de los empleados, un marco legal y normativo insípiente, lo que coincide con lo reportado por Forti et al. (2020) y Kumar et al. (2024). No obstante, esta problemática, existe una disposición a la implementación de las tecnologías emergentes, siempre y cuando exista un acompañamiento constante del estado y un marco legal y normativo claro que apalanque el desarrollo sustentable de las organizaciones,

Un modelo de gestión basado en inteligencia emergentes ofrece una oportunidad de innovación y desarrollo permitiendo un avance en la gestión eficiente de las operación y administración de las empresas dedicadas al reciclaje de residuos electrónicos. No solo mejorando la productividad, sino también estableciendo estándares más altos de calidad y competitividad en el sector, todo esto orientado a un crecimiento sostenible

Referencias bibliográficas

- Andrago, S., & Arroyo, M. (2021). Economía circular y sostenibilidad empresarial bajo un enfoque 4.0. Revista de Estudios de Gestión Industrial.
- Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., & Stegmann, P. (2017). The Global E-waste Monitor 2017: Quantities, Flows, and Resources. United Nations University, IAS SCYCLE.
- Bousdekis, A., Apostolou, D., & Mentzas, G. (2020). A big data analytics architecture for asset management in process industries. Computers in Industry, 123, 103316.
- Bustamante López, F. (2021). Reciclaje y gestión de residuos electrónicos en el marco de Huawei's global recycling program. Revista de Innovación Tecnológica.
- Damasceno, A., Braga, C., Carvalho, F., & Cohen, J. (2021). Implementación y regulación de sistemas de reciclaje de residuos electrónicos. Gestión Ambiental.
- García, A., & Iglesias, E. (2018). Tecnologías emergentes y gestión eficiente de residuos. Revista de Gestión Ambiental y Sostenibilidad.
- Grandi, A. (2010). Impacto ambiental de los residuos electrónicos y potencial económico de su recuperación. Revista de Economía y Medio Ambiente.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación (6.ª ed.). McGraw-Hill.

- Islam, S. R., Kwak, D., Kabir, M. H., Hossain, M., & Kwak, K. S. (2021). The internet of things for health care: A comprehensive survey. *IEEE Access*, 7, 67880–67900.
- Kumar, S., Kumar, N., & Thakur, A. S. (2024). Toxicidad y riesgos para la salud de los residuos electrónicos. *Journal of Environmental Health Studies*.
- Kumar, S., Kumar, R., & Thakur, D. (2024). Artificial Intelligence-Based E-Waste Management Framework: Challenges and Future Directions. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 38, 100905.
- Muñoz, P., & Morales, F. (2023). Capacidad y desafíos del manejo de residuos electrónicos. *Revista Latinoamericana de Reciclaje Electrónico*.
- Premalatha, M., Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2014). Impactos de las prácticas tradicionales de reciclaje y estrategias de mejora. *Environmental Science & Technology*.
- Rodríguez, J., Campo-Valera, M., & Calderón, E. (2023). Ciudades inteligentes y gestión de residuos: El papel del Big Data e IoT. *Revista de Tecnología Urbana*.
- Saberian, M., Dargahi, M., & Hamzeh, A. (2023). IoT-enabled smart waste management: Architecture and implementation challenges. *Waste Management*, 164, 234–245.
- Silva, Y., & Cyranek, G. (2010). Brecha digital y gestión de residuos electrónicos en América Latina. *Revista de Política Digital*.
- Stake, R. E. (1995). *The art of case study research*. SAGE Publications.
- Strauss, A., & Corbin, J. (2002). *Bases de la investigación cualitativa: Técnicas y procedimientos para desarrollar la teoría fundamentada* (2.ª ed.). Universidad de Antioquia.
- Yan, J., & Chen, Z. (2018). Optimización de reciclaje electrónico mediante Big Data e IoT. *Journal of Cleaner Production*.
- Zambrano-Yépez, F., Macías Rueda, A., & Medina Sánchez, J. (2021). Gestión integral de residuos electrónicos: un enfoque colaborativo. *Revista de Gestión Pública y Privada*.

Declaración de conflictos de interés: El autor declara que no existen conflictos de intereses.

Declaración de contribución de autoría utilizando la Taxonomía CRediT:

El autor realizó todo el trabajo de investigación, redacción y revisión del artículo.

Declaración de originalidad del manuscrito: El autor confirma que este texto no ha sido publicado con anterioridad, ni ha sido enviado a otra revista para su publicación.

Declaración de aprobación por el Comité de Ética: El autor declara que la investigación fue aprobada por el Comité de Ética de la institución responsable, en tanto la misma implicó a seres humanos

Declaración de originalidad del manuscrito: El autor manifiesta que este texto no ha sido publicado con anterioridad, ni ha sido enviado a otra revista para su publicación.