

<https://doi.org/10.69639/arandu.v11i2.462>

Impacto de la Logística Inversa en la Sostenibilidad Ambiental: Una Propuesta de Marco sobre la Gestión de Residuos de Aparatos Electrónicos y Eléctricos

*Impact of Reverse Logistics on Environmental Sustainability: A Proposed Framework for the
Management of Waste Electrical and Electronic Equipment*

Juan Carlos Muyulema Allaica

jmuyulema@upse.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-9663-8935>

Universidad Estatal Península de Santa Elena
La Libertad, Ecuador

Isabel Del Rocío Balón Ramos

ibalon@upse.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-7237-4912>

Universidad Estatal Península de Santa Elena
La Libertad, Ecuador

Ivette Estefanía Rodríguez Cortez

ivette.rodriguezcortez1242@upse.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0007-2820-4282>

Universidad Estatal Península de Santa Elena
La Libertad, Ecuador

Francisco Xavier Aguirre Flores

faguirre9919@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0004-7350-5744>

Grupo Consultor Empresarial CAAPTES-Ecuador
Ambato, Ecuador

*Artículo recibido: 11 noviembre 2024 - Aceptado para publicación: 26 diciembre 2024
Conflictos de intereses: Ninguno que declarar*

RESUMEN

La logística inversa se ha convertido en uno de los procesos fundamentales y que sobresale abordando el estudio para mejoramiento del medio ambiente. El objetivo de esta investigación se centró proponer un marco conceptual para evaluar el impacto de la logística inversa en la sostenibilidad ambiental, enfocado en la gestión de residuos de aparatos electrónicos y eléctricos (RAEE). A través de una revisión sistemática de literatura (RSL) y un análisis bibliométrico, se identifican las principales tendencias, herramientas y técnicas asociadas con la implementación de modelos de logística inversa en el reciclaje y reutilización de RAEE. La revisión se realizó utilizando bases de datos académicas como Scopus y Dimensions, con filtros de palabras clave tales como “Modelo de logística inversa”, “Sustentabilidad ambiental”, “Residuos de aparatos electrónicos y eléctricos” y “Reciclaje”. Se establecieron criterios estrictos de inclusión y exclusión, resultando en la selección de 43 artículos relevantes para el análisis. Los resultados indican que la logística inversa desempeña un papel


fundamental en la reducción del impacto ambiental de los RAEE, ofreciendo soluciones para mejorar la eficiencia en los procesos de reciclaje y promoviendo la sostenibilidad ambiental. El artículo concluye con la identificación de brechas de investigación que requieren atención futura, así como con la presentación de herramientas y estrategias para la implementación efectiva de modelos de logística inversa en el manejo de residuos electrónicos.

Palabras clave: logística inversa, sustentabilidad ambiental, revisión de literatura, análisis bibliométrico, residuos de aparatos electrónicos

ABSTRACT

Reverse logistics has emerged as a fundamental process that stands out in addressing environmental improvement. The objective of this research was to propose a conceptual framework to evaluate the impact of reverse logistics on environmental sustainability, with a focus on the management of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Through a Systematic Literature Review (SLR) and bibliometric analysis, the study identifies key trends, tools, and techniques associated with implementing reverse logistics models for the recycling and reuse of WEEE. The review was conducted using academic databases such as Scopus and Dimensions, applying keyword filters like "Reverse logistics model," "Environmental sustainability," "Waste electrical and electronic equipment," and "Recycling." Strict inclusion and exclusion criteria were established, resulting in the selection of 43 relevant articles for analysis. The findings indicate that reverse logistics plays a critical role in reducing the environmental impact of WEEE, offering solutions to enhance recycling efficiency and promote environmental sustainability. The article concludes by identifying research gaps that require further attention and presenting tools and strategies for the effective implementation of reverse logistics models in electronic waste management.

Keywords: reverse logistics, environmental sustainability, literature review, bibliometric analysis, waste electrical and electronic equipment

Todo el contenido de la Revista Científica Internacional Arandu UTIC publicado en este sitio está disponible bajo licencia Creative Commons Attribution 4.0 International. 

INTRODUCCIÓN

La industria tecnológica está en gran aumento e innovación en todo el mundo, cada año se adquieren toneladas de artículos electrónicos que, al final de su ciclo de vida, se convierten en un claro ejemplar de los residuos constituidos por diversos metales pesados, ácidos, compuestos químicos tóxicos y plásticos no degradables (Sar & Ghadimi et al., 2023). Muchos de estos residuos se desechan, queman o se exportan en empresas de reciclaje, sin embargo, un 75% tienden a ser inciertos para utilizarlos en renovación, re-fabricación o reutilización de sus diferentes partes, la mayoría de los recicladores exportan estos materiales tóxicos (plomo, placas de circuitos, vidrio, mercurio) (Guggeri et al., 2023).

La Organización Mundial de la Salud - OMS (2023), muestra cada año millones de equipos electrónicos y eléctricos son desechados porque cumplen su ciclo de vida es decir obsoletos o sufren algún daño, estos se convierten en una amenaza para el medio ambiente y la salud de la humanidad si no se los tratan o reciclan de la forma correcta, entre los desechos más habituales son los computadores, móviles e incluso diferentes tipos de electrodomésticos y en algunas ocasiones equipos médicos. Para implementar el proceso de logística inversa en el proceso de producción, las empresas necesitan saber qué partes de sus productos tienen problemas o averías cuando son utilizadas, reparación o reciclaje de las piezas del producto devuelto (Ahmadi et al., 2024).

La gestión de residuos electrónicos está lejos de alcanzar niveles óptimos según uno de los últimos análisis de la Organización de Naciones Unidas (ONU), también se destaca que solamente un 3% de desechos electrónicos se recogen a través de conductos formales y se los tratan de una manera que respete al medio ambiente sin embargo se destaca que pese a eso el 97% restante se gestiona de forma inadecuada, este informe concluye que entre 2010 y 2019 estos desechos han incrementado un 49% en Iberoamérica (ONU, 2022). Entre las sustancias peligrosas que se encuentra en los desechos electrónicos tenemos 2200 kilos de mercurio, 600 de cadmio, 4.4 millones de plomo, 4 millones de retardantes de llama de bromados y 5.6 megatoneladas de gases de efecto invernadero que pertenecen a refrigerantes, al estar fabricados con alta tecnología estos residuos pueden ser muy tóxicos ya que pueden contaminar el suelo, el agua, los alimentos y por ende lo que repercute al medio ambiente pasa a la salud humana (Govindan et al., 2016).

La sostenibilidad junto con la logística hace referencia a una implementación de procesos sostenibles en varias etapas de la cadena de suministro (Yu & Sun et al., 2024). En este sentido bajo la importancia de las técnicas del estudio, esta investigación tiene como objetivo proponer un marco conceptual para evaluar el impacto de la logística inversa en la sostenibilidad ambiental, enfocado en la gestión de residuos de aparatos electrónicos y eléctricos (RAEE) usando la metodología Mapeo sistemático y un análisis bibliométrico. Derse et al., (2024) nos dice que en este caso la reutilización, reciclaje o tratamiento óptimo de aquellos residuos, se incluye estudiar y evaluar el impacto ambiental total de las operaciones que se puedan aplicar en estos desechos electrónicos. Ahmadi et al., (2024)

manifiesta que las empresas manufactureras de la industria electrónica han adoptado una política de desarrollo sostenible a través de la logística, la logística inversa es la forma sistemática de redirigir las mercancías desde su punto de entrega original para obtener valor o disponer de ellas adecuadamente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la siguiente investigación se elaboró una revisión sistemática de literatura hacia la logística inversa para la sustentabilidad ambiental para el tratamiento de RAEE, a través del método de mapeo sistemático y un análisis bibliométrico. Se establecieron 3 etapas fundamentales.

Etapla 1 planificación: Se define objetivos y preguntas de investigación (Tabla 1), estos se relacionan entre sí, para posteriormente realizar la selección de búsqueda de forma estratégica en las bases de datos destacadas, finalmente se definen criterios de exclusión e inclusión (Tabla 2) para los artículos científicos de acuerdo al idioma, fecha y relevancia del artículo.

Tabla 1

Objetivos y preguntas de investigación

OBJETIVOS PROPUESTOS	Determinar el grado de interés expuesto por los diferentes científicos en años recientes que se relacionen a las variables de estudio mediante clasificación.	OB1
	Recoger la información de las definiciones conceptuales, propuestas, procesos, enfoques y validaciones de expertos.	OB2
PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	¿Cómo se distribuyen los artículos relacionados a la logística inversa para la sustentabilidad ambiental sobre aparatos electrónicos y eléctricos?	P1
	¿Qué propuestas de soluciones han presentado?	P2
	¿Cuál fue el método para la recopilación de datos?	P3

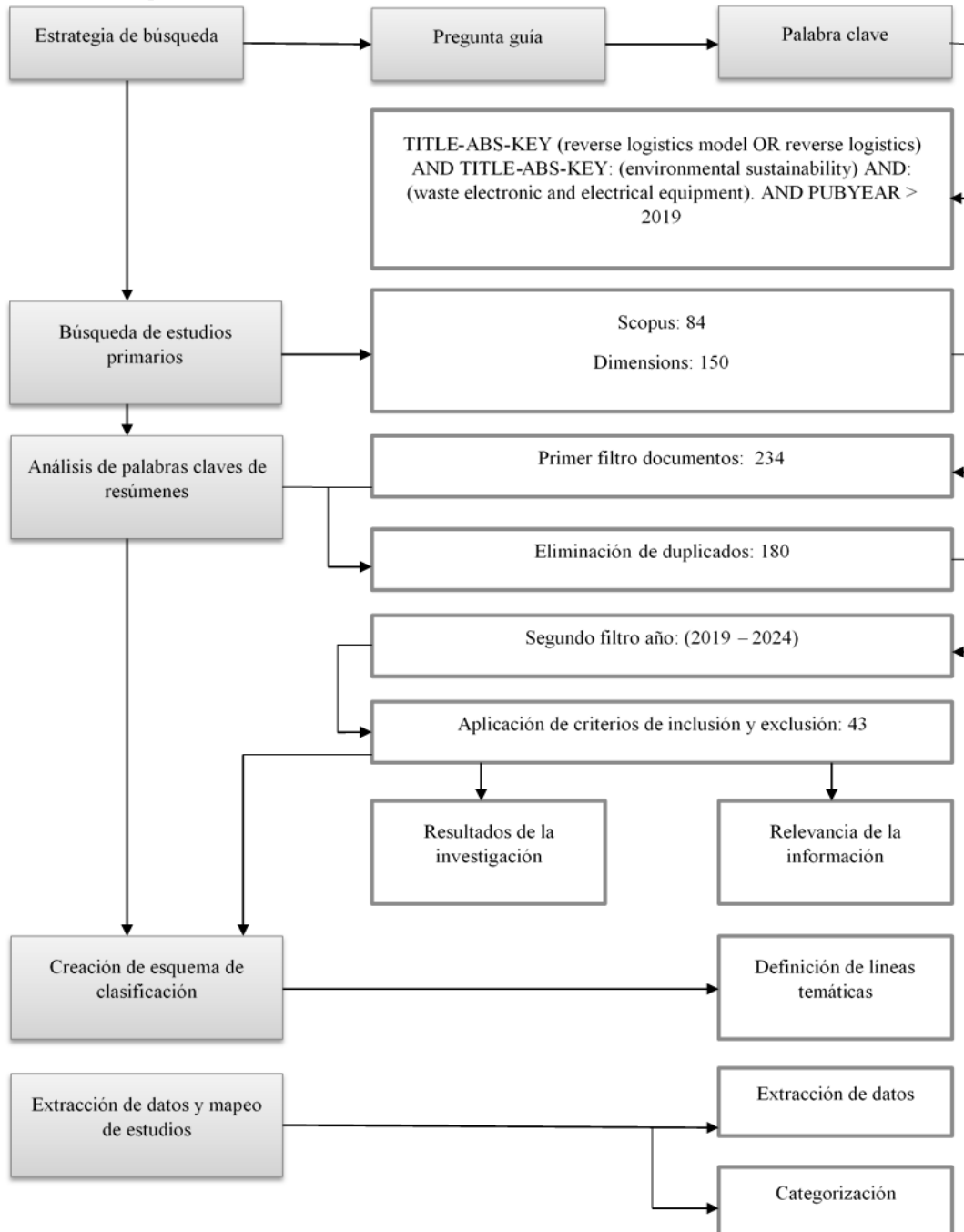
Tabla 2

Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Se consideran artículos con fecha de publicación del 1 de enero 2019 a 31 de julio 2024.	Se descartan artículos con fecha de publicación antes del 1 de enero 2019 y después del 31 de julio 2024.
Se consideran artículos en inglés y español.	Se descartan artículos que no sean en inglés y español.
Se consideran artículos con acceso abierto.	Se descartan artículos que sean con acceso abierto.
Se consideran artículos con títulos y resúmenes que estén direccionados a la logística inversa y sustentabilidad ambiental.	Se descartan artículos que no cuenten con títulos y resúmenes que estén direccionados a la logística inversa y sustentabilidad ambiental.

Etapa 2 implementación: Se llevó a cabo una búsqueda de estudios primarios, abarcando bases de datos y recursos académicos relevantes. Se elaboró un análisis detallado de palabras claves presentes en el resumen de artículos seleccionados, lo que permite identificar patrones y tendencias significativas. Con base a esta información se elabora un esquema de clasificación que facilita la organización y categorización de estudios relevantes y el mapeo de la información recopilada, lo que dio una visión de manera panorámica y estructurada del campo de estudio (Figura 1).

Figura 1
Método de mapeo sistemático



La estrategia para la búsqueda se basó en preguntas guía y palabras claves planteadas en la

primera etapa que fue la planificación aquí se designó dos bases de datos a utilizar como fue Scopus y Dimensions. Para una mejor comprensión del método, se divide en 4 fases importantes como la búsqueda de estudios primarios, análisis de palabras claves de resúmenes, creación de esquemas de clasificación y para finalizar extracción de datos y mapeo de estudios.

Búsqueda de estudios primarios: Se realizó una búsqueda en relación con los términos de modelo de logística inversa, logística inversa, sustentabilidad ambiental, residuos de aparatos electrónicos y eléctricos. Los términos de búsqueda se asignaron en los campos de título, resumen y palabra clave en las bases de datos relevantes, y se aplicaron todos los criterios de inclusión y exclusión. Después se hizo la exportación de los metadatos de ambas bases de datos a un archivo CSV para su análisis posterior en Microsoft Excel.

Análisis de palabras claves de resúmenes: Este procedimiento se basó en tres etapas: a) revisar los resúmenes para confirmar la relevancia de los artículos respecto al tema de logística inversa, logística inversa para la sustentabilidad ambiental, b) identificar palabras claves y conceptos que muestren contribución al tema, así como un enfoque de investigación que comprende este estudio; y c) identificar palabras claves que resalten los principales resultados de las investigaciones.

Creación del esquema de clasificación: Se definieron categorías para las preguntas de investigación con la única finalidad de ordenar estudios que cumplen con los criterios de exclusión e inclusión.

Extracción de datos y mapeo de estudios: Cada artículo es etiquetado con un código específico para la documentación del proceso. Para la facilidad de este proceso, se encuentran artículos y los metadatos necesarios para abordar las preguntas de investigaciones, se empleó una matriz referencial (Tabla 4).

Tabla 3*Líneas de investigación propuestas*

Código	Autores	Base	Variable de estudio	Hallazgos claves
A1	(Liu et al., 2024)	Scopus	Diseño de redes de gestión de desechos electrónicos.	Desarrollo de red de gestión de residuos electrónicos que integren canales formales para la optimización.
A2	(Cardoso et al., 2023)	Scopus	Economía circular a partir de la logística inversa de residuos.	Estudio para la investigación de residuos electrónicos y eléctricos, cierre de ciclos a través del reciclaje.
A3	(Farida et al., 2024)	Scopus	Gestión de residuos electrónicos: análisis de conflictos y responsabilidad.	Modelo gráfico para la resolución de conflictos (GMCR), disimulación de los análisis y solución de conflictos.
A4	(Palanisamy & Subburaj et al., 2023)	Scopus	Análisis del ciclo de vida de tecnologías emergentes para la recuperación de valores.	Comparación de tecnologías novedosas, incluida la reutilización directa y recuperación de RAEE.
A5	(Luo et al., 2023)	Scopus	Uso de materias primas secundarias para la industria del cobre.	Desarrollo de una economía circular, examinar la posibilidad de un mayor uso de residuos para reutilización.
A6	(Santos & Ogunseitan et al., 2022)	Scopus	Gestión de residuos electrónicos, desafíos y oportunidades de un modelo de logística inversa.	La aplicación del nuevo reglamento requiere la integración de diferentes partes de interés para superar dificultades.
A7	(Guarnieri et al., 2022)	Scopus	Comparación entre líneas blanca, verde, marrón y azul, para el análisis de residuos electrónicos	Análisis de diferencias en hábitos de consumo de las cuatro líneas de electricidad y electrónica, alteraciones en hábitos.
A8	(Chen et al., 2024)	Scopus	Simulación de dinámica de sistemas enfocado en optimización de diseño de políticas sustentables en gestión de RAEE.	Enfoque de simulación basado en la optimización OBS que establezca el diseño de políticas sustentables en gestión de RAEE.
A9	(Marinello & Gamberini et al., 2021)	Scopus	Modelo multicriterio para el apoyo de gestión de sistemas en recolección de residuos eléctricos.	Revisión sistemática de literatura y análisis bibliométrico, para la observación de una tendencia creciente con respecto a residuos.

A10	(Aidonis et al., 2019)	Scopus	Sistema inteligente de RAEE que intervenga la cadena de suministro y mapas interactivos en línea.	Gestión eficiente de residuos eléctricos como estrategia vital para el ahorro de materiales.
A11	(Qadir et al., 2023)	Scopus	Modelo matemático para localizar los puntos de recolección de RAEE.	Definir la ubicación para la instalación de puntos estratégicos de recogida de RAEE a través de un análisis matemático.
A12	(Tosarkani et al., 2020)	Scopus	Evaluación de logística inversa de RAEE a partir de un modelo de multicriterio.	La aplicación de la logística inversa está consolidada en diversos países ya que aumentan los RAEE.
A13	(Alfaro-Algaba & Ramirez et al., 2020)	Scopus	Servicios de recolección, análisis conjunto basándose en la elección.	Aplicación de la economía circular de los aparatos eléctricos y electrónicos para la reutilización de materiales.
A14	(Rahayu et al., 2019)	Scopus	Marco legal y tecnología al servicio de la logística inversa.	Aumento de la población de RAEE, un amplio tema en constante crecimiento, prevenir los riesgos del medio ambiente.
A15	(Poonia et al., 2024)	Scopus	Sistema de logística inversa con una modalidad de multicompetitiva con una teoría de juegos.	Con un sistema de logística inversa de fabricantes y recicladores para un modo de devolución que sea competitivo.
A16	(Wu et al., 2021)	Scopus	Marco de economía circular, cadena de suministro inversa de procesos de gestión de residuos.	Gestión de la cadena de suministro de RAEE ha generado una mayor atención del desarrollo de conciencia ambiental.
A17	(Luqman & Shahzadi et al., 2023)	Scopus	Análisis econométrico para los hogares que separan sus residuos eléctricos.	Mejoramiento de la tasa de recolección selectiva de RAEE es muy importante para el alcance de metas medioambientales.
A18	(Lase et al., 2021)	Scopus	Valoración de gestión sustentables de RAEE usando el método de criterio base y solución basada en números difusos Z.	Diversos factores contribuyen al aumento de la producción y diversidad de desechos, esto es en base a la población.

A19	(Moslehi et al., 2021)	Scopus	Modelo sustentable para el rediseño y enrutamiento de multiviaje en redes de recolección para residuos sólidos.	Transporte para recolección de desechos por aspectos ambientales, financieros y sociales, sistemas de gestión.
A20	(Xiaoping & Meiyan et al., 2023)	Dimensions	Enfoque sistemático que comprenda los desafíos que logre la economía circular.	La economía circular se plantea en todo el mundo, la importancia de lograr los beneficios asociados a ella.
A21	(Liu et al., 2021)	Dimensions	La sostenibilidad a través de una investigación sobre potencial económico de residuos sólidos.	Agotamiento de recursos naturales, fin de su vida útil en vertederos y acumulación de basura, desafían la gestión de los RAEE
A22	(Sengupta et al., 2023)	Dimensions	Economía circular, concepto general y áreas relacionadas.	Servicios de economía circular ayudan a la comprensión de flujos que aporten al medio ambiente y su incidencia.
A23	(Le, 2023)	Dimensions	Gestión sustentable de residuos para fabricación de pisos en la Ciudad.	Estudio de gestión integrada y sustentable de residuos dentro de clúster para la fabricación de pisos.
A24	(Mu et al., 2023)	Dimensions	Productos básicos basados en los RAEE, para los países de Suecia y Brasil.	La convención de residuos en energía, esto describe a una alternativa a vertederos hace desaparecer los residuos.
A25	(Tang & Thelkar et al., 2023)	Dimensions	Modelado de logística actual, caso de estudio.	Nuevo sistema de distribución de mercaderías en el casco histórico, usando metodología de logística inversa.
A26	(Zhou et al., 2021)	Dimensions	Modelo de optimización de un diseño de red de logística sustentable.	A través de programación de objetivos se busca optimizar la inversión de una infraestructura de logística.
A27	(Araújo et al., 2020)	Dimensions	Recolección de residuos electrónicos basado en blockchain.	Estudio de investigación para solución de problemas en gestión de residuos eléctricos en un sentido básico.
A28	(Peña-Montoya et al., 2020)	Dimensions	Análisis exhaustivo para una evaluación híbrida de sostenibilidad para la cadena de suministro.	Mitigar el riesgo mediante establecimientos de redes sólidas en la cadena de suministro, desde una perspectiva empresarial.

A29	(Maheswari et al., 2020)	Dimensions	Economía circular: Revisión de literatura desde una perspectiva sostenible en el sector urbano.	Reducción de emisiones de transportes y eliminación de fósiles de los vehículos, una pieza fundamental para el medio ambiente.
A30	(Mishra et al., 2022)	Dimensions	Evaluación multicriterio desde objetivos sostenibles.	El uso de redes verdes es una estrategia opcional pero excepcional e inevitable que satisface las necesidades de una población
A31	(Brandão et al., 2021)	Dimensions	Gestión de residuos de demolición en las redes de construcción de Pakistán.	Un manejo adecuado es esencial para la gestión sostenible en los residuos de construcción para beneficio ambiental.
A32	(Xin et al., 2022)	Dimensions	Revisión sistemática exhaustiva sobre el desarrollo sostenible.	El desarrollo del medio ambiente sustentable es primordial a través de aspectos demuestran las técnicas utilizadas.
A33	(Campos et al., 2020)	Dimensions	Revisión sistemática de literatura hacia un desarrollo sostenible.	Identificar la sociedad que existe en los conceptos de sostenibilidad y excelencia de operación, desarrollo del estado del arte.
A34	(Mishra & Singh et al., 2022)	Dimensions	Transformación de medios digitales para la sostenibilidad del medio ambiente.	Transformar estos aparatos en las organizaciones es fundamental para desarrollo sustentable al medio ambiente.
A35	(Diniz - Chaves et al., 2021)	Dimensions	Oportunidades de aplicación del método de compostaje para municipios de Brasil.	La gestión de residuos sólidos del sector urbano, se considera un reto a nivel global, esta práctica es primordial.
A36	(Campos et al., 2023)	Dimensions	Impacto de tecnologías de la industria 4.0 es un punto clave para la cadena de suministro 4.0.	Las tecnologías de la industria 4.0 depende de una práctica sostenible para una mejor gestión de la cadena de suministro 4.0, un aporte al medio ambiente.
A37	(Valenzuela et al., 2021)	Dimensions	Revisión sistemática de literatura para la aplicación sostenible a través de métodos de operación.	Resumir los métodos inteligentes en el sector público correspondiente a edificios y su aplicación de prácticas sustentables.
A38	(Ren et al., 2024)	Dimensions	Análisis para convertir aldeas urbanas sustentables con relación al medio ambiente.	La sostenibilidad en las zonas urbanas se considera deficientes por ello se analiza la forma o método de lograr este objetivo.

A39	(Xiao et al., 2024)	Dimensions	Estudio de caso: Impacto de los vehículos en el medio ambiente.	Las aglomeraciones de vehículos obsoletos aumentan, se busca una solución que contrarreste el problema ambiental.
A40	(Li et al., 2024)	Dimensions	Planificación sobre los vehículos de manera eficiente en el sector urbano.	La contaminación del medio ambiente aumenta, la búsqueda exhaustiva de un método para el desarrollo de prácticas sostenibles es fundamental.
A41	(Sun et al., 2022)	Dimensions	Priorización de nuevas tecnologías utilizadas en los vehículos modernos y su apreciación en un enfoque sostenible.	La crisis medioambiental y económica se considera creciente, sin embargo, se plantean alternativas que contrarresten.
A42	(Ahmed & Zhang et al., 2021)	Dimensions	Revisión sistemática: Investigación en base a enfoques BIM, IoT y gestión para la renovación de edificios	Importancia de proporcionar un análisis profesional sobre la aplicación de estos enfoques.
A43	(Rau et al., 2021)	Dimensions	Transformación digital sostenible para el desarrollo del medio ambiente.	La aplicación de un método sostenible que aporte al medio ambiente con respecto a residuos digitales es importante.

Etapa 3 resultados: Se empleó un formulario estándar para exponer los resultados, el cual parte de una introducción que aborda los antecedentes del tema, la necesidad y utilidad de un mapeo sistemático, así como documentos relacionados; el método de investigación; los resultados organizados según las preguntas de investigación y su discusión; conclusiones.

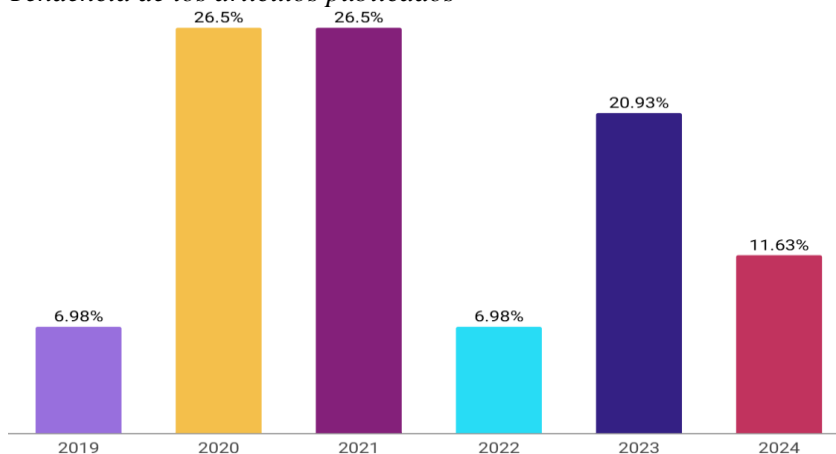
RESULTADOS

P1. ¿Cómo se distribuyen los artículos relacionados a la logística inversa para la sustentabilidad ambiental sobre aparatos electrónicos y eléctricos?

Según los datos presentados en la figura 2, se observa una clara tendencia en la elaboración científica a lo largo de los años en base a las variables de estudio. El análisis revela que en el 2019 se obtiene un número total de 3 artículos publicados (A15, A16, A32). En el año 2020 se obtienen 12 artículos publicado (A4, A12, A13, A14, A20, A21, A24, A25, A30, A33, A38, A40). En el año 2021 se registró un mayor número de artículos publicados con un total de 12 contribuciones significativas (A8, A9, A10, A11, A17, A23, A26, A29, A34, A39, A41, A42). En contraste, durante el año siguiente 2022 se tiene 3 artículos publicado (A6, A7, A19). En el año 2023 se obtiene 8 artículos (A3, A5, A18, A22, A27, A36, A37, A43). Finalmente, en el año 2024 se obtuvo 5 artículos publicados (A1, A2, A28, A31, A35). Este análisis resalta las variaciones en la producción científica en el lapso de este tiempo y existe cambios y enfoques en la comunidad investigadora.

Figura 2

Tendencia de los artículos publicados



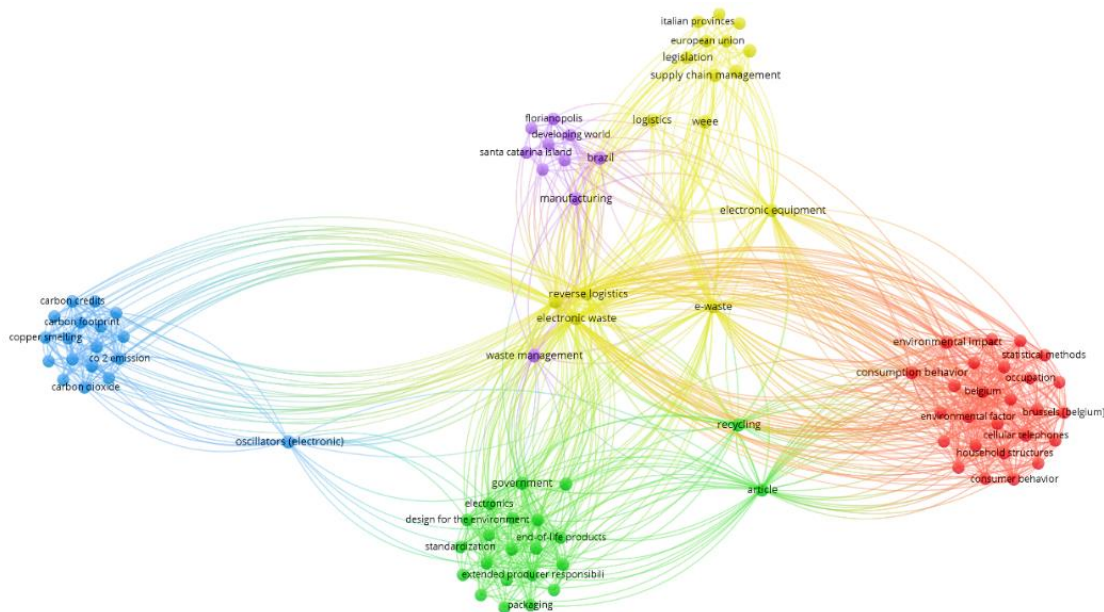
Análisis bibliométrico de revistas científicas

A través del software VOSviewer se elaboró un mapeo de datos de la red como se muestra en la figura 3, el cual se generaron 5 clúster relacionados a revistas científicas relacionadas a nuestras variables de estudio, lo que generó clusters con una interacción de relación entre sí, lo que se distinguen por colores diferentes.

En el primer cluster representado por el color rojo dando a conocer sobre el medio ambiente un amplio índice o mayor nivel de fuerza con respecto al resto de la red. Para el segundo cluster se representa con el color verde siendo los residuos electrónicos con mayor fuerza de correlación

con respecto al resto de las revistas mostradas en la red, por otro lado, este cluster implica mucho las investigaciones de los osciladores, recuperadores, recicladores y la cadena de suministro. El tercer cluster que tiene su color azul nos muestra que la mayor fuerza de relación en este caso de red correlacional corresponde al dióxido de carbono CO₂. En el cuarto cluster que tiene de rasgo distintivo el color amarillo representa que la logística tiene el mismo índice con respecto a la red de revistas. El quinto cluster tiene como distintivo el color lila el cual nos permite observar que entre las palabras claves sobresale los residuos de equipos electrónicos en la red de correlación. (Figura 3).

Figura 3
Red correlacional de revistas en base a las variables



La creación de la red sobre la clasificación de revistas que nos permiten conocer la información científica de la logística inversa para la sustentabilidad ambiental tendría como finalidad mostrarnos un esquema o estructura jerárquica sobre el panorama académico en este campo de estudio. Por lo tanto, se desea demostrar a través de esta red los diferentes temas de prioridad por una categorización de las revistas de acuerdo a sus contenidos ya que nos mostrara las interconexiones sobre el tema abordado, esta herramienta se considera una guía de gran importancia para lo conlleva la investigación porque facilita la exploración sobre la literatura científica en este contexto, no solo nos brinda la opción de evaluar sino también analizar las diferentes áreas de estudios, autores, líneas de investigación el consumo de publicaciones científicas, entre otras cosas de suma importancia.

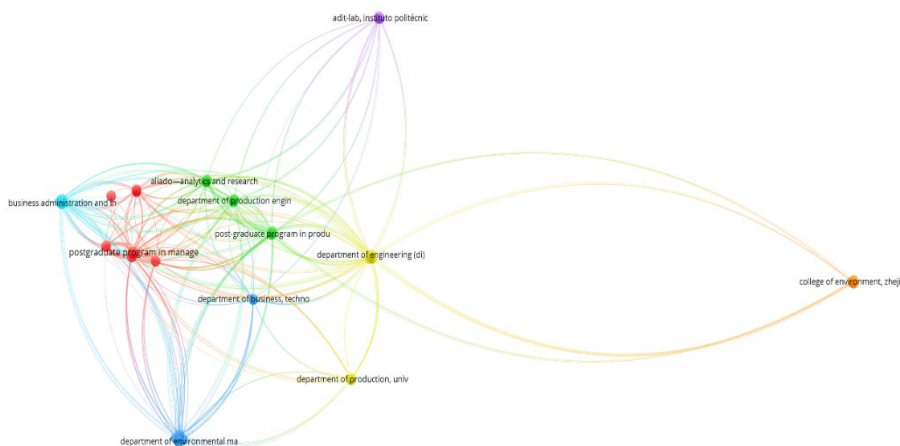
Red bibliométrica de universidades

En la figura 4 se expone la red bibliométrica de acuerdo a universidades cuya investigación científica se ha basado en el campo de estudio sobre la logística inversa y la sustentabilidad ambiental, esta red cuyo estudio está en una base de datos se rige mediante 7 clusters. El primer cluster con el color rojo representa una red de correlación en la que podemos observar 5

universidades con una gran interconexión. En el segundo cluster cuya representación nos arroja un color verde nos muestra índice de 3 universidades con relación al tema de estudio. En el tercer cluster con color azul nos permite visualizar 2 universidades en relación con respecto al caso de estudio. En el cuarto cluster presentado con color amarillo podemos observar 2 universidades. En el quinto cluster de color morado solo obtenemos 1 instituto politécnico. En el sexto cluster de color celeste tenemos una universidad. Por último, en el séptimo cluster de color naranja tenemos una universidad de medio ambiente. (Figura 4).

Figura 4

Red de correlación de universidades con información científica



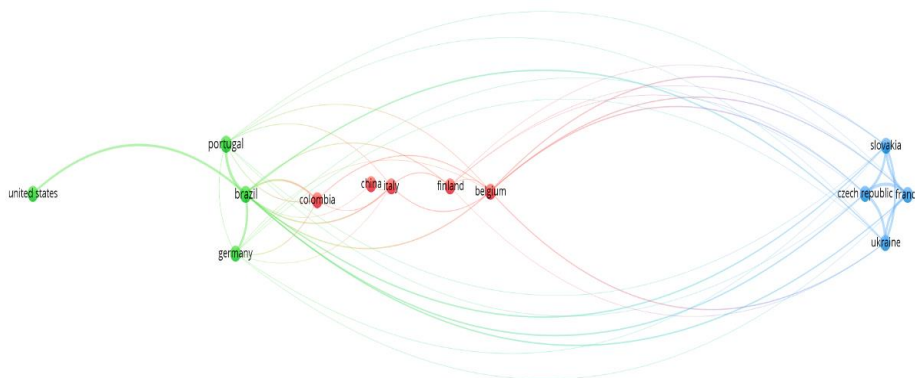
La creación de la red de clasificación de universidades sobre la logística inversa para la sustentabilidad ambiental tiene la finalidad de hacer una visualización de la interconexiones y enlaces académicos en diversas instituciones, resaltando los centros de investigaciones y aquellos grupos que contribuyen al desarrollo sustentable. El objetivo de este estudio es evidenciar el intercambio de conocimientos y la colaboración del mismo, a través una observación sobre la influencia que cada universidad tiene a partir de sus aportes científicos, esta interconexión no solo clasifica o propone líderes académicos, sino que plantea una colaboración que impulse la logística inversa en conjunto de la sustentabilidad ambiental.

Red bibliométrica de países

En la figura 5 presentaremos la red bibliométrica que corresponde a los diferentes países cuya investigación científica tiene como principal estudio la logística inversa para la sustentabilidad ambiental, en esta red de interconexión el campo a estudiar se plantea 3 clústeres. En el primer clúster con color rojo para identificarlo nos presenta red de interconexión de 5 países de acuerdo al tema a estudio. En el segundo clúster con el pertinente color verde nos da como resultado 4 países con revistas científicas de acuerdo a este estudio sobre la logística inversa. El tercer y último clúster con color azul nos da un total de 4 países con estudios científicos de acuerdo a las revistas.

Figura 5

Red de correlación de países con información científica



La creación de la red de correlación entre países sobre la logística inversa para la sustentabilidad ambiental tiene la finalidad de hacer una visualización de la interconexiones y enlaces académicos en diversos lugares, resaltando los centros de investigaciones y aquellos grupos que contribuyen al desarrollo sustentable. El objetivo de este estudio es evidenciar los diversos conocimientos y la colaboración del mismo, a través una observación sobre la influencia que cada país tiene a partir de sus aportes científicos.

P2. ¿Qué propuestas de soluciones han presentado?

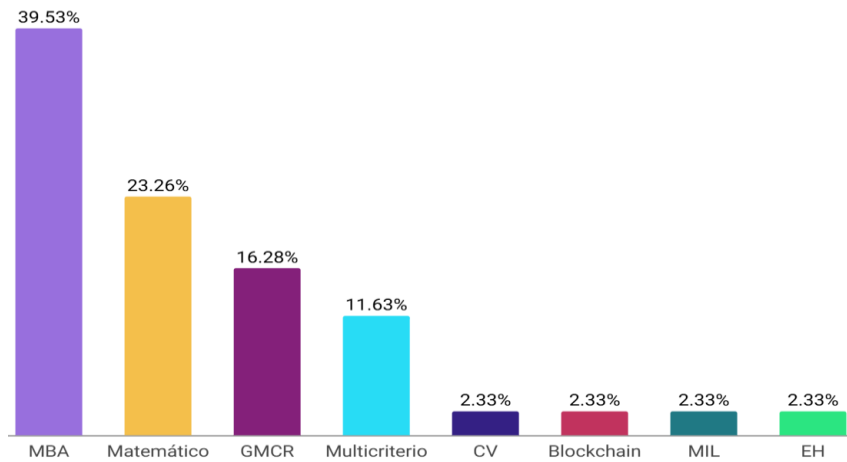
Según los datos presentados en la figura 6, los autores de los artículos (A2, A5, A13, A14, A16, A20, A22, A25, A29, A31, A33, A34, A37, A38, A39, A42, A43) proponen un Modelo Basado en Agentes (MBA), este es una herramienta de gestión imprescindible para las empresas de cualquier sector y tamaño, las políticas o estrategias de sostenibilidad empresarial abarcan todos los retos globales a los que se enfrenta la organización, desde el medio ambiente hacia la protección de datos, pasando por los derechos humanos, la transparencia o responsabilidad fiscal.

La aplicación de un Modelo Matemático plantea los artículos (A1, A8, A9, A11, A15, A17, A18, A19, A23, A26) la gestión de la devolución de productos en cualquier punto de una cadena de suministro, de la forma más costo – eficiente posible mediante fórmulas matemáticas, dicho de otra forma, la logística inversa se encarga de administrar el retorno de un producto, el reciclaje, gestión de residuos y devoluciones. Sin embargo, la logística inversa no se resume al establecimiento de un proceso de devolución eficiente de un producto. Toma en cuenta también lo que ocurre con el producto devuelto: si es defectuoso y debe ser reparado, y si puede volver a la cadena de suministro para ser aprovechado por otro consumidor, ampliando su tiempo de vida útil.

El Modelo GMCR lo prefieren los artículos (A3, A6, A7, A21, A24, A40, A41) este es una representación simplificada de la relación entre variables. Unos artículos prefieren un Modelo Multicriterio son (A12, A30, A32, A35, A36) con una amplitud en metodologías. El artículo (A4) prefiere un Modelo de Ciclo de Vida, el artículo (A27) plantea un Modelo blockchain, El artículo

(A10) expone un Modelo de Mapas Interactivos en Línea (MIL) y finalmente el Artículo (A28) implementa una Evaluación híbrida (EH).

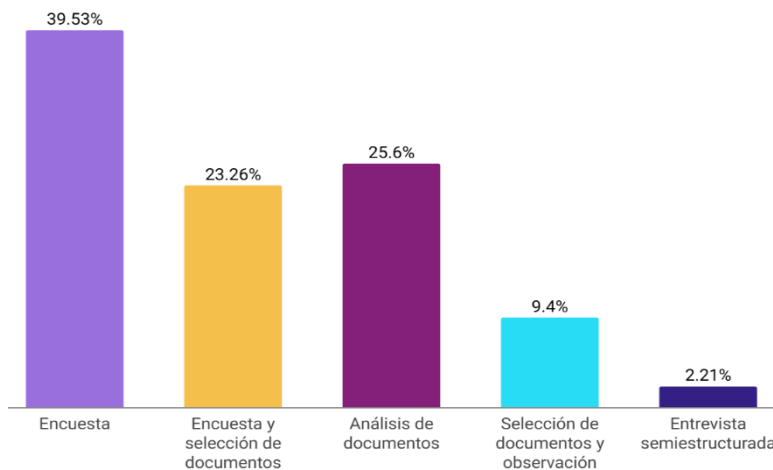
Figura 6
Propuestas de investigación



P3. ¿Cuál fue el método para la recopilación de datos?

Para la determinación de la metodología más comúnmente utilizada por los diferentes autores en las investigaciones de la matriz referencial, se recopiló los datos pertinentes de la figura 7. Esta recopilación de datos nos permitió ordenar la información. Y esto facilita la identificación de patrones y diversas tendencias.

Figura 7
Metodologías empleadas en las investigaciones



Velasco-Muñoz et al., (2021) deduce que integrar un concepto de logística inversa sería oportuno para el aporte a la sustentabilidad del medio ambiente en un mundo que cada vez es menos inconsciente del impacto que genera, además se espera que en el futuro esta tendencia aumente aún más, por ello dicha propuesta se posiciona como una solución importante, ya que esta estrategia da resultados a la gran demanda y se prevé ser más amigable con el planeta con respecto a la industria y su responsabilidad social Ismail & Hanafiah et al., (2019) nos da a entender que en los últimos años ha ido incrementando su importancia por su gestión compleja, se ha explorado diversos aspectos sobre esta gestión, la reducción de huella de carbono, la

minimización de las emisiones de CO₂ y el uso de energías renovables serían prioridad en la cadena de suministro, es por ello que se requiere de una logística sostenible siempre buscando la disminución del impacto ambiental.

Un estudio presentó un nuevo marco de evaluaciones de riesgo el mismo que es diseñado para evaluar los desafíos de la gestión de residuos de envases de plástico en contexto de logística inversa, aquí se aplicó un análisis de causa - efecto para la toma de decisiones en un entorno difuso, para aumentar los criterios de riesgo, abarcan la gravedad, la ocurrencia y la detección, se empleó modelos matemáticos, para priorizar modos de fallo (Sumrit & Keeratibhubordee et al., 2025). Otro enfoque importante ha sido la formulación o elaboración de un modelo basado en agentes (MBA), donde los procesos transforman aquellos recursos o materiales y/o energéticos en otros recursos y estos podrían ser comprados, consumidos, generados, se plantea un modelo y optimización de multiescala usando energía, es una herramienta para toma de decisiones, análisis de riesgos y cuantificación de errores (Iakovou et al., 2024).

Haq et al., (2023) nos proporciona la información sobre que, la logística inversa sería un gran aporte a la sustentabilidad del medio ambiente, en un estudio reciente se cuantifica el impacto de la logística entre minoristas y proveedores, se elaboró un cuestionario autoadministrativo usando la escala de Likert de cinco puntos para la medición de las respuestas, usando un análisis para los procesos con el fin de evaluar un modelo de mediación de manera moderada. Otros expertos han preferido dividir en tres secciones, la primera parte se revisa la literatura existente sobre el tema abordado en este caso de logística inversa de manera multiperíodo, la segunda fase brindara una breve redacción de la literatura sobre la segunda variable de estudio (H. Li & Alumur, 2024).

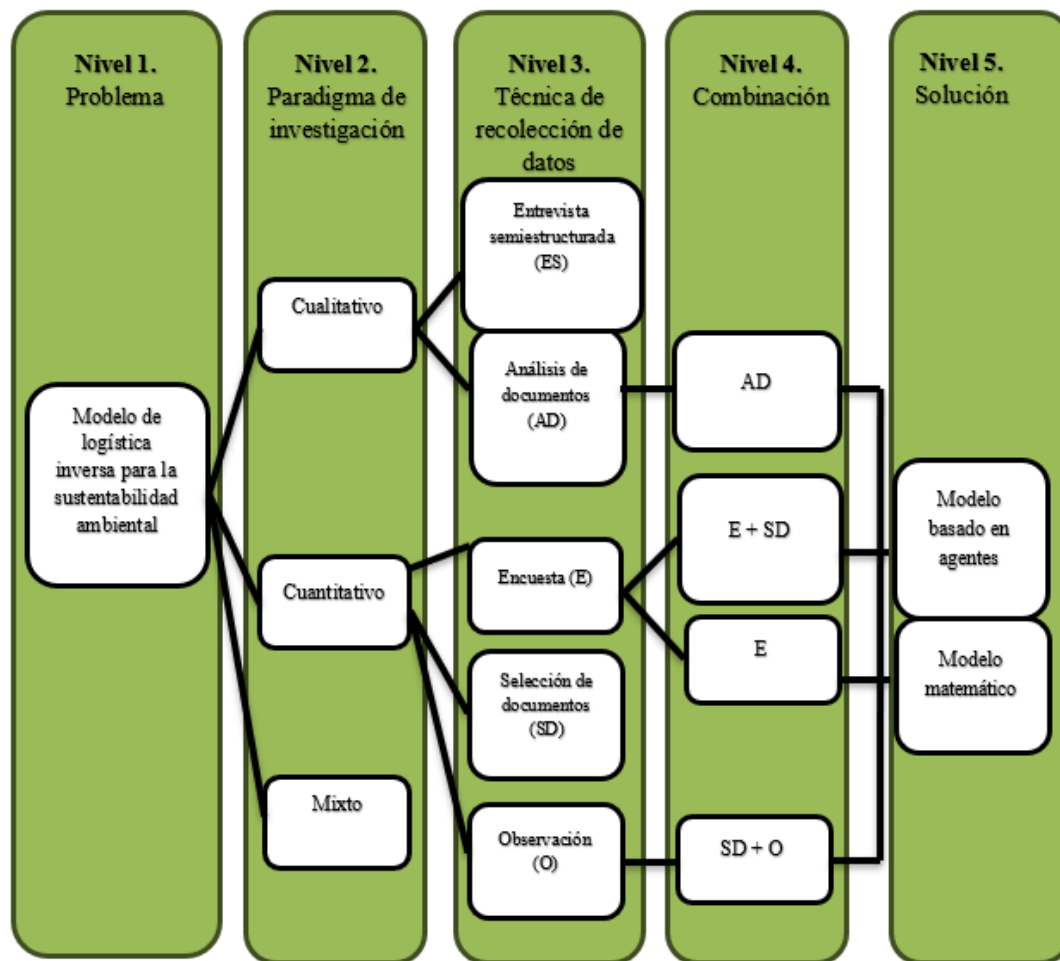
La gran mayoría de los documentos revisados adoptaron un enfoque cuantitativo, sin embargo, se considera que se implemente también un enfoque cualitativo por lo tanto indica que prefieren una medición objetiva de los resultados, durante el análisis del estado del arte se observa claramente que han adoptado el método deductivo y un poco el inductivo, especialmente los artículos científicos lo que corresponde al uso de la lógica y la inferencia de la investigación. Al examinar cuidadosamente los estudios por los expertos se observó que las encuestas se consideran un punto importante para la recolección y toma de datos para el estudio en conjunto de la observación y la selección de documentos por otra parte el análisis de datos fue la técnica más usada especialmente por lo que corresponde a los métodos inductivos así también le sigue las entrevistas semiestructuradas que podría ser una segunda opción. En este sentido ambos enfoques se enfatizaron en usar y recolectar datos de primera mano para el concepto de estudio. Además, las encuestas fueron crucial para el respaldo de investigación de fuentes históricas y bases teóricas.

Delineación del protocolo

La delineación del protocolo para el modelo de logística inversa es fundamental para la observación de las técnicas empleadas en este estudio, la logística inversa para un enfoque de sustentabilidad ambiental comprende amplios aspectos, ambientales, económicos, sociales y políticos. En esta propuesta se detallan los métodos utilizados, las técnicas cuantitativas y cualitativas, los instrumentos expuestos anteriormente por expertos. A continuación, se presenta el protocolo de la investigación (Figura 8).

Figura 8

Protocolo de logística inversa



DISCUSIÓN

En este estudio el Modelo Basado en Agentes (MBA), La metodología de Modelo matemático, Métodos para resolución de conflictos (GMCR) y de multicriterio. Tanto como en enfoque deductivo e inductivo se sugieren como prácticas de investigación de este campo. En cuanto a las técnicas de recolección de datos se sugiere el uso de encuestas, observación y la selección de documentos, lo que corresponde a una intervención directamente en el entorno de estudio.

Bigum et al., (2012), deduce que el análisis del estado del arte determina metodologías más usadas por los expertos. El protocolo de logística inversa constó con 5 niveles donde: En el primer nivel se presentó el problema a tratar el cual fue Modelo de logística inversa para la sustentabilidad ambiental. En el segundo nivel se presentó el paradigma de investigación donde obtuvimos los enfoques tanto cualitativo, cuantitativo y mixto según la revisión realizada. En el tercer nivel definimos las técnicas de recolección de datos obtenidas como fue para el enfoque cualitativo la entrevista semiestructurada (ES) y análisis de documentos (AD), para el enfoque cuantitativo la encuesta (E), selección de documentos (SD) y la observación (O), para el enfoque mixto no se obtuvo una metodología. En el cuarto nivel se presentó la combinación de las técnicas de recolección de datos. Finalmente, en el quinto nivel se obtuvo la solución donde se concluyó 2 modelos a emplear como es el Modelo Basado en Agentes (MBA) y Modelo matemático.

Después de una exhaustiva revisión de literatura y un análisis bibliométrico en sentido de nuestras variables tanto como logística inversa y sustentabilidad ambiental, estudiando minuciosamente investigaciones anteriores realizadas por expertos, se determinó el uso de enfoques cualitativo y cuantitativo, el cualitativo se basa en el análisis de documentos es decir investigaciones pasadas por otro lado la parte cuantitativa se basa en implementar un instrumento como es la encuesta, ambos enfoques nos dieron la solución de llegar a un modelo basado en agentes en conjunto de modelo matemático, estos dos modelos encontrados se aplicarán para la elaboración de este estudio.

Limitaciones del Estudio

A pesar de que este estudio proporciona un análisis exhaustivo sobre las metodologías empleadas en la logística inversa y su relación con la sustentabilidad ambiental, es importante señalar algunas limitaciones inherentes al enfoque adoptado. En primer lugar, la selección de fuentes podría haber estado restringida por factores como el acceso limitado a investigaciones recientes o a estudios provenientes de contextos geográficos diversos. Si bien se realizó una revisión exhaustiva de la literatura, esta se centró principalmente en estudios de ciertas regiones, lo que podría no reflejar adecuadamente las particularidades de otros contextos socioeconómicos o ambientales. Adicionalmente, el enfoque metodológico utilizado, principalmente basado en el análisis de documentos y encuestas, puede haber restringido la recopilación de datos más dinámicos o de mayor profundidad que podrían haberse obtenido mediante métodos cualitativos alternativos, como entrevistas en profundidad o estudios de campo. Esto podría haber afectado la capacidad del estudio para capturar la complejidad total del fenómeno de la logística inversa y su impacto en la sustentabilidad ambiental.

Proyecciones Futuras

A partir de los resultados obtenidos, se sugieren varias líneas de investigación que podrían contribuir a un mayor entendimiento y desarrollo de la logística inversa dentro del marco de la sustentabilidad ambiental. En particular, se recomienda explorar el uso de tecnologías

emergentes, tales como la inteligencia artificial (IA) y el análisis de grandes volúmenes de datos (Big Data), para la optimización de los modelos de logística inversa, especialmente en sectores como la gestión de residuos electrónicos y la economía circular. Estas tecnologías podrían permitir una mayor eficiencia en la toma de decisiones y en la implementación de prácticas sostenibles en las cadenas de suministro.

Asimismo, sería valioso investigar la aplicación de modelos híbridos que integren enfoques tanto cualitativos como cuantitativos, con el fin de proporcionar una visión más holística y precisa de los sistemas logísticos. Estos modelos permitirían capturar las dinámicas sociales, económicas y ambientales de los procesos logísticos de forma más completa.

Finalmente, dada la creciente importancia de las políticas públicas en la promoción de prácticas sostenibles, resulta esencial que futuras investigaciones aborden la interacción entre la normativa ambiental y los modelos de logística inversa, evaluando cómo estas políticas pueden ser implementadas de manera efectiva para maximizar la eficiencia operativa y reducir los impactos negativos sobre el medio ambiente. Este enfoque permitirá no solo mejorar la comprensión teórica del campo, sino también proporcionar directrices prácticas para la implementación de soluciones innovadoras y sostenibles en la logística inversa.

CONCLUSIÓN

La logística inversa y la sustentabilidad ambiental están estrechamente relacionadas, ya que ambas disciplinas buscan mitigar el impacto negativo de los desechos, particularmente en el ámbito de los residuos electrónicos y eléctricos. En este sentido, la logística inversa desempeña un papel crucial al ofrecer soluciones para la recolección, reutilización y reciclaje de productos al final de su ciclo de vida, lo que contribuye a la reducción de los efectos nocivos sobre el medio ambiente. A través de la recuperación de materiales valiosos de los equipos obsoletos, no solo se preservan recursos naturales, sino que también se promueve una gestión más eficiente de los desechos, reduciendo la contaminación y la demanda de nuevos materiales.

A partir de los hallazgos de esta revisión, se puede concluir que la logística inversa, al enfocarse en la gestión eficiente de residuos y en la reutilización de recursos, constituye una herramienta clave para avanzar hacia una mayor sustentabilidad ambiental. La implementación adecuada de modelos logísticos inversos no solo permite mitigar los impactos negativos de los desechos electrónicos, sino que también presenta un potencial significativo para mejorar la competitividad económica de las empresas. Este enfoque integral, que abarca tanto beneficios ambientales como económicos, se presenta como un paso fundamental hacia la transición hacia una economía más circular y sostenible. Las futuras investigaciones podrían explorar más a fondo los modelos operacionales de logística inversa aplicados a diferentes sectores industriales, con el objetivo de identificar mejores prácticas y promover políticas públicas que favorezcan la adopción generalizada de este enfoque.

REFERENCIAS

- Ahmadi, S., Shokouhyar, S., Amerioun, M., & Salehi Tabrizi, N. (2024). A social media analytics-based approach to customer-centric reverse logistics management of electronic devices: A case study on notebooks. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 76, 103540. <https://doi.org/10.1016/J.JRETCONSER.2023.103540>
- Ahmed, R. R., & Zhang, X. (2021). Multi-stage network-based two-type cost minimization for the reverse logistics management of inert construction waste. *Waste Management*, 120, 805–819. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2020.11.004>
- Aidonis, D., Achillas, C., Folinas, D., Keramydas, C., & Tsolakis, N. (2019). Decision support model for evaluating alternative waste electrical and electronic equipment management schemes-A case study. *Sustainability (Switzerland)*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/SU11123364>
- Alfaro-Algaba, M., & Ramirez, F. J. (2020). Techno-economic and environmental disassembly planning of lithium-ion electric vehicle battery packs for remanufacturing. *Resources, Conservation and Recycling*, 154. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2019.104461>
- Bigum, M., Brogaard, L., & Christensen, T. H. (2012). Metal recovery from high-grade WEEE: A life cycle assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 207–208, 8–14. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2011.10.001>
- Brandão, R., Edwards, D. J., Hosseini, M. R., Silva Melo, A. C., & Macêdo, A. N. (2021). Reverse supply chain conceptual model for construction and demolition waste. *Waste Management and Research*, 39(11), 1341–1355. <https://doi.org/10.1177/0734242X21998730>
- Campos, E. A. R. de, Paula, I. C. de, Caten, C. S. ten, Maçada, A. C. G., Marôco, J., & Ziegelmann, P. K. (2020). The effect of collaboration and IT competency on reverse logistics competency - Evidence from Brazilian supply chain executives. *Environmental Impact Assessment Review*, 84. <https://doi.org/10.1016/J.EIAR.2020.106433>
- Cardoso, L. N. P., Miranda, K. D. de O., da Silva, E. F. V., Guarnieri, P., Leão e Silva Filho, J., & e Silva, L. C. (2023). E-Waste Management: An Analysis under the Perspective of Conflicts and Shared Responsibility. *Logistics*, 7(4), 74. <https://doi.org/10.3390/logistics7040074>
- Chen, W. K., Zhao, X., Liu, X. Y., Xie, X. Y., Zeng, Y., & Cui, G. (2024). Photoinduced Nonadiabatic Dynamics of a Single-Walled Carbon Nanotube-Porphyrin Complex. *Journal of Physical Chemistry A*. <https://doi.org/10.1021/ACS.JPCA.4C04544>
- de Araújo, S. R., Rodrigues, L. F., Mendes, J. C., & Peixoto, R. A. F. (2020). Reverse logistics system applied to the reuse of iron ore tailings. *Waste Management and Research*, 38(12), 1429–1437. <https://doi.org/10.1177/0734242X20944478>

- de Campos, E. A. R., de Paula, I. C., Caten, C. S. ten, Tsagarakis, K. P., & Ribeiro, J. L. D. (2023). Logistics performance: critical factors in the implementation of end-of-life management practices in the pharmaceutical care process. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(11), 29206–29228. <https://doi.org/10.1007/S11356-022-24035-Z>
- de Lorena Diniz Chaves, G., Siman, R. R., Ribeiro, G. M., & Chang, N. Bin. (2021). Synergizing environmental, social, and economic sustainability factors for refuse derived fuel use in cement industry: A case study in Espirito Santo, Brazil. *Journal of Environmental Management*, 288. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.112401>
- Derse, O. (2024). Prioritizing solutions of green Reverse logistics barriers with Fuzzy DEMATEL – FUCOM – SWARA methods. *Ecological Indicators*, 165, 112198. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2024.112198>
- Farida, Y., Siswanto, N., & Vanany, I. (2024). Reverse logistics toward a circular economy: Consumer behavioral intention toward polyethylene terephthalate (PET) recycling in Indonesia. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10, 100807. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100807>
- Govindan, K., Paam, P., & Abtahi, A. R. (2016). A fuzzy multi-objective optimization model for sustainable reverse logistics network design. *Ecological Indicators*, 67, 753–768. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2016.03.017>
- Guarnieri, P., Vieira, B. de O., Cappellesso, G., Alfinito, S., & Silva, L. C. e. (2022). Analysis of Habits of Consumers Related to e-Waste Considering the Knowledge of Brazilian National Policy of Solid Waste: A Comparison among White, Green, Brown and Blue Lines. *Sustainability (Switzerland)*, 14(18), 11557. <https://doi.org/10.3390/su141811557>
- Guggeri, E. M., Ham, C., Silveyra, P., Rossit, D. A., & Piñeyro, P. (2023). Goal programming and multi-criteria methods in remanufacturing and reverse logistics: Systematic literature review and survey. *Computers & Industrial Engineering*, 185, 109587. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2023.109587>
- Haq, M., Moazzam, M., Khan, A. S., & Ahmed, W. (2023). The impact of reverse logistics process coordination on third party relationship quality: A moderated mediation model for multichannel retailers in the fashion industry. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 73, 103362. <https://doi.org/10.1016/J.JRETCONSER.2023.103362>
- Iakovou, E., Pistikopoulos, E. N., Walzberg, J., Iseri, F., Iseri, H., Chrisandina, N. J., Vedant, S., & Nkoutche, C. (2024). Next-generation reverse logistics networks of photovoltaic recycling: Perspectives and challenges. *Solar Energy*, 271, 112329. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2024.112329>
- Ismail, H., & Hanafiah, M. M. (2019). Discovering opportunities to meet the challenges of an effective waste electrical and electronic equipment recycling system in Malaysia. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117927. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.117927>

- Lase, I. S., Ragaert, K., Dewulf, J., & De Meester, S. (2021). Multivariate input-output and material flow analysis of current and future plastic recycling rates from waste electrical and electronic equipment: The case of small household appliances. *Resources, Conservation and Recycling*, 174. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2021.105772>
- Le, S. T. (2023). Investigating the Drivers of the Reverse Logistics Implementation in Reducing Waste in Vietnam. *Environmental Health Insights*, 17. <https://doi.org/10.1177/11786302231211058>
- Li, H., & Alumur, S. A. (2024). Multi-period reverse logistics network design for water resource management in hydraulic fracturing. *Applied Mathematical Modelling*, 129, 612–632. <https://doi.org/10.1016/J.APM.2024.02.010>
- Li, M., Lin, D., Fan, J., Zhang, F., Pan, W., Zhou, D., & Ge, J. (2024). Transcatheter Closure of Atrial Septal Defects with Absent Aortic Rim and the Predictors of Right Atrial Reverse Remodeling: 5 Years Experience in China. *Cardiology (Switzerland)*. <https://doi.org/10.1159/000538772>
- Liu, C., Liu, L., Gao, J., Wang, J., & Liu, Y. (2021). Identification of Two Long Non-Coding RNAs AC010082.1 and AC011443.1 as Biomarkers of Coronary Heart Disease Based on Logistic Stepwise Regression Prediction Model. *Frontiers in Genetics*, 12. <https://doi.org/10.3389/FGENE.2021.780431/PDF>
- Liu, C., Tang, J., & Zhang, Z. H. (2024). Impacts of capacity redundancy and process flexibility on risk mitigation in e-waste recycling supply chain management. *Omega (United Kingdom)*, 128, 103110. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2024.103110>
- Luo, D., Fernández de Labastida, M., Cortina, J. L., & Lopez, J. (2023). Recovery of antimony and bismuth from arsenic-containing waste streams from the copper electrorefining circuit: An example of promoting critical metals circularity from secondary resources. *Journal of Cleaner Production*, 415, 137902. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137902>
- Luqman, A., & Shahzadi, G. (2023). Multi-attribute decision-making for electronic waste recycling using interval-valued Fermatean fuzzy Hamacher aggregation operators. *Granular Computing*, 8(5), 991–1012. <https://doi.org/10.1007/S41066-023-00363-4>
- Maheswari, H., Yudoko, G., Adhiutama, A., & Agustina, H. (2020). Sustainable reverse logistics scorecards for the performance measurement of informal e-waste businesses. *Heliyon*, 6(9). <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2020.E04834>
- Marinello, S., & Gamberini, R. (2021). Multi-criteria decision making approaches applied to waste electrical and electronic equipment (WEEE): A comprehensive literature review. *Toxics*, 9(1), 1–20. <https://doi.org/10.3390/TOXICS9010013>
- Mishra, A. R., Rani, P., & Pandey, K. (2022). Fermatean fuzzy CRITIC-EDAS approach for the selection of sustainable third-party reverse logistics providers using improved generalized

- score function. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 13(1), 295–311. <https://doi.org/10.1007/S12652-021-02902-W>
- Mishra, S., & Singh, S. P. (2022). Designing dynamic reverse logistics network for post-sale service. *Annals of Operations Research*, 310(1), 89–118. <https://doi.org/10.1007/S10479-020-03710-9>
- Moslehi, M. S., Sahebi, H., & Teymouri, A. (2021). A multi-objective stochastic model for a reverse logistics supply chain design with environmental considerations. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12(7), 8017–8040. <https://doi.org/10.1007/S12652-020-02538-2>
- Mu, N., Wang, Y., Chen, Z. S., Xin, P., Deveci, M., & Pedrycz, W. (2023). Multi-objective combinatorial optimization analysis of the recycling of retired new energy electric vehicle power batteries in a sustainable dynamic reverse logistics network. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(16), 47580–47601. <https://doi.org/10.1007/S11356-023-25573-W>
- National Geographic*. (2022). <https://www.nationalgeographic.com/medio-ambiente/2022/05/por-que-el-reciclaje-de-aparatos-electronicos-es-tan-importante-para-el-planeta>
- Organización Mundial de la Salud*. (n.d.). Retrieved June 20, 2024, from <https://www.who.int/es>
- Palanisamy, K., & Subburaj, R. G. (2023). Integration of electronic waste management: a review of current global generation, health impact, and technologies for value recovery and its pertinent management technique. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(23), 63347–63367. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26719-6>
- Peña-Montoya, C. C., Bouzon, M., Torres-Lozada, P., & Vidal-Holguin, C. J. (2020). Assessment of maturity of reverse logistics as a strategy to sustainable solid waste management. *Waste Management and Research*, 38(1_suppl), 65–76. <https://doi.org/10.1177/0734242X19897131>
- Poonia, V., Kulshrestha, R., & Sangwan, K. S. (2024). A Comparative Study of ϵ -constraint, LP-metric, and Weighted Sum Multi-objective Optimization Methods in a Circular Economy. *Procedia CIRP*, 122, 294–299. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2024.01.043>
- Qadir, A., Abdullah, S., Khan, S., & Khan, F. (2023). A New Extended Topsis Method for E-Waste Recycling Partner Selection under Complex Pythagorean fuzzy rough Dombi aggregation Operator. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3338446>
- Rahayu, P. D., Ardi, R., & Setiawan, A. D. (2019). Model conceptualization for optimal strategies in transboundary movement of waste electrical and electronic equipment: A game theory approach. *2019 Asia Pacific Conference on Research in Industrial and Systems Engineering, APCORISE 2019*. <https://doi.org/10.1109/APCORISE46197.2019.9318883>

- Rau, H., Daniel Budiman, S., & Monteiro, C. N. (2021). Improving the sustainability of a reverse supply chain system under demand uncertainty by using postponement strategies. *Waste Management*, 131, 72–87. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2021.05.018>
- Ren, Y., Chen, Q., Lau, Y. Y., Dulebenets, M. A., Li, M., Li, B., Poo, M. C. P., & Zhang, P. (2024). An Improved Migratory Birds Optimization Algorithm for Closed- Loop Supply Chain Network Planning in a Fuzzy Environment. *PLoS ONE*, 19(6 June). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0306294>
- Santos, S. M., & Ogunseitan, O. A. (2022). E-waste management in Brazil: Challenges and opportunities of a reverse logistics model. *Environmental Technology and Innovation*, 28, 102671. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102671>
- Sar, K., & Ghadimi, P. (2023). A systematic literature review of the vehicle routing problem in reverse logistics operations. *Computers & Industrial Engineering*, 177, 109011. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2023.109011>
- Sengupta, D., Das, A., Bera, U. K., & Chen, L. (2023). A sustainable green reverse logistics plan for plastic solid waste management using TOPSIS method. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(43), 97734–97753. <https://doi.org/10.1007/S11356-023-29067-7>
- Sumrit, D., & Keeratibhubordee, J. (2025). Risk Assessment Framework for Reverse Logistics in Waste Plastic Recycle Industry: A Hybrid Approach Incorporating FMEA Decision Model with AHP-LOPCOW- ARAS Under Trapezoidal Fuzzy Set. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 8(1), 42–81. <https://doi.org/10.31181/dmame812025984>
- Sun, X., Yu, H., & Solvang, W. D. (2022). Towards the smart and sustainable transformation of Reverse Logistics 4.0: a conceptualization and research agenda. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(46), 69275–69293. <https://doi.org/10.1007/S11356-022-22473-3>
- Tang, H., & Thelkar, A. R. (2023). A fuzzy mathematical model for hybrid inventory and purchase optimization in a reverse logistics system considering shortage and warehouse capacity. *Science Progress*, 106(4). <https://doi.org/10.1177/00368504231201797>
- Tosarkani, B. M., Amin, S. H., & Zolfagharinia, H. (2020). A scenario-based robust possibilistic model for a multi-objective electronic reverse logistics network. *International Journal of Production Economics*, 224. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2019.107557>
- Valenzuela, J., Alfaro, M., Fuertes, G., Vargas, M., & Sáez-Navarrete, C. (2021). Reverse logistics models for the collection of plastic waste: A literature review. *Waste Management and Research*, 39(9), 1116–1134. <https://doi.org/10.1177/0734242X211003948>
- Velasco-Muñoz, J. F., Aznar-Sánchez, J. A., Manzano-Archilla, M. J., & López-Felices, B. (2021). Waste electrical and electronic equipment and environment: context,

- implications, and trends. *Environmental Management of Waste Electrical and Electronic Equipment*, 23–48. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822474-8.00002-7>
- Wu, Z., Qian, X., Huang, M., Ching, W. K., Kuang, H., & Wang, X. (2021). Channel leadership and recycling channel in closed-loop supply chain: The case of recycling price by the recycling party. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 17(6), 3247–3268. <https://doi.org/10.3934/JIMO.2020116>
- Xiao, C. (2024). Sustainable logistics development strategy based on SWOT and analytic hierarchy process. *PLoS ONE*, 19(10 October). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0312560>
- Xiaoping, B., & Meiyang, H. (2023). Reverse logistics planning research of building waste from perspective of closed supply chain in urban sustainable environment governance. *Science Progress*, 106(1). <https://doi.org/10.1177/00368504231150427>
- Xin, C., Wang, J., Wang, Z., Wu, C. H., Nawaz, M., & Tsai, S. B. (2022). Reverse logistics research of municipal hazardous waste: a literature review. *Environment, Development and Sustainability*, 24(2), 1495–1531. <https://doi.org/10.1007/S10668-021-01526-6>
- Yu, H., & Sun, X. (2024). Uncertain remanufacturing reverse logistics network design in industry 5.0: Opportunities and challenges of digitalization. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133, 108578. <https://doi.org/10.1016/J.ENGAPPAL.2024.108578>
- Zhou, X., Li, T., & Ma, X. (2021). A bibliometric analysis of comparative research on the evolution of international and Chinese green supply chain research hotspots and frontiers. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(6), 6302–6323. <https://doi.org/10.1007/S11356-020-11947-X>