



Optimización de Rutas de Recolección y Transporte de Residuos Sólidos Urbanos, Hacia una Reducción de Costos e Impacto Ambiental.

Optimization of Urban Solid Waste Collection and Transportation Routes, Towards Reducing Costs and Environmental Impact

Victor Orlando Arroyo Torres¹

voarroyo@itsoriente.edu.ec.

Instituto Superior Tecnológico Oriente (ITSO)
Riobamba, Ecuador

Benjamín Gabriel Quito Cortez²

benjaminquito@bqc.com.ec

Instituto Superior Tecnológico Oriente (ITSO)
Riobamba, Ecuador

Segundo Martin Quito Cortez³

martinquito@bqc.com.ec

Instituto Superior Tecnológico Oriente (ITSO)
Riobamba, Ecuador

Recepción: 05-01-2026

Aceptación: 05-02-2026

Publicación: 30-03-2026

Como citar este artículo: Arroyo, V. Quito, B. Quito, S. (2026). **Optimización de Rutas de Recolección y Transporte de Residuos Sólidos Urbanos, Hacia una Reducción de Costos e Impacto Ambiental.** *Metrópolis. Revista de Estudios Globales Universitarios*, 7 (1), pp. 216-263.

¹ Tecnólogo en seguridad y salud ocupacional. Instituto Superior Tecnológico Oriente (ITSO); Maestrante en Herramientas de Seguridad Industrial y Salud en el Trabajo. (ITSO).

² Abogado, Magister en Educación (Universidad Bicentenario de Aragua) Venezuela, Magister en Ciencias Gerenciales (Universidad internacional del caribe y América latina) Curacao, Doctor en Ciencias de la Educación PHD (UBA) Venezuela, Doctor en Ciencias Gerenciales PHD (universidad internacional del caribe y América latina) Curacao, Postdoctorado en Ciencias de la Educación (UBA) Venezuela.

³ Ingeniero Agrónomo (UNIVERSIDAD CATOLICA DE CUENCA), Magister en Desarrollo Local, Mención Planificación, Desarrollo y Ordenamiento Territorial (UNIVERSIDAD CATOLICA DE CUENCA); Doctor en Ciencias de la Educación (UNIVERSIDAD BICENTENARIA DE ARAGUA) VENEZUELA, Rector Instituto Superior Tecnológico CIC YASUNI Docente.





Resumen

La recolección y transporte de residuos sólidos urbanos representa uno de los componentes más costosos y ambientalmente sensibles dentro de la gestión municipal. En este estudio se analiza la optimización de rutas como estrategia para mejorar la eficiencia operativa y reducir la huella ambiental del sistema de limpieza urbana. La gestión eficiente de los residuos sólidos urbanos representa un desafío creciente para los gobiernos locales, especialmente en contextos donde la expansión urbana y el incremento poblacional elevan los costos operativos y el impacto ambiental de los sistemas de recolección. En este estudio se plantea la optimización de rutas de recolección y transporte de residuos sólidos mediante la aplicación de herramientas de análisis geoespacial y modelos de optimización matemática orientados a minimizar distancias recorridas, consumo de combustible y emisiones de CO₂. El propósito de la investigación es diseñar un sistema logístico más sostenible y rentable que permita mejorar la eficiencia operativa del servicio público de limpieza urbana. Se propone un enfoque metodológico mixto, combinando la recopilación de datos geográficos, análisis de capacidad vehicular y modelado computacional de rutas óptimas. Los resultados esperados evidencian una reducción significativa en los costos de operación y una mejora en la sostenibilidad ambiental, contribuyendo a la toma de decisiones basadas en evidencia para la gestión integral de residuos. Este estudio busca aportar un modelo replicable adaptable a distintas realidades municipales, fortaleciendo la planificación urbana sostenible y la economía circular en las ciudades latinoamericanas. **Palabras clave:** optimización de rutas, residuos sólidos urbanos, sostenibilidad ambiental, logística urbana, reducción de costos.

Abstract

The collection and transport of municipal solid waste represents one of the most costly and environmentally sensitive components of municipal management. This study analyzes route optimization as a strategy to improve operational efficiency and reduce the environmental footprint of the urban cleaning system. Efficient management of municipal solid waste represents a growing challenge for local governments, especially in contexts where urban sprawl and population growth increase operating costs and the environmental impact of collection systems. This study proposes the optimization of solid waste collection and transport routes through the application of geospatial analysis tools and mathematical optimization models aimed at minimizing distances traveled, fuel consumption, and CO₂ emissions. The purpose of the research is to design a more sustainable and cost-effective logistics system that improves the operational efficiency of the public urban cleaning service. A mixed-methods approach is proposed, combining the collection of geographic data, vehicle capacity analysis, and computational modeling of optimal routes. The expected results demonstrate a significant reduction in operating costs and an improvement in environmental sustainability, contributing to evidence-based decision-making for integrated waste management. This study aims to provide a replicable model adaptable to different municipal contexts, strengthening sustainable urban planning and the circular economy in Latin American cities. **Keywords:** route optimization, municipal solid waste, environmental sustainability, urban logistics, cost reduction.





Introducción.

La gestión de los residuos sólidos urbanos constituye uno de los principales desafíos ambientales y económicos de las ciudades contemporáneas. La eficiencia con la que se diseñan y ejecutan las rutas de recolección determina no solo la calidad del servicio, sino también los niveles de consumo energético, las emisiones atmosféricas y el impacto global sobre la sostenibilidad urbana. El crecimiento poblacional, la urbanización acelerada y los patrones de consumo generan volúmenes crecientes de desechos que presionan los sistemas de recolección y transporte, afectando tanto la sostenibilidad ambiental como la eficiencia operativa de los gobiernos locales. En América Latina, se estima que más del 50 % de los municipios presentan limitaciones en la gestión integral de los residuos, lo que se traduce en altos costos de operación, deficiente cobertura y contaminación ambiental. Esta situación demanda la implementación de estrategias innovadoras que optimicen los procesos logísticos y reduzcan el impacto ecológico asociado (Banco Interamericano de Desarrollo, 2022).

La optimización de rutas de recolección y transporte surge como una alternativa clave para incrementar la eficiencia del servicio público de limpieza urbana. A través del uso de herramientas de análisis geoespacial, sistemas de información geográfica y modelos matemáticos de optimización, es posible rediseñar las rutas con base en variables como distancia, tiempo, capacidad vehicular y consumo energético. Diversos estudios demuestran que la aplicación de estos enfoques permite reducir significativamente los costos de combustible y las emisiones de gases de





efecto invernadero, además de mejorar la productividad del personal y la calidad del servicio (González et al., 2020).

Sin embargo, en muchos municipios latinoamericanos, la recolección de residuos continúa realizándose mediante rutas empíricas, determinadas por la experiencia de los operarios y no por análisis técnico. Esto genera trayectos ineficientes, sobrecarga vehicular y aumento innecesario del gasto operativo. Frente a este panorama, surge la necesidad de formular un modelo de optimización que integre criterios técnicos, ambientales y económicos para fortalecer la sostenibilidad del sistema (Pérez y Lara, 2023).

La presente investigación busca dar respuesta a la pregunta: ¿De qué manera la optimización de rutas de recolección y transporte de residuos sólidos urbanos contribuye a la reducción de costos y del impacto ambiental en los sistemas municipales? Para ello, se adopta una metodología de enfoque mixto, que combina el análisis cuantitativo mediante algoritmos de optimización y herramientas de sistemas de información geográfica, con la evaluación cualitativa de la gestión operativa actual. El propósito es generar un modelo replicable que aporte al diseño de políticas locales orientadas a la gestión eficiente de residuos y a la transición hacia una economía circular urbana.

Marco Teórico.

La gestión de residuos sólidos urbanos constituye una de las áreas más críticas dentro de la planificación y sostenibilidad de las ciudades modernas. Su adecuada recolección, transporte y disposición final representan un reto tanto técnico como ambiental, especialmente en contextos urbanos donde la expansión poblacional y la densidad





demográfica elevan las demandas sobre los servicios públicos. La gestión ineficiente de los residuos genera impactos negativos que van desde la contaminación del suelo y las fuentes hídricas hasta el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, afectando la calidad de vida de la población urbana. La optimización de rutas de recolección y transporte de residuos sólidos se presenta como una estrategia esencial para incrementar la eficiencia del sistema, reducir los costos de operación y minimizar los impactos ambientales asociados (Organización Panamericana de la Salud, 2021).

Desde una perspectiva conceptual, la optimización de rutas puede definirse como el proceso mediante el cual se determinan trayectorias logísticas que permiten alcanzar un objetivo de eficiencia, considerando restricciones como capacidad de los vehículos, volumen de residuos, tiempo y distancia. En el ámbito de la gestión de residuos, este proceso se apoya en herramientas de análisis geoespacial, sistemas de información geográfica y modelos matemáticos de programación lineal o heurística, que buscan minimizar el recorrido total de los vehículos recolectores. Estas técnicas, además de contribuir a la reducción de consumo de combustible y mantenimiento vehicular, fomentan una gestión ambientalmente responsable y coherente con los principios de la economía circular (García y Méndez, 2021).

El enfoque de economía circular cobra relevancia al promover la reducción, reutilización y reciclaje de materiales, priorizando la eficiencia en el uso de recursos y la disminución de desechos destinados a vertederos. En este sentido, la optimización de rutas de recolección se alinea con la transición hacia modelos urbanos sostenibles, donde la planificación logística





eficiente se convierte en un componente central para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el objetivo de desarrollo sostenible 11, que busca ciudades y comunidades sostenibles, y el Objetivo de desarrollo sostenible 12, que promueve producción y consumo responsables (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2022).

En relación con la base legal, el marco normativo ecuatoriano y latinoamericano ha establecido directrices orientadas a fortalecer la gestión integral de residuos sólidos. En Ecuador, la Ley Orgánica de Economía Circular Inclusiva (2021) impulsa la implementación de políticas públicas que fomenten la reutilización y el aprovechamiento de los desechos, incentivando la eficiencia en los procesos de recolección y transporte. De igual manera, la Ley de Gestión Ambiental (Registro Oficial, 2004) y el Código Orgánico del Ambiente (2017) establecen la obligación de los municipios de garantizar sistemas adecuados de recolección, transporte y disposición final, bajo criterios de sostenibilidad ambiental. Estas normas promueven el uso de tecnologías limpias y la optimización de recursos, lo que se vincula directamente con la necesidad de mejorar la planificación logística de los servicios de limpieza urbana.

En otros países de la región, como Colombia, Perú y México, se han adoptado marcos regulatorios similares que buscan fortalecer la eficiencia de los servicios municipales y la incorporación de herramientas tecnológicas en la gestión de residuos. Por ejemplo, la Política Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos de Colombia enfatiza la importancia del uso de modelos de optimización y plataformas digitales para la mejora de la operación logística, mientras que en México la Ley General para la





Prevención y Gestión Integral de los Residuos (2013) establece lineamientos para promover la innovación en los procesos de recolección. Estas iniciativas reflejan una tendencia regional hacia la modernización y digitalización de los sistemas municipales de gestión de residuos, impulsando la sostenibilidad y eficiencia operativa (Ministerio de Vivienda, 2018).

La aproximación al tema de estudio reconoce que, a pesar de los avances normativos y tecnológicos, gran parte de los municipios latinoamericanos continúan enfrentando dificultades para implementar modelos de optimización efectivos. Las causas se relacionan con la falta de datos georreferenciados actualizados, limitaciones presupuestarias y escasa capacitación técnica del personal operativo. Esto deriva en rutas empíricas o improvisadas que incrementan los tiempos de recorrido, el consumo de combustible y los costos de mantenimiento. Frente a este escenario, la aplicación de algoritmos de optimización y herramientas de sistemas de información geográfica ofrece una alternativa viable y de alto impacto, al permitir la simulación de múltiples escenarios logísticos que conducen a una mejor toma de decisiones (Vargas y León, 2023).

La investigación sobre optimización de rutas de recolección de residuos sólidos no se limita únicamente al aspecto técnico, sino que implica una visión integral de sostenibilidad. Se trata de un proceso que vincula la eficiencia económica con responsabilidad ambiental, favoreciendo la reducción de la huella de carbono y la transición hacia modelos urbanos más resilientes, la optimización de rutas es un compromiso con la sostenibilidad ambiental y el bienestar social (Hernández y Córdova, 2023).





Estado del Arte

Diversos estudios coinciden en que la gestión de residuos sólidos urbanos constituye una problemática creciente, asociada tanto al aumento poblacional como a la ineficiencia de los sistemas tradicionales de recolección y transporte. Los autores destacan que, en la mayoría de los países en desarrollo, los municipios operan bajo esquemas logísticos obsoletos, caracterizados por rutas empíricas, uso ineficiente de recursos y escasa aplicación de tecnologías de optimización (Torres y García, 2020).

Uno de los enfoques más abordados es el uso de algoritmos matemáticos aplicados a la optimización de rutas. Según Lozano y Pérez (2021), los modelos de programación lineal y heurística han demostrado ser herramientas efectivas para minimizar distancias y tiempos de recorrido, con resultados que evidencian reducciones significativas en el consumo de combustible y en la emisión de gases contaminantes. De igual manera, investigaciones recientes han incorporado técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático para generar soluciones dinámicas que se adaptan a variables en tiempo real, como el tráfico o el volumen de residuos. Estas propuestas permiten replantear la gestión urbana hacia sistemas inteligentes de recolección, alineados con las políticas de sostenibilidad ambiental (Méndez, 2022).

En el ámbito latinoamericano, el interés por la optimización logística de los servicios de limpieza urbana ha cobrado relevancia en la última década. Estudios realizados en México, Colombia y Perú muestran la efectividad del uso de sistemas de información geográfica en la planificación de rutas óptimas de recolección. Hernández, Córdova y León (2023) afirman que: la integración de los sistemas de información geográfica con modelos de





optimización permite visualizar zonas de mayor densidad poblacional, ajustar frecuencias de recolección y evitar recorridos redundantes, mejorando significativamente la eficiencia del servicio. De manera similar, investigaciones en Ecuador resaltan que la aplicación de estos sistemas puede reducir los costos operativos y las emisiones de CO₂ derivadas del transporte de residuos (Ramírez y Villacís, 2023).

La principal dificultad para implementar estos modelos en América Latina radica en la falta de información georreferenciada actualizada y en las limitaciones presupuestarias que enfrentan los municipios. Vargas y Ochoa (2022) sostienen que: muchos gobiernos locales carecen de bases de datos confiables y de personal capacitado en herramientas digitales, lo que impide la adopción de metodologías basadas en optimización computacional.

Desde una perspectiva ambiental, diversos autores coinciden en que la optimización de rutas de recolección contribuye directamente a la mitigación del cambio climático. Cedeño y Molina (2021) subrayan que: la reducción de kilómetros recorridos por los vehículos recolectores implica un descenso proporcional en el consumo de combustible fósil, disminuyendo la emisión de gases de efecto invernadero. A esto se suma la mejora en el mantenimiento de la flota vehicular, la reducción del ruido urbano y la prolongación de la vida útil de los equipos. En esta línea, la gestión eficiente del transporte de residuos se considera una estrategia clave dentro de los planes de acción climática municipal y un componente esencial de la economía circular.

Otro aporte relevante proviene de los estudios que integran la dimensión social y de gobernanza. González y Herrera (2020) argumentan que: la





optimización logística no debe centrarse únicamente en los indicadores técnicos, sino también en la participación ciudadana y en la educación ambiental como factores que fortalecen la sostenibilidad del sistema. En su análisis, la adopción de rutas optimizadas debe acompañarse de campañas informativas sobre horarios, puntos de acopio y separación de residuos, lo cual incrementa la efectividad de los programas municipales. Esta visión integral responde al paradigma de la gestión participativa, donde la tecnología se articula con la responsabilidad social y ambiental.

Se incorpora también el uso de plataformas digitales y sistemas inteligentes de monitoreo para la recolección de datos en tiempo real. Arévalo y Pacheco (2024) destacan la aplicación de sensores IoT (Internet de las cosas) instalados en contenedores de residuos, los cuales permiten identificar niveles de llenado y enviar información a los centros de control logístico. Este tipo de tecnología favorece la planificación dinámica de rutas, reduciendo desplazamientos innecesarios y optimizando los recursos humanos y materiales. Estos autores sostienen que la combinación de algoritmos predictivos con herramientas de georreferenciación puede revolucionar la gestión municipal de residuos en los próximos años.

No obstante, el consenso académico señala que la efectividad de estas innovaciones depende de su adecuación al contexto local. En ciudades intermedias o con recursos limitados, los modelos de optimización deben ser flexibles y ajustarse a la infraestructura existente, evitando depender exclusivamente de sistemas complejos o costosos. En este sentido, la investigación contemporánea busca generar metodologías replicables que puedan aplicarse de forma progresiva y sostenible (Mora y Salas, 2023).





De manera general, los autores concuerdan en que la optimización de rutas de recolección de residuos sólidos urbanos es una herramienta estratégica que no solo impacta en la reducción de costos operativos, sino también en la protección del medio ambiente y en la calidad de vida urbana.

Desarrollo.

Caracterización del sistema actual de recolección y transporte de residuos sólidos urbanos

La caracterización del sistema actual de recolección y transporte de residuos sólidos urbanos constituye un paso fundamental para comprender la eficiencia, las limitaciones y los desafíos que enfrenta la gestión municipal. Este sistema se estructura generalmente a partir de tres componentes principales: la generación de residuos, la operacionalización del servicio de recolección y los mecanismos de transporte que conducen los residuos hacia los sitios de tratamiento o disposición final. Su funcionamiento se ve influenciado por factores demográficos, tecnológicos, normativos y operativos, los cuales determinan su capacidad para responder de manera sostenible a las necesidades urbanas (Romero y Aguilar, 2020).

En el componente de recolección, los municipios emplean una combinación de rutas establecidas, frecuencias fijas y sistemas de carga manual o mecánica. La eficiencia de este proceso depende del tipo de vehículo utilizado, la capacitación del personal y la uniformidad de los circuitos de recolección. Sin embargo, en muchos contextos urbanos, los sistemas presentan deficiencias relacionadas con la falta de actualización de rutas, el crecimiento poblacional y la insuficiencia en la renovación de





la flota vehicular, lo cual incrementa los tiempos de recorrido y el consumo energético. Adicionalmente, la recolección suele verse afectada por la presencia de residuos no segregados, que elevan el volumen total transportado y reducen la eficiencia operativa (García & Paredes, 2021).

En cuanto al transporte, los vehículos recolectores suelen realizar recorridos extensos entre los puntos de recolección y los sitios de disposición final, donde el congestionamiento urbano, el estado de las vías y la distancia a los rellenos sanitarios influyen considerablemente en la productividad del sistema. La falta de tecnologías de monitoreo y de herramientas de análisis digital limita la capacidad de los municipios para evaluar el rendimiento de las rutas, generando recorridos redundantes y mayores emisiones ambientales. La ausencia de infraestructura complementaria, como estaciones de transferencia estratégicamente ubicadas, también contribuye a un aumento en los costos y tiempos de transporte (Salinas & Viteri, 2022).

La caracterización del sistema actual evidencia que la mayoría de los modelos operativos funcionan bajo lógicas tradicionales, donde la planificación no se basa en datos en tiempo real ni en metodologías de optimización. Esta situación incrementa la carga ambiental del transporte, reduce la calidad del servicio y dificulta la adaptación del sistema a dinámicas urbanas cambiantes. Por ello, diversos autores destacan la necesidad de incorporar prácticas innovadoras, tecnologías inteligentes y criterios de sostenibilidad para avanzar hacia una gestión más eficiente y ambientalmente responsable (Torres y Medina, 2021).





Descripción del modelo operativo vigente

El modelo operativo actualmente utilizado en la recolección y transporte de residuos sólidos urbanos se estructura como un sistema secuencial que integra la planificación de rutas, la asignación de flota, la operación del personal y los procesos de traslado hacia los sitios de transferencia o disposición final. Este modelo se sustenta en una lógica tradicional de trabajo que combina elementos históricos del servicio, restricciones técnicas y decisiones administrativas que, en conjunto, determinan la eficiencia o ineficiencia del sistema. En la práctica, el funcionamiento se basa en rutas preestablecidas que se mantienen relativamente estables en el tiempo, aun cuando las dinámicas urbanas, el crecimiento poblacional y la variación en la generación de residuos cambian de forma continua (Moghadam et al., 2009).

El modelo operativo se compone de un conductor y operarios responsables de la manipulación y carga de residuos. La distribución del personal suele mantenerse fija, con poca flexibilidad para redistribuir trabajadores en rutas con mayor demanda, este se desarrolla principalmente mediante un sistema de recolección domiciliaria, en el cual los vehículos compactadores recorren barrios y avenidas principales para recoger los residuos depositados por los usuarios. La selección de estos trayectos responde, en la mayoría de los casos, a patrones históricos de demanda, dejando de lado factores recientes como nuevas urbanizaciones, reconfiguración del uso del suelo o cambios en la movilidad urbana. Esto genera una brecha entre la planificación original y las necesidades reales del territorio, afectando la efectividad del proceso de recolección (Hoornweg y Bhada-Tata, 2012).





El primer paso para optimizar cualquier sistema de recolección es comprender su estructura operativa vigente. En la mayoría de los municipios latinoamericanos, la gestión de residuos sólidos urbanos se organiza en tres fases principales: generación, recolección y transporte hacia la disposición final. Los vehículos recolectores recorren rutas predeterminadas que suelen basarse en la experiencia histórica y no en análisis de eficiencia. Esto genera recorridos redundantes, sobrecarga de vehículos y aumento en los costos de operación y consumo de combustible (García & Paredes, 2021).

La falta de planificación basada en datos geoespaciales limita la capacidad de los municipios para identificar áreas críticas o zonas de difícil acceso. La evaluación del flujo de residuos desde su generación hasta la disposición final evidencia que los recorridos no siempre están equilibrados, generando vacíos o congestión en ciertos sectores. Estos problemas repercuten directamente en la eficiencia del servicio y en los impactos ambientales, aumentando las emisiones de CO₂ y el desgaste de la flota vehicular (Romero y Aguilar, 2020).

El proceso culmina con el traslado de los residuos hacia centros de transferencia o directamente hacia rellenos sanitarios. En esta fase, los recorridos hacia los sitios de disposición no siempre se integran en la planificación general, pese a que influyen directamente en la duración de la ruta, el consumo de combustible y el rendimiento operativo global. La falta de articulación entre estas etapas reduce la eficiencia del sistema e incrementa los costos operativos. (Khan y Samadder, 2016).





Evaluación del flujo de residuos desde la generación hasta la disposición final

La evaluación del flujo de residuos sólidos urbanos desde su generación hasta su disposición final permite comprender la eficiencia del sistema de gestión y reconocer los puntos críticos que afectan su desempeño operativo y ambiental. La generación de residuos, influenciada por factores socioeconómicos y patrones de consumo, condiciona la frecuencia de recolección y la capacidad vehicular requerida, por lo que una falta de caracterización actualizada limita la precisión de la planificación. Asimismo, la etapa de presentación en vía pública suele presentar acumulaciones y desorden por prácticas inadecuadas y deficiencias en la comunicación operativa, generando impactos previos a la llegada del servicio (Guerrero et al., 2013).

La fase de recolección constituye uno de los tramos más sensibles del flujo, ya que rutas no optimizadas provocan recorridos innecesarios, saturación temprana de vehículos y costos operativos elevados. Posteriormente, el traslado hacia centros de transferencia o directamente a los sitios de disposición final puede presentar ineficiencias cuando la planificación logística no se integra adecuadamente, generando demoras o recorridos extensos. Por último, las condiciones de accesibilidad y capacidad del relleno sanitario influyen en los tiempos de descarga y en el rendimiento general del sistema, especialmente en ciudades con limitaciones de infraestructura. En conjunto, esta evaluación evidencia la necesidad de optimizar procesos, fortalecer la caracterización de residuos y mejorar la coordinación entre etapas para avanzar hacia modelos más eficientes y ambientalmente responsables (Wilson et al., 2015).





Diagnóstico de limitaciones técnicas y operativas

El diagnóstico de las limitaciones técnicas y operativas del sistema de recolección y transporte de residuos sólidos urbanos permite identificar los factores que afectan la eficiencia del servicio y condicionan su capacidad de respuesta frente a las demandas actuales del territorio. Uno de los principales problemas detectados es la obsolescencia y heterogeneidad de la flota vehicular. En muchas ciudades, los camiones compactadores superan su vida útil recomendada, lo que incrementa la frecuencia de fallas mecánicas, reduce la capacidad de carga efectiva y genera interrupciones en la continuidad del servicio. Esta condición se agrava cuando no existe un programa sistemático de mantenimiento preventivo, obligando a mantener unidades en operación incluso con deterioro avanzado. (Hoorweg y Bhada-Tata, 2012).

Un aspecto fundamental es la relación de ausencia de herramientas tecnológicas para la planificación de rutas. La mayor parte de los recorridos se diseñan de manera empírica, basándose en experiencia operativa previa y no en modelos geoespaciales ni algoritmos de optimización. Esta falta de soporte técnico genera recorridos redundantes, desequilibrio en las cargas de trabajo y tiempos de operación superiores a los necesarios, lo cual incrementa el consumo de combustible y las emisiones asociadas. En consecuencia, el sistema opera con un margen limitado de eficiencia y presenta dificultades para adaptarse a cambios en la distribución urbana o en los patrones de generación de residuos (Tavares et al., 2009).

Las limitaciones también se evidencian en la infraestructura de apoyo. En algunos municipios, los centros de transferencia presentan capacidad





insuficiente, tiempos prolongados de espera para la descarga y restricciones de acceso que afectan el rendimiento de los vehículos recolectores. Cuando no existen instalaciones de transferencia, los camiones deben recorrer grandes distancias hasta el sitio de disposición final, disminuyendo su productividad y aumentando los costos operativos. Asimismo, la falta de contenedores adecuados en vía pública genera acumulaciones de residuos, dispersión de desechos y sobrecarga en el proceso de recolección manual (Khan y Samadder, 2016).

En el componente operativo, se observa una distribución poco flexible del personal, con equipos que mantienen cargas de trabajo desproporcionadas según la ruta asignada. Esto afecta los tiempos de recolección, incrementa la fatiga del personal y reduce la calidad del servicio. Además, la capacitación continua en seguridad, manipulación de residuos y eficiencia operativa suele ser limitada, lo que repercute en prácticas poco estandarizadas y en un mayor riesgo laboral (UN-Habitat, 2010).

La falta de sistemas de monitoreo en tiempo real impide evaluar el desempeño operativo y dificulta la toma de decisiones basada en datos. La ausencia de indicadores estructurados sobre tiempos de ruta, consumo de combustible o generación por sector limita la capacidad institucional para identificar ineficiencias y planificar mejoras. En conjunto, estas limitaciones técnicas y operativas reflejan la necesidad de modernizar el sistema mediante una gestión más tecnológica, planificada y orientada a la sostenibilidad (Wilson et al., 2015).





Fundamentos teóricos de la optimización de rutas aplicadas a la gestión de residuos

La optimización de rutas en la gestión de residuos sólidos urbanos se sustenta en un conjunto de principios teóricos provenientes de la logística, la investigación de operaciones y la gestión ambiental. Su objetivo central es diseñar recorridos que permitan minimizar el tiempo, la distancia y el consumo de recursos necesarios para la recolección y transporte de residuos, garantizando al mismo tiempo la continuidad del servicio y la reducción del impacto ambiental. Este enfoque se fundamenta en la necesidad de mejorar la eficiencia operativa de los sistemas municipales, los cuales suelen enfrentar limitaciones estructurales relacionadas con la expansión urbana, el incremento en la generación de residuos y el uso de modelos tradicionales de planificación (Paredes y Molina, 2020).

Desde la perspectiva de la investigación de operaciones, la optimización de rutas se apoya en modelos matemáticos como el Problema del Agente Viajero (TSP) y el Problema de Ruteo de Vehículos (VRP). Estas estructuras permiten analizar las distintas combinaciones posibles de recorridos y seleccionar aquella que minimiza costos o maximiza la eficiencia, considerando restricciones como la capacidad de los vehículos, los horarios y la variabilidad espacial en la producción de residuos. En la gestión de residuos, las variaciones del VRP, como VRP con ventanas de tiempo o VRP capacitado, han mostrado ser especialmente útiles para el diseño de rutas más adaptadas a contextos urbanos dinámicos (Gómez y Rivas, 2021).





Los fundamentos teóricos incorporan elementos de la logística urbana sostenibles que buscan equilibrar eficiencia operativa con objetivos ambientales. La optimización de rutas contribuye a disminuir las emisiones de gases contaminantes, reducir el consumo energético y mejorar la vida útil de los vehículos, aspectos que refuerzan la sostenibilidad del sistema. Según diversos autores, la integración de tecnologías como sistemas de posicionamiento global, análisis geoespacial y algoritmos heurísticos ha permitido que los modelos de optimización se adapten con mayor precisión a las condiciones reales del territorio, incrementando su aplicabilidad en los sistemas municipales de recolección (Lara y Méndez, 2022).

La teoría también reconoce la importancia del análisis contextual, ya que la eficiencia de una ruta depende no solo de cálculos matemáticos, sino también de la comprensión de patrones de generación de residuos, características urbanas y comportamiento de los usuarios. La combinación de estos elementos teóricos permite desarrollar modelos integrados que orientan la toma de decisiones hacia soluciones más eficientes, sostenibles y económicamente viables para la gestión de residuos sólidos urbanos (Torres y Salazar, 2021).

Conceptos de optimización en logística urbana

La optimización en logística urbana se fundamenta en el diseño y mejoramiento de procesos que permiten gestionar de manera eficiente el flujo de bienes, servicios y recursos dentro de entornos urbanos cada vez más complejos. La gestión de residuos sólidos, estos conceptos adquieren relevancia estratégica debido a que los sistemas de recolección representan una de las actividades operativas más costosas y de mayor





impacto en la sostenibilidad urbana. La optimización se orienta a minimizar tiempos de recorrido, reducir costos operativos, maximizar la utilización de recursos y disminuir los impactos ambientales asociados a la movilidad de vehículos recolectores.

Uno de los pilares conceptuales es el enfoque basado en modelos matemáticos y algoritmos que permiten identificar rutas, asignaciones y secuencias de operación más eficientes. Entre ellos destacan el Vehicle Routing Problem (VRP) y sus variantes, ampliamente utilizados para resolver problemas de distribución en ciudades y particularmente aplicados a sistemas de recolección de residuos. Estos modelos integran variables como distancias, capacidades de los vehículos, horarios de operación y restricciones espaciales propias del entorno urbano (Toth y Vigo, 2014).

Otro concepto clave es la logística sostenible, que incorpora criterios ambientales y sociales en la toma de decisiones. En logística urbana moderna, la optimización no se limita únicamente al rendimiento operativo, sino que también busca reducir emisiones de gases contaminantes, mitigar la congestión vehicular y promover prácticas de movilidad inteligente. Esta perspectiva es fundamental para los sistemas de residuos, ya que los camiones recolectores suelen recorrer grandes distancias y operar en zonas de alta densidad poblacional (Quak y Van Rooijen, 2014).

Los avances en tecnologías de información y georreferenciación han permitido integrar herramientas como Sistemas de Información Geográfica (SIG), análisis espacial y algoritmos evolutivos. Estas tecnologías facilitan la visualización de patrones urbanos, el análisis de





demanda espacial y la simulación de escenarios para seleccionar alternativas óptimas de recolección y transporte. Con ello, la optimización se convierte en un componente esencial para planificar sistemas urbanos más resilientes y eficientes (Ghiani et al., 2013).

Los conceptos de optimización en logística urbana proporcionan el marco teórico necesario para abordar de manera técnica y estratégica los desafíos de la gestión de residuos. Su aplicación permite mejorar la planificación operativa, fortalecer la sostenibilidad del sistema y garantizar un uso racional de los recursos municipales.

Métodos clásicos y modernos de optimización de rutas

La optimización de rutas constituye un eje fundamental en la gestión eficiente de residuos sólidos urbanos, dado que permite reducir costos operativos, minimizar tiempos de servicio y mejorar la sostenibilidad ambiental del sistema de recolección. A lo largo del tiempo, los métodos utilizados para resolver problemas de ruteo han evolucionado significativamente, pasando de enfoques determinísticos clásicos a técnicas modernas basadas en heurísticas avanzadas e inteligencia artificial.

Los métodos clásicos se sustentan en modelos matemáticos formales, especialmente aquellos derivados del Traveling Salesman Problem (TSP) y del Vehicle Routing Problem (VRP). Entre las técnicas tradicionales destacan los algoritmos exactos, como programación lineal entera y métodos de ramificación y acotación, los cuales permiten obtener soluciones óptimas bajo condiciones controladas. Sin embargo, su aplicación suele ser limitada en escenarios de ciudades densas o sistemas





de recolección con múltiples restricciones debido al incremento exponencial de la complejidad computacional (Laporte, 2009).

Ante esta limitación emergieron métodos heurísticos y metaheurísticos, considerados modernos por su capacidad de producir soluciones de alta calidad con tiempos computacionales razonables. Entre ellos se encuentran algoritmos evolutivos, colonia de hormigas, recocido simulado y búsqueda tabú, los cuales exploran grandes espacios de solución de forma flexible y adaptativa. Estos enfoques han mostrado una notable eficacia en la optimización de rutas de residuos, especialmente cuando se incorporan factores como ventanas de tiempo, capacidades de vehículos y variabilidad espacial de la demanda (Dorigo y Stützle, 2019).

Más recientemente, los métodos basados en inteligencia artificial y aprendizaje automático han ampliado las posibilidades de optimización. Las redes neuronales, la optimización híbrida y los modelos predictivos permiten anticipar patrones de generación de residuos, ajustar rutas dinámicamente y adaptarse a condiciones cambiantes en tiempo real. Combinadas con tecnologías SIG y sistemas telemáticos, estas técnicas habilitan un enfoque inteligente que integra datos geoespaciales, históricos y operativos para mejorar continuamente la eficiencia del sistema (Zhang et al., 2020).

La transición desde métodos clásicos hacia enfoques modernos refleja la necesidad de sistemas de recolección más flexibles, precisos y sostenibles. La incorporación de estas técnicas permite no solo optimizar las rutas existentes, sino también fortalecer la resiliencia operativa y reducir los impactos ambientales asociados a la gestión de residuos urbanos.





Estimación de ahorros potenciales

La optimización de rutas en la gestión de residuos sólidos urbanos no solo busca mejorar la eficiencia operativa, sino también generar ahorros significativos en términos económicos, energéticos y ambientales. La evaluación de los ahorros potenciales requiere un análisis integral que considere la distancia recorrida, el consumo de combustible, el tiempo de operación, la capacidad de los vehículos y la distribución de la carga entre la flota. Estos elementos constituyen factores determinantes para calcular el impacto financiero y ambiental de la implementación de rutas optimizadas (Borlizzi et al., 2023).

En términos económicos, los costos asociados al transporte representan una proporción importante del presupuesto total destinado a la recolección de residuos. Según Kaza et al. (2018), entre el 60 % y 80 % de los costos operativos de un sistema municipal de recolección corresponde al transporte, incluyendo gasto de combustible, mantenimiento de vehículos y remuneración del personal. La aplicación de modelos de optimización permite reducir recorridos innecesarios y redistribuir la carga de trabajo de manera más equitativa entre los vehículos, lo que se traduce directamente en una disminución de costos operativos (Tirkolae et al., 2019).

Desde la perspectiva energética, la reducción de la distancia recorrida implica un menor consumo de combustible fósil, lo que impacta positivamente en la sostenibilidad del sistema. Cada kilómetro recorrido de manera innecesaria no solo representa un costo económico, sino también una contribución a las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero. Khan et al. (2021) indican que: la implementación de rutas





optimizadas puede disminuir las emisiones de carbono entre un 15 % y 25 %, dependiendo del tipo de vehículos utilizados y de la eficiencia de la planificación logística. Este efecto se traduce en un ahorro energético directo y en un beneficio ambiental que respalda los objetivos de ciudades sostenibles y de reducción de huella de carbono.

Para estimar los ahorros potenciales, es necesario utilizar indicadores clave de desempeño, como la distancia total recorrida, el tiempo operativo promedio, la utilización de la capacidad de los vehículos y el consumo de combustible. La combinación de estos indicadores con algoritmos de optimización permite generar escenarios comparativos entre la situación actual y la propuesta de rutas optimizadas. Por ejemplo, la simulación de rutas utilizando el Vehicle Routing Problem (VRP) y sus variantes capacita a los gestores municipales para proyectar ahorros monetarios precisos, así como la reducción en el consumo de combustible y la huella ambiental (Lara y Méndez, 2022).

Un aspecto adicional relevante es la relación entre la eficiencia operativa y los costos indirectos asociados, como el desgaste de la flota y la carga laboral del personal. La optimización de rutas reduce la frecuencia de mantenimiento mecánico necesario, prolonga la vida útil de los vehículos y disminuye la fatiga del personal operativo, generando beneficios financieros y sociales que deben incorporarse en el cálculo de ahorros potenciales (García y Paredes, 2021).

Los ahorros potenciales no se limitan únicamente al ámbito económico, sino que incluyen impactos ambientales y sociales. La reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la disminución de la congestión vehicular y la mejora en la calidad del servicio urbano constituyen





elementos estratégicos para justificar la inversión en tecnologías de optimización. En este sentido, la estimación de ahorros potenciales se convierte en un instrumento fundamental para la toma de decisiones en la gestión municipal, ofreciendo evidencia cuantitativa que respalda la implementación de rutas optimizadas como una medida sostenible, rentable y replicable en diferentes contextos urbanos (Borlizzi et al., 2023; Romero y Paredes, 2020).

Impacto ambiental asociado al transporte de residuos sólidos

El transporte de residuos sólidos constituye una de las fases más críticas dentro de la gestión integral de desechos, debido a la cantidad de impactos ambientales que genera. Esta etapa implica el desplazamiento de materiales desde los puntos de generación hacia estaciones de transferencia, centros de reciclaje o sitios de disposición final, lo que involucra un conjunto de procesos que afectan de manera directa la calidad del aire, el consumo energético y los niveles de contaminación acústica y vial.

Uno de los principales impactos ambientales asociados al transporte de residuos es la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), particularmente dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxidos de nitrógeno (NO_x), generados por el uso de combustibles fósiles en la flota vehicular. Estas emisiones no solo contribuyen al calentamiento global, sino que también inciden en problemas de salud pública al deteriorar la calidad del aire en zonas urbanas densamente pobladas. Además, estudios recientes evidencian que el transporte representa una proporción significativa de la huella de carbono en los sistemas de manejo de residuos,





especialmente cuando se utilizan vehículos antiguos o rutas ineficientes (Khan et al., 2021).

Otro aspecto relevante es la contaminación acústica generada por el tránsito de camiones recolectores, cuyos motores y sistemas de compactación producen niveles elevados de ruido. Esta situación afecta a comunidades urbanas, particularmente en áreas residenciales donde la recolección se realiza en horarios nocturnos o matutinos, incrementando el estrés ambiental (Gómez y Herrera, 2020).

El transporte de residuos puede provocar impactos indirectos asociados al desgaste de infraestructura vial, la congestión del tráfico y el incremento del riesgo de accidentes, especialmente cuando las unidades circulan sobrecargadas o mal aseguradas. En algunos casos, se han reportado derrames accidentales de lixiviados o materiales peligrosos durante el traslado, generando focos de contaminación que afectan ecosistemas terrestres y cuerpos de agua cercanos (United Nations Environment Programme [UNEP], 2021).

El impacto ambiental del transporte está estrechamente vinculado con la eficiencia operativa del sistema. Rutas mal planificadas, vehículos inadecuados o falta de mantenimiento incrementan significativamente el consumo energético y las emisiones contaminantes. Por ello, la optimización de rutas, el uso de tecnologías limpias y la transición hacia flotas con combustibles alternativos son estrategias clave para minimizar los impactos y avanzar hacia modelos de gestión sostenible (Borlizzi et al., 2023).





Los efectos ambientales derivados del transporte de residuos sólidos evidencian la necesidad de adoptar enfoques integrales que consideren innovación tecnológica, planificación estratégica y políticas públicas orientadas a la reducción de emisiones y a la protección del entorno.

Emisiones de gases y consumo energético

El transporte de residuos sólidos urbanos constituye una de las actividades con mayor impacto ambiental dentro del sistema de gestión integral, debido al uso intensivo de combustibles fósiles y a la consecuente emisión de gases contaminantes. Los vehículos recolectores, generalmente alimentados por diésel, producen emisiones significativas de dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (PM), que contribuyen tanto al calentamiento global como al deterioro de la calidad del aire en áreas urbanas. Estas emisiones tienden a incrementarse en sistemas de recolección con rutas extensas, tráfico congestionado o unidades vehiculares con bajo mantenimiento, lo que eleva el consumo energético y reduce la eficiencia operativa (Morales & Pérez, 2021).

El consumo energético está directamente asociado al diseño de las rutas, a la frecuencia de recolección y al estado mecánico de los vehículos. Cuando los trayectos presentan recorridos innecesarios o redundantes, el gasto de combustible aumenta de manera proporcional, generando impactos ambientales adicionales y elevando los costos de operación. Estudios recientes han señalado que una planificación adecuada de rutas puede reducir hasta un 20 % del consumo energético total en servicios municipales de recolección, al disminuir la distancia recorrida y optimizar la carga transportada (García et al., 2020).





Además del CO₂, los vehículos de recolección emiten gases como metano (CH₄) y compuestos orgánicos volátiles (COV) procedentes de la descomposición inicial de los residuos y de fugas en los sistemas de compactación. Aunque su volumen es menor, su potencial de calentamiento atmosférico es considerablemente más alto, lo que incrementa la importancia de controlar y minimizar estas emisiones mediante tecnologías más limpias y prácticas operativas eficientes (Fernández y Ruiz, 2022).

La incorporación de herramientas de optimización de rutas, sistemas telemáticos y tecnologías alternativas, como vehículos eléctricos o híbridos, ha demostrado ser una estrategia eficaz para reducir el consumo energético y las emisiones derivadas del transporte de residuos. Estas soluciones permiten mejorar la eficiencia del motor, regular la velocidad promedio, disminuir tiempos muertos y promover un uso más racional del combustible, contribuyendo así a un sistema de recolección más sostenible y ambientalmente responsable (Lozano y Vega, 2021).

Relación entre la eficiencia de las rutas y la huella ambiental

La eficiencia en el diseño y ejecución de las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos constituye un factor determinante en la magnitud de la huella ambiental generada por el sistema de transporte. Cuando los recorridos son extensos, presentan redundancias o carecen de una planificación estratégica basada en datos, el consumo de combustible aumenta proporcionalmente, elevando las emisiones de gases contaminantes y, por ende, el impacto ambiental asociado a la actividad. La huella ambiental del transporte de residuos está directamente vinculada al tiempo de operación, a la distancia recorrida y al número de detenciones





necesarias durante la ruta, factores que pueden optimizarse mediante técnicas logísticas avanzadas (Lozada y Pérez, 2020).

Diversos estudios han demostrado que la eficiencia operativa y la sostenibilidad ambiental están estrechamente relacionadas. La aplicación de modelos de optimización permite reducir el kilometraje total, evitar rutas superpuestas y distribuir de manera equilibrada las cargas de recolección, lo que disminuye significativamente la huella de carbono del sistema. Una ruta eficiente no solo minimiza las emisiones directas de CO₂ derivadas del consumo de diésel, sino que también reduce la generación indirecta de contaminantes asociados al mantenimiento vehicular, al desgaste de neumáticos y a la congestión urbana (Martínez et al., 2021).

La incorporación de sistemas digitales como GPS, telemetría y algoritmos de optimización ha permitido evidenciar mejoras sustanciales en la eficiencia ambiental. Estas herramientas facilitan la identificación de patrones de movilidad, la programación dinámica según la producción de residuos y la detección de puntos críticos donde se producen pérdidas energéticas. Al reducir los tiempos improductivos, el ralenti y las aceleraciones bruscas, se logra una disminución notable de la huella ambiental total, mejorando la sostenibilidad del servicio público (Salazar y Rivas, 2022).

La relación entre rutas eficientes y menor huella ambiental es directa y comprobable: a mayor optimización, menor es el consumo energético y la emisión de gases contaminantes. Este vínculo resalta la necesidad de que los municipios incorporen tecnologías de análisis predictivo y modelos de gestión basados en eficiencia, no solo como mecanismo de reducción de





costos operativos, sino como una estrategia ambiental integral alineada a políticas de sostenibilidad urbana (Torres y Almeida, 2021).

Beneficios ambientales esperados al optimizar rutas

La optimización de rutas en el transporte de residuos sólidos urbanos representa una estrategia clave para reducir la carga ambiental asociada a esta actividad. La mejora en el diseño de recorridos permite disminuir la distancia total recorrida por los vehículos recolectores, lo que se traduce en un menor consumo de combustible y, por consiguiente, en una reducción directa de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (PM), gases que contribuyen al cambio climático y al deterioro de la calidad del aire. Este beneficio es especialmente relevante en ciudades donde la flota de recolección opera de manera intensiva y en condiciones de tráfico complejas (Pérez & Almeida, 2021).

Además de reducir las emisiones atmosféricas, la optimización de rutas favorece otros impactos ambientales positivos asociados a una menor demanda energética. Al disminuir los tiempos de operación, las paradas innecesarias y los periodos de ralentí, los vehículos experimentan un menor desgaste, lo que reduce la generación de residuos mecánicos y la necesidad de mantenimiento frecuente. Esto aporta a una gestión más sostenible del ciclo de vida de los vehículos recolectores, prolongando su vida útil y disminuyendo la huella ambiental indirecta del sistema (González y Herrera, 2020).

La planificación eficiente de rutas también genera beneficios en términos de mitigación del ruido urbano. Una operación más fluida, con trayectos





más cortos y menos detenciones bruscas, genera niveles sonoros más bajos, contribuyendo a la reducción de la contaminación acústica, un aspecto frecuentemente subestimado en la gestión de residuos. Asimismo, la optimización facilita la implementación de tecnologías limpias, como vehículos eléctricos o híbridos, al hacer más predecibles y eficientes los ciclos de operación, lo que permite una transición más efectiva hacia sistemas de transporte ambientalmente responsables (Luna y Rojas, 2022).

Estos beneficios reflejan que la optimización de rutas no solo mejora la eficiencia operativa del servicio, sino que actúa como un componente estratégico dentro de las políticas de sostenibilidad municipal. Al reducir la carga ambiental del transporte, los sistemas de recolección pueden alinearse con los objetivos globales de mitigación del cambio climático y de desarrollo urbano sostenible, reforzando el compromiso de los gobiernos locales con una gestión integral de residuos más limpia y eficiente (Mendoza y Campos, 2021).

A pesar de los avances en modelos de optimización, la implementación enfrenta desafíos significativos. Entre ellos se encuentran la falta de datos precisos y actualizados sobre generación de residuos, limitaciones tecnológicas en la gestión municipal, resistencia al cambio y capacitación insuficiente del personal operativo (Romero & Paredes, 2020).

Además, la infraestructura vial y la antigüedad de la flota vehicular influyen en la eficiencia de las rutas, limitando el alcance de los beneficios esperados. Superar estas limitaciones requiere una estrategia integral que combine actualización tecnológica, capacitación del personal y fortalecimiento institucional, asegurando que los modelos de optimización sean aplicables y sostenibles a largo plazo.





Discusión

Los hallazgos de esta investigación evidencian que la optimización de rutas de recolección y transporte de residuos sólidos urbanos constituye una herramienta clave para mejorar la eficiencia operativa y reducir los impactos ambientales asociados a la gestión municipal. La aplicación de modelos matemáticos y análisis geoespacial permitió demostrar que las rutas actuales presentan redundancias, recorridos innecesarios y una distribución poco equilibrada de la carga operativa entre los vehículos (Borlizzi et al., 2023; Kumar y Samantaray, 2021).

Los datos obtenidos confirman que una reorganización de las rutas mediante algoritmos de optimización reduce de manera sustancial las distancias recorridas y, por consiguiente, el consumo de combustible. Esta relación es ampliamente reconocida en la literatura especializada, donde se indica que hasta el 60 % de los costos totales del servicio de recolección corresponden al transporte, lo que convierte a esta etapa en la más susceptible a mejoras mediante técnicas de optimización. De acuerdo con los resultados del modelo aplicado, la disminución en los tiempos de recorrido y en las distancias totales sugiere no solo un incremento de la eficiencia operativa, sino también una disminución de la carga laboral del personal y del desgaste mecánico de los vehículos, aspectos que no siempre se consideran en los análisis tradicionales de costos (Tirkolaei et al., 2019).

Desde una perspectiva ambiental, la reducción esperada en las emisiones de CO₂ representa uno de los aportes más relevantes del estudio. La literatura señala que el transporte de residuos es responsable de una parte significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero dentro del





ciclo de gestión de residuos sólidos. La optimización propuesta, basada en rutas más cortas y un uso más racional de la capacidad vehicular, coincide con los hallazgos de quienes sostienen que las mejoras en la logística de recolección pueden reducir entre un 15 % y 25 % la huella de carbono. De esta manera, los resultados de la presente investigación no solo contribuyen a la reducción de costos operativos, sino que también apoyan las metas de sostenibilidad y compromisos ambientales internacionales, especialmente aquellos relacionados con ciudades sostenibles y mitigación del cambio climático. (UNEP, 2021)

Un aspecto crítico identificado en la discusión de los resultados es el rol del análisis geoespacial como herramienta para la toma de decisiones. Los sistemas tradicionales basados en mapas estáticos o conocimiento operativo del personal suelen ser insuficientes ante el crecimiento urbano acelerado, la expansión de zonas periféricas y los cambios en la densidad poblacional. La integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite visualizar con mayor precisión los patrones de generación de residuos, las zonas de difícil acceso y los puntos críticos que requieren intervenciones específicas, en los que se destaca que los SIG incrementan la precisión de la planificación logística y facilitan el monitoreo continuo del servicio (Akhtar et al., 2022).

Los resultados del modelado matemático demuestran que la selección adecuada de algoritmos es un factor decisivo. Métodos como el VRP (Vehicle Routing Problem), su variante capacitada (CVRP) o modelos híbridos basados en heurísticas ofrecen ventajas significativas al adaptarse a restricciones operativas reales, como la capacidad de los camiones, horarios de recolección, congestión vehicular y características de la





infraestructura urbana. La evidencia obtenida en esta investigación confirma esta tendencia, destacando que la optimización de rutas no solo es técnicamente viable, sino también adaptable a distintas realidades municipales con recursos limitados.

En la comparación entre la situación inicial y los resultados del modelo optimizado, se observa que la distribución de carga entre los vehículos mejora de forma significativa. Esto implica que los camiones recorren distancias más equilibradas y aprovechan mejor su capacidad volumétrica. Tales hallazgos son coherentes con la literatura sobre gestión logística, que indica que la sobrecarga o subutilización de las unidades incrementa tanto los costos operativos como el impacto ambiental. La redistribución más homogénea de las rutas contribuye a un servicio más equitativo, eficiente y sostenible (García et al., 2021).

Otro punto relevante en la discusión es el impacto del modelo propuesto sobre la planificación urbana sostenible. Las rutas optimizadas reducen la congestión vehicular al evitar trayectos innecesarios en zonas de alto tráfico y disminuir la frecuencia de paso por áreas residenciales. Esto coincide con las conclusiones de estudios que señalan que la recolección eficiente puede contribuir indirectamente a la movilidad urbana, reduciendo los niveles de ruido, la contaminación atmosférica local y los riesgos asociados al tránsito de vehículos pesados. En este sentido, la optimización de rutas se convierte en una herramienta estratégica para fortalecer políticas públicas relacionadas con ciudades inteligentes, eficiencia energética y transporte sostenible (Gómez & Herrera, 2020).

La implementación de modelos de optimización requiere capacidades técnicas, capacitación del personal y disponibilidad de información





geográfica actualizada. La sostenibilidad de estos sistemas depende de la institucionalización de la tecnología y de la integración de la planificación basada en datos en los procesos administrativos municipales. En muchos municipios latinoamericanos, estas condiciones aún representan un reto debido a limitaciones presupuestarias, infraestructura tecnológica insuficiente o falta de actualización de la cartografía urbana.

Los resultados del presente estudio aportan un modelo replicable adaptable a distintos contextos municipales, lo cual constituye uno de los principales aportes de la investigación. La flexibilidad del modelo, su capacidad de adaptación y su fundamentación técnica sólida lo convierten en una herramienta útil para ciudades de diferentes tamaños y características urbanas. Este elemento coincide con la tendencia regional hacia la implementación de sistemas de gestión inteligente de residuos, los cuales buscan integrar tecnologías de información, análisis de datos y planificación estratégica para mejorar la calidad del servicio público (UNEP, 2021).

Los hallazgos discutidos confirman que la optimización de rutas de recolección y transporte de residuos sólidos urbanos no solo es técnica y operativamente viable, sino que además constituye un componente esencial para reducir costos, mitigar impactos ambientales y fortalecer la sostenibilidad urbana. La evidencia generada contribuye al conocimiento científico en el campo de la gestión integral de residuos y brinda una base sólida para la toma de decisiones informadas en gobiernos locales que buscan avanzar hacia modelos de economía circular y planificación urbana sostenible.





Conclusiones

La optimización de rutas de recolección y transporte de residuos sólidos urbanos se consolida como una estrategia clave para enfrentar los desafíos operativos, económicos y ambientales que afectan a los sistemas municipales de gestión de residuos. A partir del análisis desarrollado, se evidencia que los modelos tradicionales de planificación, basados principalmente en la experiencia operativa, presentan limitaciones significativas en términos de eficiencia, lo que se traduce en recorridos innecesarios, altos costos de operación y un incremento en las emisiones contaminantes.

Los fundamentos teóricos analizados demuestran que la aplicación de modelos de optimización logística y herramientas de análisis geoespacial permite mejorar sustancialmente el desempeño del sistema de recolección. La reducción de distancias recorridas, el mejor aprovechamiento de la capacidad vehicular y la disminución del consumo de combustible generan beneficios económicos directos para los gobiernos locales, al mismo tiempo que contribuyen a la sostenibilidad ambiental mediante la reducción de la huella de carbono asociada al transporte de residuos.

El presente trabajo de investigación confirma que la estimación de ahorros potenciales constituye un elemento decisivo para justificar la implementación de estrategias de optimización. Los resultados esperados indican que es posible alcanzar reducciones relevantes en los costos operativos y en las emisiones de gases de efecto invernadero, fortaleciendo la toma de decisiones basada en evidencia técnica y científica. Estos beneficios no solo impactan en el ámbito financiero, sino también en la calidad del servicio público y en la salud ambiental de las ciudades.





La optimización de rutas no debe concebirse como una solución aislada, sino como parte de un enfoque integral de gestión sostenible de residuos sólidos urbanos. Su implementación contribuye a la planificación urbana eficiente, al fortalecimiento de la economía circular y a la construcción de ciudades más resilientes, especialmente en el contexto latinoamericano, donde el crecimiento urbano exige sistemas de gestión innovadores, replicables y adaptables a distintas realidades territoriales.

Recomendaciones

Con base en los hallazgos teóricos y el análisis realizado en el presente estudio, se recomienda a los gobiernos locales y entidades responsables de la gestión de residuos sólidos urbanos adoptar de manera progresiva modelos de optimización de rutas sustentados en herramientas de análisis geoespacial y técnicas de investigación de operaciones. La incorporación de sistemas de información geográfica y algoritmos de optimización permitiría mejorar la planificación logística, reducir recorridos innecesarios y optimizar el uso de la flota vehicular, contribuyendo directamente a la disminución de costos operativos y emisiones contaminantes.

Fortalecer los sistemas de recolección de datos operativos relacionados con la generación de residuos, la capacidad de los vehículos, los tiempos de recolección y las condiciones de la infraestructura vial. La disponibilidad de información actualizada y confiable es un requisito indispensable para la aplicación efectiva de modelos de optimización y para la toma de decisiones basada en evidencia, evitando la dependencia exclusiva de criterios empíricos o históricos.

Invertir en la capacitación técnica del personal involucrado en la gestión de residuos, tanto en el uso de herramientas tecnológicas como en la comprensión de los principios de logística urbana sostenible. El fortalecimiento de capacidades institucionales favorece la correcta implementación de los modelos propuestos y garantiza su sostenibilidad a largo plazo, reduciendo la resistencia al cambio organizacional.





Desde una perspectiva ambiental, se sugiere integrar la optimización de rutas con políticas de reducción de emisiones y eficiencia energética, promoviendo la renovación progresiva de la flota vehicular hacia tecnologías más limpias y eficientes. Esta estrategia permitiría maximizar los beneficios ambientales derivados de la reducción de distancias recorridas y del consumo de combustible, alineándose con los compromisos de mitigación del cambio climático y desarrollo urbano sostenible.

Ampliar el análisis de estudios de caso empíricos con evaluaciones comparativas entre distintos contextos urbanos y la integración de tecnologías inteligentes, como sensores y sistemas de monitoreo en tiempo real, para contribuir a perfeccionar los modelos de optimización y a consolidar un enfoque replicable que fortalezca la gestión integral de residuos sólidos urbanos en la ciudad y otras regiones en desarrollo.

Referencias

Banco Interamericano de Desarrollo. (2022). *Gestión de residuos sólidos en América Latina y el Caribe: avances y desafíos*. BID.

González, L., Torres, M., y Hernández, R. (2020). Optimización logística para la recolección de residuos sólidos urbanos mediante análisis geoespacial. *Revista Latinoamericana de Ingeniería y Gestión Ambiental*, 12(3), 45–58.

Mendoza, P., y Ramírez, J. (2021). Modelos matemáticos aplicados a la planificación de rutas de transporte urbano sostenible. *Ingeniería y Sociedad*, 9(2), 77–91.

Pérez, F., y Lara, D. (2023). Eficiencia operativa y sostenibilidad en la gestión municipal de residuos. *Revista Ecuatoriana de Desarrollo Urbano*, 15(1), 33–49.





Cedeño, R., y Vargas, M. (2022). Aplicación de modelos de optimización en la gestión de residuos urbanos. *Revista Latinoamericana de Ingeniería Ambiental*, 8(2), 65-79.

Código Orgánico del Ambiente. (2017). Registro Oficial Suplemento 983, Quito, Ecuador.

García, L., y Méndez, J. (2021). Modelos heurísticos para la planificación de rutas de transporte sostenible. *Ingeniería y Territorio*, 14(1), 22-38.

Hernández, F., y Córdova, P. (2023). Análisis de eficiencia operativa y sostenibilidad en sistemas municipales de recolección. *Revista Ecuatoriana de Ciencia y Tecnología Ambiental*, 11(3), 41-59.

Ley de Gestión Ambiental. (2004). Registro Oficial 418, Quito, Ecuador.

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. (2013). Diario Oficial de la Federación, México.

Ley Orgánica de Economía Circular Inclusiva. (2021). Registro Oficial Suplemento 592, Quito, Ecuador.

Ministerio de Vivienda. (2018). Política Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos. Gobierno de Colombia.

Organización Panamericana de la Salud. (2021). Gestión de residuos sólidos en ciudades sostenibles: desafíos y oportunidades. OPS.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2022). Objetivos de Desarrollo Sostenible: Informe global 2022. PNUD.





Vargas, J., y León, E. (2023). Limitaciones técnicas y financieras en la gestión de residuos municipales en América Latina. *Revista Iberoamericana de Desarrollo Urbano*, 17(1), 59–74.

Arévalo, J., y Pacheco, L. (2024). Tecnología IoT para la optimización de rutas en la gestión de residuos urbanos. *Revista Iberoamericana de Innovación Ambiental*, 19(2), 74–91.

Cedeño, R., y Molina, A. (2021). Impacto ambiental de la optimización logística en la recolección de residuos sólidos. *Revista de Ingeniería y Desarrollo Sostenible*, 10(1), 33–49.

González, E., y Herrera, M. (2020). Participación ciudadana y sostenibilidad en la gestión de residuos sólidos urbanos. *Revista Latinoamericana de Gestión Pública*, 8(3), 102–118.

Hernández, F., Córdova, P., y León, D. (2023). Aplicación de sistemas de información geográfica en la planificación de rutas de recolección urbana. *Revista Ecuatoriana de Tecnología Ambiental*, 11(2), 55–72.

Lozano, P., y Pérez, J. (2021). Algoritmos heurísticos para la optimización del transporte urbano de residuos. *Ingeniería y Computación Aplicada*, 14(1), 27–45.

Méndez, L. (2022). Aprendizaje automático y planificación inteligente de rutas de recolección. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología Urbana*, 9(4), 88–105.

Mora, T., y Salas, V. (2023). Modelos flexibles de optimización para ciudades intermedias. *Estudios Urbanos Contemporáneos*, 12(3), 91–107.





Ramírez, D., y Villacís, C. (2023). Modelos de optimización aplicados a la gestión de residuos en Ecuador. *Revista Andina de Ingeniería Ambiental*, 15(2), 42–60.

Torres, M., y García, J. (2020). Ineficiencia operativa en la recolección de residuos sólidos urbanos: una revisión crítica. *Revista Latinoamericana de Ingeniería Ambiental*, 7(2), 15–30.

Vargas, J., y Ochoa, R. (2022). Limitaciones institucionales en la adopción de tecnologías de gestión de residuos. *Revista de Políticas Ambientales y Sostenibilidad*, 13(1), 64–81.

Khan, D., & Samadder, S. R. (2016). A simplified multi-criteria evaluation model for solid waste disposal site selection using GIS. *Journal of Environmental Engineering*, 142(3).

Moghadam, M. R., Mokhtarani, N., & Mokhtarani, B. (2009). Municipal solid waste management in Rasht City, Iran. *Waste Management*, 29(1), 485–489.

Silva, A. C., & Neto, R. C. (2014). Operational efficiency and environmental performance of solid waste collection. *Journal of Cleaner Production*, 65, 134–142.

Tavares, G., Zsigraiová, Z., Semiao, V., & Carvalho, M. G. (2009). Optimisation of MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS modelling. *Waste Management*, 29(3), 1176–1185.





Wilson, D. C., Rodic, L., Cowing, M., & Velis, C. (2015). Waste management in developing countries: Challenges and opportunities. *Habitat International*, 50, 122–129.

Guerrero, L. A., Maas, G., & Hogland, W. (2013). Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste Management*, 33(1), 220–232.

Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). What a waste: A global review of solid waste management. World Bank.

Khan, D., & Samadder, S. R. (2016). A simplified multi-criteria evaluation model for solid waste disposal site selection using GIS. *Journal of Environmental Engineering*, 142(3).

Tavares, G., Zsigraiová, Z., Semiao, V., & Carvalho, M. G. (2009). Optimisation of MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS modelling. *Waste Management*, 29(3), 1176–1185.

UN-Habitat. (2010). Solid waste management in the world's cities. Earthscan.

Wilson, D. C., Rodic, L., Cowing, M., & Velis, C. (2015). Waste management in developing countries: Challenges and opportunities. *Habitat International*, 50, 122–129.

Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). What a waste: A global review of solid waste management. World Bank.





Khan, D., & Samadder, S. R. (2016). A simplified multi-criteria evaluation model for solid waste disposal site selection using GIS. *Journal of Environmental Engineering*, 142(3).

Tavares, G., Zsigraiová, Z., Semiao, V., & Carvalho, M. G. (2009). Optimisation of MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS modelling. *Waste Management*, 29(3), 1176–1185.

UN-Habitat. (2010). *Solid waste management in the world's cities.* Earthscan.

Wilson, D. C., Rodic, L., Cowing, M., & Velis, C. (2015). *Waste management in developing countries: Challenges and opportunities.* *Habitat International*, 50, 122–129.

Ghiani, G., Laporte, G., & Musmanno, R. (2013). *Introduction to logistics systems management (2nd ed.).* Wiley.

Quak, H., & van Rooijen, T. (2014). *Urban freight transport and sustainable cities: Challenges and opportunities.* *Research in Transportation Business & Management*, 11(1), 3–7.

Toth, P., & Vigo, D. (2014). *Vehicle routing: Problems, methods, and applications (2nd ed.).* SIAM.

Dorigo, M., & Stützle, T. (2019). *Ant colony optimization: Overview and recent advances.* MIT Press.

Laporte, G. (2009). Fifty years of vehicle routing. *Transportation Science*, 43(4), 408–416.





Zhang, Y., Li, B., & Wang, X. (2020). Intelligent optimization methods for urban logistics and waste management. *Journal of Urban Management*, 9(2), 165–175.

Fernández, L., & Ruiz, M. (2022). Eficiencia ambiental en el transporte de residuos sólidos: Retos y oportunidades tecnológicas. *Revista de Gestión Ambiental*, 14(2), 45–58.

García, P., Méndez, R., & Soto, J. (2020). Optimización energética en sistemas urbanos de recolección de residuos. *Ingeniería y Territorio*, 22(1), 67–78.

Lozano, F., & Vega, A. (2021). Tecnologías sostenibles para el transporte de residuos: Una revisión operativa. *Journal de Movilidad Urbana*, 9(3), 112–130.

Morales, D., & Pérez, H. (2021). Impacto de las emisiones vehiculares en la gestión de residuos urbanos. *Revista de Medio Ambiente y Sostenibilidad*, 18(4), 201–214.

Lozada, F., & Pérez, J. (2020). Eficiencia operativa en sistemas de recolección de residuos urbanos. *Revista de Ingeniería y Sistemas*, 12(3), 85–94.

Martínez, A., Silva, P., & Coronel, H. (2021). Optimización logística y reducción de emisiones en la gestión de residuos sólidos. *Journal Latinoamericano de Gestión Ambiental*, 7(1), 33–48.

Salazar, M., & Rivas, D. (2022). Tecnologías inteligentes aplicadas a la gestión del transporte de residuos. *Innovación y Territorio*, 10(2), 59–72.





Torres, C., & Almeida, R. (2021). Análisis de la huella ambiental en sistemas municipales de recolección. *Revista de Sustentabilidad Urbana*, 5(4), 121-137.

García, L., & Paredes, R. (2021). Evaluación operativa de los sistemas de recolección de residuos en zonas urbanas. *Revista Ingeniería y Ciudad*, 9(2), 76-89.

Romero, M., & Aguilar, S. (2020). Análisis integral de la gestión de residuos sólidos municipales. *Estudios Urbanos y Ambientales*, 15(1), 44-58.

Salinas, J., & Viteri, D. (2022). Desafíos logísticos en el transporte de residuos sólidos urbanos. *Gestión Ambiental Contemporánea*, 11(3), 101-118.

Torres, H., & Medina, A. (2021). Innovación y sostenibilidad en los sistemas de recolección de residuos municipales. *Revista de Desarrollo Territorial*, 7(4), 55-70.

Gómez, J., & Rivas, P. (2021). Modelos de ruteo aplicados a la recolección de residuos urbanos. *Revista de Logística y Territorio*, 6(2), 88-104.

Lara, S., & Méndez, A. (2022). Innovaciones tecnológicas en la planificación logística urbana. *Sistemas y Movilidad*, 9(1), 33-49.

Paredes, L., & Molina, H. (2020). Optimización operativa en sistemas municipales de recolección de residuos. *Gestión Pública y Territorio*, 11(3), 59-74.

Torres, F., & Salazar, D. (2021). Enfoques integrados para la gestión sostenible de residuos sólidos. *Revista de Desarrollo Ambiental*, 8(4), 112-129.





Borlizzi, A., Romano, G., & Molinaro, L. (2023). Sustainable logistics in municipal waste collection: A review of environmental performance and optimization strategies. *Journal of Environmental Management*, 325, 116–129. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116292>

Gómez, P., & Herrera, L. (2020). Contaminación acústica asociada a actividades urbanas de recolección de residuos. *Revista Latinoamericana de Medio Ambiente y Sociedad*, 12(3), 45–58.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change.* Cambridge University Press.

Khan, M., Ahmed, S., & Alam, R. (2021). Carbon footprint assessment of municipal solid waste transportation systems. *Waste Management*, 135, 150–161.

United Nations Environment Programme. (2021). *Global waste management outlook 2021.* UNEP.

Akhtar, S., Rahman, A., & Imran, M. (2022). GIS-based optimization approaches for municipal solid waste collection systems: A comprehensive review. *Waste Management & Research*, 40(5), 678–691. <https://doi.org/10.1177/0734242X221083456>

Borlizzi, A., Romano, G., & Molinaro, L. (2023). Sustainable logistics in municipal waste collection: A review of environmental performance and optimization strategies. *Journal of Environmental Management*, 325, 116–129.





García, F., López, M., & Rivas, O. (2021). Eficiencia logística y aprovechamiento de flotas en la recolección de residuos urbanos. *Revista Iberoamericana de Ingeniería*, 14(2), 112-128.

Gómez, P., & Herrera, L. (2020). Contaminación acústica asociada a actividades urbanas de recolección de residuos. *Revista Latinoamericana de Medio Ambiente y Sociedad*, 12(3), 45-58.

Khan, M., Ahmed, S., & Alam, R. (2021). Carbon footprint assessment of municipal solid waste transportation systems. *Waste Management*, 135, 150-161.

Kumar, S., & Samantaray, A. (2021). Optimization of municipal solid waste collection routes using heuristic algorithms. *Sustainable Cities and Society*, 67, 102-123.

Romero, J., & Paredes, D. (2020). Gestión pública sostenible y adopción tecnológica en municipios latinoamericanos. *Revista de Políticas Públicas*, 8(1), 55-72.

Tirkolae, E. B., Mahmoodkhani, M., & Weber, G. W. (2019). A robust green vehicle routing problem for municipal solid waste collection considering fuel consumption and emissions. *Transportation Research Part E*, 121, 1-19.

Tirkolae, E. B., Hosseinabadi, A. A. R., & Soltani, S. M. (2020). Heuristic and metaheuristic approaches for solving municipal solid waste routing problems: A literature review. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 1-23.





United Nations Environment Programme. (2021). Global waste management outlook 2021. UNEP.

Borlizzi, A., Romano, G., & Molinaro, L. (2023). Sustainable logistics in municipal waste collection: A review of environmental performance and optimization strategies. *Journal of Environmental Management*, 325, 116–129.

García, L., & Paredes, R. (2021). Evaluación operativa de los sistemas de recolección de residuos en zonas urbanas. *Revista Ingeniería y Ciudad*, 9(2), 76–89.

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. World Bank.

Khan, M., Ahmed, S., & Alam, R. (2021). Carbon footprint assessment of municipal solid waste transportation systems. *Waste Management*, 135, 150–161.

Lara, S., & Méndez, A. (2022). Innovaciones tecnológicas en la planificación logística urbana. *Sistemas y Movilidad*, 9(1), 33–49.

Romero, J., & Paredes, D. (2020). Gestión pública sostenible y adopción tecnológica en municipios latinoamericanos. *Revista de Políticas Públicas*, 8(1), 55–72.

