



Eficiencia ambiental en rutas de recolección de residuos sólidos con enfoque georreferenciado en La Troncal

Environmental efficiency in solid waste collection routes with a georeferenced approach in La Troncal


Eficiência ambiental em rotas de coleta de resíduos sólidos com abordagem georreferenciada em La Troncal

ARTÍCULO ORIGINAL




Escanea en tu dispositivo móvil o revisa este artículo en:

<https://doi.org/10.33996/revistaingenieria.v9i24.133>

Pedro Noboa-Romero¹ 
pnoboar@unemi.edu.ec

Natalia Tapia Malla² 
natalyrtm@hotmail.com

Juan Paredes-Quevedo¹ 
jparedesq@unemi.edu.ec

Frowen Valencia-Lucas² 
frowen.valencia@gmail.com

¹Universidad Estatal de Milagro, Milagro Guayas, Ecuador

²Unidad Educativa Antonio Ávila Maldonado, Cuenca, Ecuador

Artículo recibido 10 de enero 2025 / Aceptado 21 de abril 2025 / Publicado 17 de mayo 2025

RESUMEN

En el cantón La Troncal, Ecuador, la gestión de residuos sólidos ha presentado problemas significativos, como la limitada optimización en las rutas de recolección y la disposición inadecuada de los desechos, generando impactos negativos ambientales y sanitarios. Este estudio evalúa el proceso de recolección de residuos sólidos para proponer un modelo de gestión ambiental que optimice rutas y reduzca el impacto ambiental. Se utilizó metodología mixta, realizando diagnóstico detallado de la situación actual, análisis de parámetros físicos de residuos, y encuestando a 200 habitantes para evaluar su satisfacción con el servicio. Los resultados mostraron una producción per cápita de 0,70 kg/hab/día en zona urbana, 0,68 kg/hab/día en zona rural y 0,88 kg/hab/día industrial, con predominancia de residuos orgánicos (55%), metales (18,36%) y madera (14,13%). Se identificaron 14 rutas de recolección, optimizando 8 mediante técnicas georreferenciadas, reduciendo significativamente distancias y tiempos operativos.

Palabras clave: Optimización de rutas; Residuos sólidos urbanos; Sistemas de información geográfica; Eficiencia ambiental; Gestión de residuos

ABSTRACT

In the La Troncal canton of Ecuador, solid waste management has presented significant problems, such as limited optimization of collection routes and inadequate waste disposal, generating negative environmental and health impacts. This study evaluates the solid waste collection process to propose an environmental management model that optimizes routes and reduces environmental impact. A mixed methodology was used, conducting a detailed diagnosis of the current situation, analyzing physical waste parameters, and surveying 200 residents to assess their satisfaction with the service. The results showed a per capita production of 0.70 kg/inhabitant/day in urban areas, 0.68 kg/inhabitant/day in rural areas, and 0.88 kg/inhabitant/day in industrial areas, with a predominance of organic waste (55%), metals (18.36%), and wood (14.13%). Fourteen collection routes were identified, and 8 were optimized using georeferenced techniques, significantly reducing distances and operating times.

Key words: Route optimization; Municipal solid waste; Geographic information systems; Environmental efficiency; Waste management

RESUMO

No cantão de La Troncal, no Equador, a gestão de resíduos sólidos tem apresentado problemas significativos, como otimização limitada das rotas de coleta e descarte inadequado de resíduos, gerando impactos ambientais e de saúde negativos. Este estudo avalia o processo de coleta de resíduos sólidos para propor um modelo de gestão ambiental que otimize rotas e reduza o impacto ambiental. Foi utilizada uma metodologia mista, realizando um diagnóstico detalhado da situação atual, analisando parâmetros físicos de resíduos e entrevistando 200 moradores para avaliar sua satisfação com o serviço. Os resultados mostraram uma produção per capita de 0,70 kg/hab/dia na área urbana, 0,68 kg/hab/dia na área rural e 0,88 kg/hab/dia na área industrial, com predominância de resíduos orgânicos (55%), metais (18,36%) e madeira (14,13%). Foram identificadas quatorze rotas de coleta, otimizando oito delas por meio de técnicas de georreferenciamento, reduzindo significativamente as distâncias e os tempos de operação.

Palavras-chave: Otimização de rotas; Resíduos sólidos urbanos; Sistemas de informação geográfica; Eficiência ambiental; Gestão de resíduos

INTRODUCCIÓN

La recolección eficiente de residuos sólidos urbanos (RSU) es clave para una gestión ambiental y operativa sostenible. Estudios indican que su optimización se logra mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), algoritmos heurísticos y modelos en tiempo real, mejorando la planificación de rutas, reduciendo costos y minimizando la huella ambiental.

Uno de los enfoques más utilizados en la optimización de rutas es la combinación del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) con SIG, lo que permite considerar factores viales y humanos en la toma de decisiones, logrando una reducción significativa del consumo de combustible y las emisiones contaminantes (Salleh et al., 2016). En este sentido, Los SIG facilitan el mapeo en tiempo real y la adaptación a restricciones geográficas específicas, mientras que los métodos evolutivos ayudan a equilibrar la relación entre distancia recorrida y volumen recolectado.

Estudios aplicados han demostrado la efectividad de estos métodos en distintos contextos urbanos. Por ejemplo, Zainun et al. (2016) optimizaron el transporte de residuos en Kluang, Malasia, utilizando ArcGIS Network Analyst, lo que permitió reducir el consumo de combustible en 18% y 7,3% por día. De manera similar (Hina et al., 2020) implementaron un modelo en Islamabad y Rawalpindi, Pakistán, obteniendo reducciones del 18% y 9% en distancia recorrida y 22,6% y 13,3% en tiempos de recolección.

El uso de algoritmos heurísticos ha sido ampliamente explorado en la optimización del transporte de RSU. Liang et al. (2022) analizaron enfoques como algoritmos genéticos y colonia de hormigas, mientras que Akhtar et al. (2017) aplicaron el algoritmo BSA, logrando reducciones del 36,80% en la distancia recorrida, del 47,77% en costos y del 44,68% en emisiones de CO₂. En China, Hu et al. (2024) mejoraron la eficiencia con un algoritmo optimizado de colonia de hormigas, disminuyendo la distancia total en 19,76 km. Por su parte, Leerojanaprapa et al. (2024) implementaron cuatro enfoques distintos en Tailandia, logrando una reducción del 40,76% en la distancia recorrida.

El desarrollo de modelos matemáticos y de simulación también ha sido clave en la mejora de la eficiencia de la recolección de residuos. Hannan et al. (2020) desarrollaron un modelo MILP que incrementó la eficiencia en un 26,08%, redujo los costos operativos en un 44,44% y disminuyó las emisiones de carbono en un 17,60%. Además, Jose et al. (2023) demostraron que camiones de mayor capacidad puede mejorar significativamente la eficiencia del servicio.

Diferentes enfoques han sido aplicados a nivel global para optimizar el transporte de residuos. Bhagat & Dharmale (2023) utilizaron modelos VRPTW y SIG en India, mientras que Murillo et al. (2021) optimizaron la recolección en Ecuador, logrando reducciones del 29% en el tiempo y del 30% en la distancia recorrida. En Sudáfrica, Steyn & Willemse (2018) analizaron datos GPS

de 571 camiones para mejorar la eficiencia del servicio. Priyadarshi et al. (2023) desarrollaron un modelo dinámico en India, reduciendo la distancia recorrida en un 45%.

Además de la optimización de rutas, se ha explorado el impacto del uso de combustibles alternativos en la reducción de emisiones. Quintili & Castellani (2020) encontraron que el uso de gas natural comprimido aumentó las emisiones, mientras que la tecnología Stop-Start permitió reducirlas. Por otro lado, la sectorización municipal ha demostrado ser una estrategia efectiva para mejorar la eficiencia operativa (Ahmad et al., 2020), como lo evidencian los estudios de Rattanawai et al. (2024) en zonas montañosas de Tailandia.

Finalmente, diversas investigaciones han abordado la optimización del sistema de recolección desde una perspectiva integral. Sulemana et al. (2018) realizaron una revisión de los principales métodos empleados, mientras que Keček et al. (2024) aplicaron el Análisis Envolvente de Datos para evaluar la eficiencia de los sistemas de recolección. Li et al. (2024) identificaron brechas en modelos multiobjetivo, resaltando la necesidad de enfoques más completos.

Bulatov et al. (2021) propusieron modelos logísticos con análisis multicriterio, destacando la importancia de integrar dimensiones económicas, ambientales y sociales para alinearse con los objetivos de desarrollo sostenible Li et al. (2024), No obstante, aún persisten desafíos en la gestión de residuos diversos, lo que demanda

una investigación continua y el desarrollo de soluciones innovadoras.

MÉTODO

Esta investigación emplea una metodología mixta, combinando enfoques cuantitativos y cualitativos. Se diagnosticaron las rutas de recolección y barrido considerando producción per cápita, caracterización y densidad de residuos. Para evaluar la percepción ciudadana, se encuestó a 200 habitantes de La Troncal.

El análisis de muestras incluyó aspectos físicos, químicos y biológicos, permitiendo caracterizar residuos por propiedades y volúmenes, base para el rediseño de rutas. El estudio se desarrolló en dos fases: cálculo estadístico de la muestra y elaboración de instrumentos para recolectar datos en sectores críticos, identificando las categorías de residuos con mayor generación.

Optimización de la ruta de recolección de residuos sólidos

La recolección de residuos se organiza según la disponibilidad de recursos, sin requerir personal especializado. Mejorar su eficiencia exige analizar casos comparativos y adaptar buenas prácticas al contexto local. Factores como la densidad demográfica, la infraestructura vial deficiente y la variabilidad de residuos afectan su operatividad.

El servicio cubre ocho sectores en modalidad dual, recorriendo 50 km diarios, con asignaciones de 1,5 a 2 km por operario. El municipio opera

con cinco unidades: dos compactadores Hino y dos volquetas de 18 toneladas. La recolección se distribuye en seis rutas matutinas (5:00-13:00) y cinco vespertinas (13:00-21:00).

Diagramación de rutas y cuadrillas de recolección

El diseño de rutas de recolección es un proceso sistemático para optimizar tiempos y distancias operativas. Su implementación eficiente requiere considerar elementos clave como la ubicación del centro de operaciones, el sitio de disposición final, la direccionalidad vial, la cartografía del área de servicio y la tipología de trazados. Existen dos metodologías principales para el trazado de rutas:

- Trazado peine simple: permite la recolección bilateral en una sola trayectoria vial.
- Peine doble: implica al menos dos recolecciones diarias.

Estos criterios se aplican según las características de cada ruta, verificando métricamente las distancias recorridas y comparándolas con los trayectos actuales, considerando patrones de circulación y tráfico urbano.

La eficiencia operativa de las cuadrillas es un indicador clave de desempeño. Cada ruta debe definirse detalladamente, incluyendo todos los desplazamientos y actividades necesarias. El tiempo efectivo de recolección se calcula mediante una ecuación matemática.

La Ecuación 1 muestra el Tiempo Real (TR) de recolección se calcula mediante una ecuación que integra múltiples variables operativas en una jornada laboral estándar de 480 minutos. La fórmula considera tiempos auxiliares (T1 a T8) y la variable X (número de viajes), ajustando actividades recurrentes mediante el factor (X-1). Esta métrica permite evaluar con precisión la eficiencia operativa del servicio.

$$TR = \frac{[480 - (\sum T1+T2+T3+T4+T5+T6+T7+T8) + (X-1)(T3+T4+T5)]}{X} \quad (1)$$

Donde:

- TR: Tiempo Real de recolección
- T1-T8: Variables temporales de actividades auxiliares
- X: Número de viajes realizados
- (X-1) (T3+T4+T5): Factor de ajuste por actividades recurrentes

Método de cuarteo para la caracterización de los residuos sólidos.

La caracterización de residuos constituye un procedimiento analítico que permite clasificar componentes en fracciones diferenciadas. Este proceso metodológico determina las propiedades específicas de cada muestra y establece el potencial de reciclabilidad de los materiales mediante su segregación sistemática. El análisis resulta fundamental para implementar estrategias efectivas de gestión y valorización de residuos.

El protocolo de caracterización requiere la siguiente secuencia metodológica:

1. Descargar la muestra en un área despejada y ventilada.
2. Delimitar un círculo de 1-2 metros de diámetro, subdividido en cuadrantes equidistantes.
3. Seleccionar y pesar muestras hasta alcanzar 90 kg.
4. Abrir contenedores y disponer los residuos en el centro.
5. Distribuir homogéneamente el material en los cuadrantes con una herramienta de extensión.
6. Cuantificar los materiales segregados y comparar entre cuadrantes, asegurando que la variación respecto al peso inicial no supere los 2 kg.
7. Calcular valores promedio y determinar porcentajes por tipo de material.

Los resultados de este procedimiento se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Distribución de muestras.

Fuente de generación	Numero de muestras	Porcentaje
Urbano (viviendas)	131,5	50%
Rural	57,86	22%
Industrias	21,04	8%
Centros educativos	15,78	6%
Centros turísticos, hoteles y/o hosterías	13,15	5%
Mercados	10,52	4%
Hospitalarios	7,89	3%
Camal	5,26	2%
Total	263	100%

Área de estudio

La Troncal, actualmente cuenta con 82000 habitantes en la región centro-sur de Ecuador. La vivienda predominante es tipo villa (75%).

Producción per cápita

Para identificar esta variable, es necesario determinar el número de muestras a procesar. El muestreo se realizó durante seis días, excluyendo el primer día del cálculo debido a posibles inconsistencias, conforme a la guía metodológica para la gestión de residuos sólidos municipales. La Ecuación 2 muestra la producción per cápita.

$$PPC = \frac{W_t}{N_t} \quad (2)$$

Donde:

- PPC = Producción per cápita
- W_t = Peso en kilogramos de los residuos
- N_t = Número de habitantes

Finalizado el proceso de separación y pesaje de las muestras, se registran los datos para analizar los resultados obtenidos en los cinco días laborables. A partir de estos registros, se calcula el porcentaje de cada tipo de residuo utilizando la ecuación 3.

$$\text{Porcentaje} = \frac{P_i}{W_T} \quad (3)$$

Donde:

- P_i = Peso de los residuos dependiendo su clasificación
- W_t = Peso total de residuos

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Producción Per Cápita

- Zona Urbana: La producción per cápita en la zona urbana fue de 0,70 kg/hab/día.
- Zona Rural: En la zona rural, la producción per cápita fue de 0,68 kg/hab/día.
- Industrias: En el sector industrial, la producción per cápita fue de 0,88 kg/hab/día.

Composición de los Residuos

Para obtener esta información se realizó el procedimiento de caracterización de residuos. Se seleccionó este método debido a su simplicidad de aplicación y adecuación al volumen de residuos analizados. Los resultados se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición de los residuos.

Tipo de residuo	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	% Total
Papel	5,60 kg (5,17%)	5,90 kg (5,53%)	6,02 kg (5,15%)	6,03 kg (5,31%)	6,09 kg (5,71%)	5,87%
Orgánico	62,3 kg (57,54%)	58,96 kg (55,28%)	59,31 kg (50,76%)	61,56 kg (54,18%)	61,03 kg (57,32%)	54,93%
Madera	10,96 kg (10,12%)	15,96 kg (14,96%)	19,32 kg (16,53%)	21,04 kg (18,52%)	18,09 kg (16,99%)	14,13%
Vidrio	2,9 kg (2,68%)	3,98 kg (3,73%)	5,9 kg (5,05%)	6,03 kg (5,31%)	6,71 kg (6,30%)	5,62%
Metal	25,6 kg (23,64%)	19,96 kg (18,71%)	23,2 kg (19,85%)	18,32 kg (16,12%)	14,25 kg (13,38%)	18,36%
Baterías	0,9 kg (0,83%)	1,9 kg (1,78%)	2,09 kg (1,79%)	0,65 kg (0,57%)	0,10 kg (0,09%)	1,37%
Otros	0,018 kg (0,02%)	0 kg (0,00%)	1,009 kg (0,86%)	0,00 kg (0,00%)	0,20 kg (0,19%)	0,22%
Total	108,28 kg	106,66 kg	116,849 kg	113,63 kg	106,47 kg	100%

La Figura 1 muestra la evolución diaria en la cantidad de residuos sólidos generados en diferentes categorías a lo largo de cinco días de observación. Los residuos orgánicos predominan notablemente frente al resto de las categorías, manteniéndose relativamente constantes alrededor de los 60 kg diarios. En cuanto a otros residuos, como el vidrio y papel,

estos presentan cantidades significativamente menores, fluctuando alrededor de los 10 kg diarios. Asimismo, los residuos correspondientes a metales, madera, baterías y otros materiales muestran una generación mucho más baja y estable, por debajo de los 5 kg diarios durante el periodo analizado.

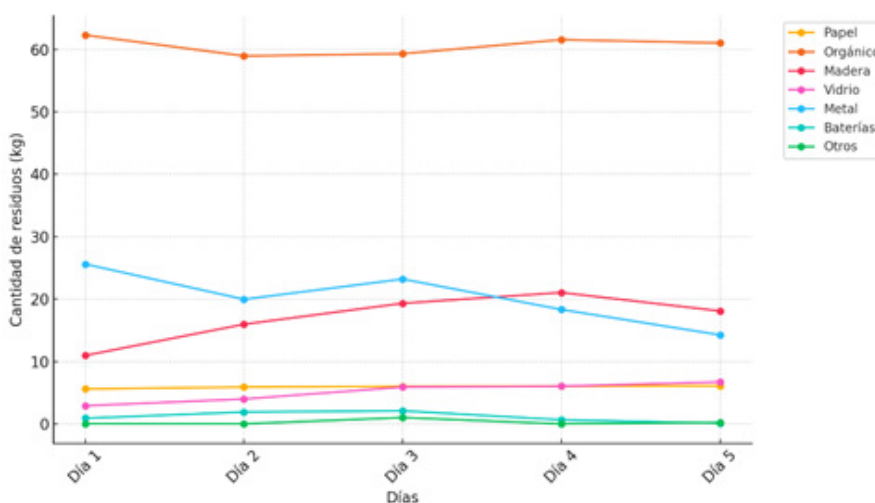


Figura 1. Evolución de residuos por tipo a lo largo del tiempo.

Rutas de Recolección

La Tabla 3 muestra 14 rutas de recolección, 8 optimizadas para mayor eficiencia. La Ruta 3 se redujo de 16,32 km a 15,1 km, disminuyendo significativamente el tiempo de recolección. Se utilizaron un cronómetro móvil y la aplicación MapFactor Navigator para el registro de datos.

La distancia recorrida no siempre determina el tiempo de recolección ni la cantidad de

residuos, como muestra la Tabla 3. La Ruta 2 es la más lenta debido a que pertenece exclusivamente al centro urbano, el tráfico y la cantidad de residuos genera ciertos retrasos además de ciertas maniobras, que se identificaron durante la toma de tiempos. Las rutas resaltadas con cada color las tomaremos en cuenta para otro parámetro.

Tabla 3. Tiempos de recolección durante el trabajo de campo.

Día	Tiempo	Distancia	Peso
Ruta-01	107 min	7 km	5930 kg
Ruta-02	109 min	10,68 km	6997 kg
Ruta-03	91 min	16.37 km	6001 kg
Ruta-04	99 min	7.09 km	5325 kg
Ruta-05	59 min	6 km	4523 kg
Ruta-06	111 min	8,1 km	7910 kg
Ruta-07	122 min	11,61 km	8930 kg
Ruta-08	140 min	14,5 km	7131 kg
Ruta-09	82 min	7,5 km	3931 kg
Ruta-10	98 min	10,92 km	7851 kg
Ruta-11	110 min	13,48 km	6930 kg
Ruta-12	78 min	7,15 km	5013 kg
Ruta-13	62 min	5,56 km	4770 kg
Ruta-14	49 min	6 km	3910 kg

Nota. La velocidad promedio del vehículo recolector es de 23,6 km/h.

Tiempo real de recolección

La Tabla 4 presenta el cálculo diario de recolección, considerando las rutas del sector

urbano, (T2) por ser las de mayor recorrido y volumen de generación de residuos.

Tabla 4. Tías de recolección.

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
T1	6	7	6	6	5
T2	107	109	91	99	111
T3	25	22	23	26	24
T4	7	7	6	7	8
T5	0	0	0	0	0
T6	23	22	23	23	21
T7	35	35	35	35	35
T8	40	50	30	25	30
X	1	1	1	1	1
TR	237	228	266	259	246

El tiempo promedio real de recolección fue de 247,2 minutos, con esta tabla identificamos claramente cuáles son los tiempos críticos durante el proceso de recolección, con lo que respecta a la variable T2 que es el tiempo empelado en la recolección, tiene un promedio 103.4 minutos, es el tiempo a reducir ya que durante la observación y la toma de tiempos se identificó ciertas anomalías en la operación, como la de hacer giros innecesarios, tiempos de espera a usuarios y en muchos casos la mala disposición de la basura por parte de la ciudadanía, esta y demás tareas que se dan en la operación y son actividades que no estaban programadas y que influyen en la efectividad del servicio. Las demás variables no influyen significativamente ya que son tiempos necesarios para la operación.

Rutas optimizadas

La información referente a los sectores y rutas de recolección y barrido fue proporcionada por el GAD Municipal del cantón La Troncal. A partir

de estos datos, se identificaron las zonas que requieren una optimización en los tiempos de recolección. Previamente, se realizó un estudio de tiempos, el cual evidenció que el proceso de recolección de residuos presenta demoras significativas. En consecuencia, se propone una reestructuración de algunos recorridos. Cabe señalar que ciertas rutas no presentan inconvenientes en cuanto a las maniobras ni al trayecto, por lo que no requerirán modificaciones. Es relevante considerar que el servicio de recolección no incluye escombros, materiales de construcción, barro ni madera; asimismo, las llantas deben ser depositadas en los centros de acopio ubicados en las ciudadelas.

A partir del diagnóstico de las rutas iniciales de recolección, se procedió a trazar nuevas rutas con el objetivo de optimizar los tiempos de recolección y mejorar la calidad del servicio prestado a la ciudadanía. Los mapas correspondientes a las nuevas rutas fueron elaborados mediante el software en línea GPX Studio, considerando

los tiempos registrados por los recolectores en las rutas analizadas. Estas rutas abarcan tanto el sector urbano como sus alrededores. Los mapas de los recorridos actuales fueron proporcionados por el GAD Municipal. Durante el estudio de campo, se identificaron varios factores que contribuyen a los retrasos en la recolección, entre ellos: maniobras innecesarias en ciertos sectores, generación excesiva de residuos por parte de algunos usuarios, y dispersión de residuos sólidos causada por animales o personas que buscan materiales reciclables. Este último grupo, aunque representa un porcentaje reducido

de la población, realiza esta actividad como una forma de subsistencia. Todos estos elementos, entre otros, constituyen las principales causas de las demoras en el proceso de recolección.

De las 14 rutas estudiadas hemos considerado prudente la intervención en 8, ya que son las que más tiempo se tardan en recorrer. En la Figura 2 se muestra la nueva ruta 1 que tiene 6,7 km de recorrido a comparación de la antigua ruta que tenía una distancia de 7 km esto se logró gracias a la identificación de giros que no aportaban a la efectividad de la recolección.

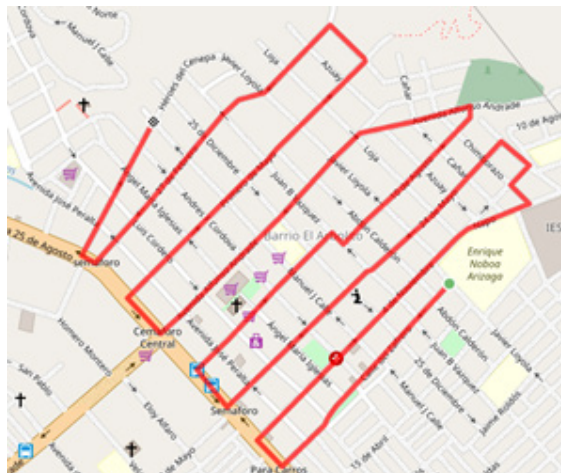


Figura 2. Ruta 1 optimizada.

La ruta 2 sin optimizar tenía 10,63 km de recorrido, la propuesta actual (Figura 3) propone un recorrido de 8,9 km lo que reducirá significativamente el tiempo de recolección ya que en la antigua ruta el recolector transitaba por

sectores en donde había solares vacíos, por lo que no es necesario pasar por dichas zonas la nueva propuesta tomo en cuenta este caso y redujo significativamente los metros de recorrido.

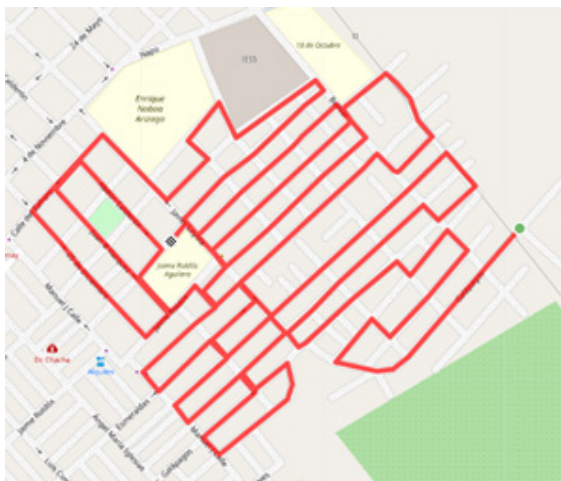


Figura 3. Ruta 2 optimizada.

Inicialmente el recorrido de la ruta 3 era de 16,32 km, posteriormente se logró reducir a 15,1 km con la nueva propuesta (Figura 4), los principales inconvenientes que presenta

esta ruta es que en ocasiones suele haber exceso de residuos, debido a la cercanía con las empacadoras y demás industrias que se encuentran por el sector.



Figura 4. Ruta 3 optimizada.

La ruta 4 tenía un recorrido inicial de 7, 87 km con la nueva propuesta (Figura 5) el recorrido reduce a 6,70 km tomando en cuenta que se eliminaron retornos incensarios.



Figura 5. Ruta 4 optimizada.

La ruta 5 sin optimizar era de 6,82 km y la propuesta de la ruta optimizada (Figura 6) se reduce a 6 km.

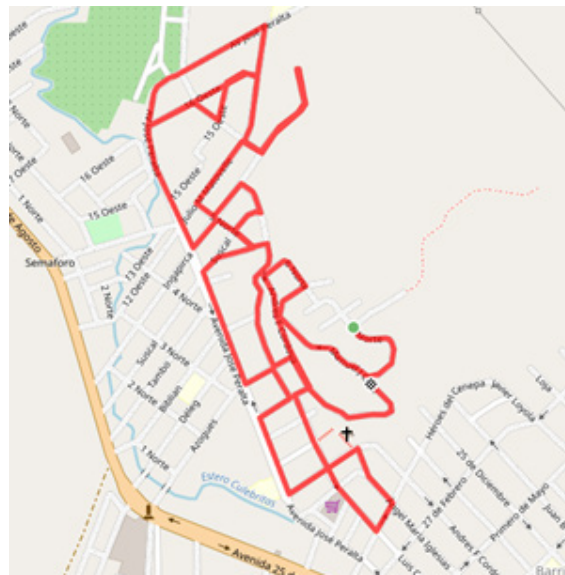


Figura 6. Ruta 5 optimizada.

El recorrido total de la ruta 7 sin optimizar era de 11,61 km, mientras que la ruta optimizada (Figura 7) tiene un recorrido de 10,5 km, la ruta se torna lenta y complicada por la gran cantidad de

giros que el conductor tiene que hacer, debido a la cantidad de viviendas por dichos sectores, por lo que el tiempo real de recolección era superior a las 4 horas (240 minutos).

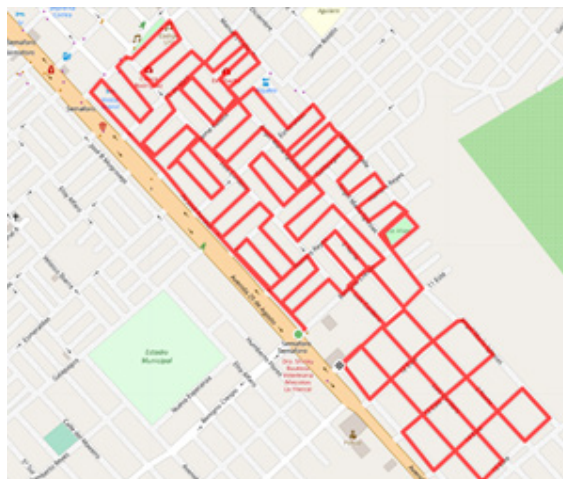


Figura 7. Ruta 7 optimizada.

El recorrido original de la ruta 8 tenía una extensión de 14,5 km; tras el proceso de optimización (Figura 8), se logró reducir a 13,9 km. Durante el análisis, se identificó que el vehículo ingresaba a un sector sin presencia de viviendas, lo cual permitió eliminar un tramo innecesario

y reducir ligeramente el tiempo de recolección. El principal inconveniente de esta ruta radica en que se recorren varios metros sin que exista generación de residuos, situación que se presenta principalmente en las zonas periféricas del casco urbano.

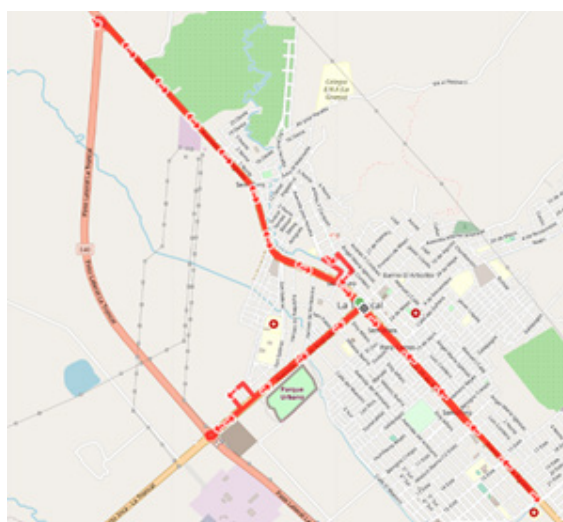


Figura 8. Ruta 8 optimizada.

La ruta 11 inicialmente presenta una longitud de 13,48 km. A partir del análisis realizado, se propuso una nueva ruta optimizada (Figura 9), en la cual se identificaron y eliminaron

giros innecesarios, ya que era frecuente que el recorrido pasara por los mismos sectores en más de una ocasión. Considerando este aspecto, la ruta optimizada alcanza una distancia de 12,4 km.



Figura 9. Ruta 11 optimizada.

La Figura 10 presenta un gráfico de barras que compara las distancias recorridas antes y después de la optimización. Las barras rojas indican la distancia original y las verdes, la optimizada.

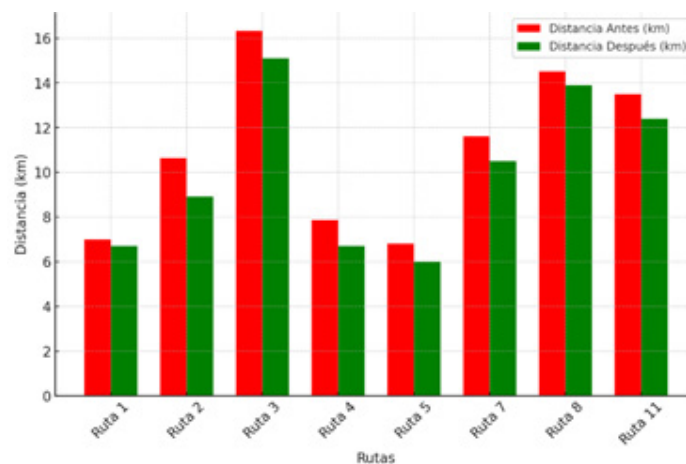


Figura 10. Comparación de distancias en rutas optimizadas.

La optimización eliminó giros innecesarios y excluyó sectores sin generación de residuos, reduciendo tiempos operativos y consumo de recursos. Junto con el análisis estadístico, confirma una gestión más eficiente de la recolección.

La figura 11 muestra la reducción en los tiempos de recolección tras la optimización de

rutas. Cada punto compara el tiempo antes (eje X) y después (eje Y), con una línea de tendencia descendente que indica mayor eficiencia. Estos resultados confirman el impacto positivo de la optimización, respaldado por el análisis estadístico.

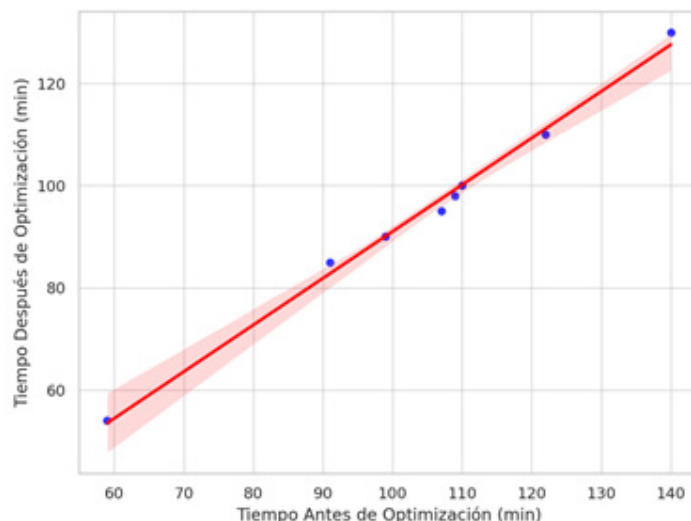


Figura 11. Comparación de tiempos de recolección antes y después.

Los resultados del estudio muestran que la producción per cápita en el cantón La Troncal es similar a la de otras regiones de Ecuador, aunque ligeramente superior en el sector industrial. La composición de los residuos, dominada por desechos orgánicos, sugiere la necesidad de implementar programas de compostaje para reducir la cantidad de residuos que llegan al relleno sanitario. Además, la optimización de las rutas de recolección permitirá reducir los tiempos de recolección y mejorar la eficiencia del servicio, lo que se traducirá en un menor impacto ambiental y una mayor satisfacción de la población.

CONCLUSIONES

El estudio en La Troncal confirma que la optimización georreferenciada de rutas mejora significativamente la eficiencia ambiental y operativa del sistema municipal. La caracterización de residuos reveló una predominancia de materia

orgánica (55%), metales (18,36%) y madera (14,13%), evidenciando un alto potencial para programas de compostaje y reciclaje. La producción per cápita (0,70 kg/hab/día urbana, 0,68 kg/hab/día rural y 0,88 kg/hab/día industrial) es similar a la de municipios con características equivalentes.

La optimización de ocho rutas clave, mediante la eliminación de giros innecesarios y la exclusión de sectores con baja generación de residuos, redujo tiempos y distancias recorridas. El tiempo promedio de recolección (247,2 minutos) podría disminuir aún más, especialmente en la variable T2 (tiempo de recolección, 103,4 minutos en promedio).

Los resultados de la encuesta revelaron un alto interés por parte de la población en recibir información sobre el manejo adecuado de residuos, lo que sugiere que las campañas de educación ambiental y concienciación podrían

tener un impacto positivo en la reducción de residuos y mejorar la participación ciudadana. Esta disposición de la comunidad representa una oportunidad para complementar las mejoras técnicas con estrategias sociales.

El estudio confirma que un modelo integral de gestión basado en la optimización georreferenciada y la educación ambiental contribuye a la sostenibilidad urbana mediante la reducción de emisiones contaminantes, menor consumo de combustible y mayor eficiencia operativa. Se recomienda implementar programas de valorización de residuos y campañas de concienciación para fomentar prácticas de reciclaje y compostaje, contribuyendo así a los objetivos de desarrollo sostenible y economía circular en el cantón.

CONFLICTO DE INTERESES. Los autores declaran que no existe conflicto de intereses para la publicación del presente artículo científico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad, S., Imran, Jamil, F., Iqbal, N., & Kim, D. (2020). Optimal route recommendation for waste carrier vehicles for efficient waste collection: A step forward towards sustainable cities. *IEEE Access*, 8, 77875-77887. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988173>
- Akhtar, M., Hannan, M. A., Begum, R. A., Basri, H., & Scavino, E. (2017). Backtracking search algorithm in CVRP models for efficient solid waste collection and route optimization. *Waste Management*, 61, 117-128. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.022>
- Bhagat, Dr. S. R., & Dharmale, S. (2023). Eco Efficiency Optimization of Municipal Solid Waste Management. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 11(7), 2271-2278. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.55119>
- Bulatov, N. K., Toilybayev, A. E., Suleyeva, N. Z., & Sarzhanov, D. K. (2021). Development of the model (algorithm) of the efficient transportation logistics with the purpose of collection and transportation of the solid municipal waste to the places of their recycling. *En Environment, Development and Sustainability* (Vol. 23, Número 2, pp. 2015-2037). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00661-w>
- Hannan, M. A., Begum, R. A., Al-Shetwi, A. Q., Ker, P. J., Mamun, M. A. Al, Hussain, A., Basri, H., & Mahlia, T. M. I. (2020). Waste collection route optimisation model for linking cost saving and emission reduction to achieve sustainable development goals. *Sustainable Cities and Society*, 62. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102393>
- Hina, S. M., Szmerekovsky, J., Lee, E. S., Amin, M., & Arooj, S. (2020). Effective municipal solid waste collection using geospatial information systems for transportation: A case study of two metropolitan cities in Pakistan. *Research in Transportation Economics*, 84. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2020.100950>
- Hu, Y., Ju, Q., Peng, T., Zhang, S., & Wang, X. (2024). Municipal Solid Waste Collection and Transportation Routing Optimization Based on IAC-SFLA. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 32(1), 31-44. <https://doi.org/10.3846/jeelm.2024.20774>
- Jose, N., Mohan, G., Zayan, M., Ali, M., & S, I. M. (2023). A Comparative Assessment of GIS Integrated ILP and MILP Techniques for Solid Waste Routing. *Proceedings*. <https://doi.org/10.21467/proceedings.156>
- Keček, D., Čiković, K. F., & Mikulić, D. (2024). Efficiency evaluation of waste management: A systematic literature review of DEA applications. *Proceedings of the International Conference on Management, Economics and Finance*, 1(1), 1-12. <https://doi.org/10.33422/icmef.v1i1.574>

- Leerojanaprapa, K., Thongmak, J., Disada, T., & Sirikasemsuk, K. (2024). Truck Routing for Waste Collection: A Case Study of Tha Ruea District, Phra Nakhon Si Ayutthaya Province. *Journal of Science Ladkrabang*, 33(1), 79-102. <https://doi.org/10.55003/scikmitl.2024.259221>
- Li, W., Ng, T. F., Ibrahim, H., & Wang, S. L. (2024). A literature review of the state of the art of sustainable waste collection and vehicle routing problem. En *Journal of the Air and Waste Management Association*. Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/10962247.2024.2415298>
- Liang, Y. C., Minanda, V., & Gunawan, A. (2022). Waste collection routing problem: A mini-review of recent heuristic approaches and applications. En *Waste Management and Research* (Vol. 40, Número 5, pp. 519-537). SAGE Publications Ltd. <https://doi.org/10.1177/0734242X211003975>
- Murillo, M. F. M., Murillo, W. A. M., Hinojosa, L. X. O., Aleaga, A. M. L., Uve, G. E. C., Cuscó, M. J., & Pandey, D. (2021). An efficient route design for solid waste collection using graph theory and the algorithm of the traveling agent in dynamic programming. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(5). <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09003-3>
- Priyadarshi, M., Maratha, M., Anish, M., & Kumar, V. (2023). Dynamic routing for efficient waste collection in resource constrained societies. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29593-x>
- Quintili, A., & Castellani, B. (2020). The energy and carbon footprint of an urban waste collection fleet: A case study in central Italy. *Recycling*, 5(4), 1-18. <https://doi.org/10.3390/recycling5040025>
- Rattanawai, N., Arunyanart, S., & Pathumnakul, S. (2024). Optimizing municipal solid waste collection vehicle routing with a priority on infectious waste in a mountainous city landscape context. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101066>
- Salleh, A. H., Ahamad, M. S. S., & Yusoff, M. S. (2016). Applying an integrated route optimization method as a solution to the problem of waste collection. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(4W1), 103-110. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W1-103-2016>
- Steyn, L. J., & Willemse, E. J. (2018). Using Vehicle GPS Data to Infer Offloading Times of Waste Collection Vehicles at Transfer Stations. <https://doi.org/10.1109/ICABCD.2018.8465472>
- Sulemana, A., Donkor, E. A., Forkuo, E. K., & Oduro-Kwarteng, S. (2018). Optimal Routing of Solid Waste Collection Trucks: A Review of Methods. En *Journal of Engineering (United Kingdom)* (Vol. 2018). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2018/4586376>
- Zainun, N. Y., Samsu, K. N. S. K., & Rohani, M. M. (2016). Proposing An Effective Route for Transporting Solid Waste Using Gis Approach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 160(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/160/1/012050>