

Modelo de recolección de residuos sólidos basado en el Problema del Cartero Chino

Solid waste collection model based on the Chinese Postman Problem

Julián Silva Rodríguez, Elkin Ramírez Gil

Palabras clave: logística, programación lineal, residuos sólidos, problema del cartero chino

Key words: logistics, linear programming, solid waste, chinese postman problem algorithm

RESUMEN

El presente artículo presenta los resultados finales de una investigación adelantada en el municipio de Samacá Departamento de Boyacá – Colombia, donde actualmente se presenta un problema debido a la mala planeación de rutas de recolección de residuos sólidos, generando mayores distancias, altos costos y acumulación de residuos. En consecuencia, el presente trabajo propone un modelo logístico para la recolección de los residuos sólidos en la zona bajo estudio, logrando desarrollar un modelo de programación lineal entera mixta basado en el problema del cartero chino, con el fin de decidir las rutas que se deben realizar para recolectar la totalidad de los residuos. Los resultados evidencian que con el modelo propuesto se disminuye en un 23.45% la distancia total recorrida respecto a la distancia que se recorre actualmente. Igualmente, con el modelo desarrollado se garantiza que el vehículo recorra todos los puntos de acopio y se recolecte la totalidad de los residuos generados por las viviendas.

ABSTRACT

This article presents the final results of an investigation carried out in the municipality of Samacá Department of Boyacá - Colombia, where a problem is currently present due to the poor planning of collection routes for solid waste, generating greater distances, high costs and accumulation of waste. Consequently, this work proposes a logistic model for the collection of solid waste in the area under study, achieving a linear programming model combined in the Chinese postman problem, in order to decide the routes that must be performed to collect the totality of the waste. The results show that with the proposed model the total distance traveled compared to the distance that is currently recorded was reduced by 23.45%. Also, with the developed model that guarantees that the vehicle travels through all collection points and collects all the waste generated by the homes.

INTRODUCCIÓN

Govindan, Kadziński, Ehling & Miebs (2019), afirman que las investigaciones en Logística Inversa (LI) han tenido un crecimiento significativo en los últimos años, evidenciando diversas aplicaciones y teorías desarrolladas respecto al tema. Según Tornese, Pazour, Thorn & Carrano (2019), las diferentes aplicaciones de LI se han venido dando por el diseño e implementación de sistemas enfocados a la recolección y tratamiento de residuos o productos fuera de uso, lo cual ha estado incentivado por aspectos como beneficios económicos, presiones legales y la creciente cultura ciudadana respecto al tema de devolución de productos. Razones que coinciden con lo expuesto por Kannan, Garg, Jha & Diabat (2017) y Bouzon, Govindan, Rodriguez & Campos (2016), quienes afirman que al practicar LI se obtiene enormes beneficios económicos para la empresa.

Muchos autores han realizado sus investigaciones con el fin de lograr una definición de LI. Rubio & Jiménez-Parra (2017) definen LI como área de investigación centrada en la gestión de la recuperación de productos una vez que ya no se desean o no pueden ser utilizados por los consumidores, a fin de obtener un rendimiento económico a través de la reutilización, remanufactura o reciclaje. La definición más utilizada de LI es la propuesta por Rogers (2007) en el *Reverse Logistics Executive Council*, la cual es definida como “El proceso de planificación,

ejecución y control eficiente y rentable del flujo de materias primas, inventario en proceso, productos terminados e información relacionada desde el punto de consumo hasta el punto de origen con el fin de recuperar valor o realizar una correcta eliminación”. Sangwan (2017), menciona que existen escenarios en los cuales la LI puede desempeñarse: la red de distribución inversa, sistemas de control de inventario con los flujos de retorno, y la planificación de la producción con la reutilización de piezas y materiales.

LI ha sido un tema que ha crecido poco a poco y ha dado origen a muchas investigaciones sobre el tema (Stock & Mulki, 2009). Debido a lo anterior, varios autores como Dowlatshahi (2000), Guide Jr & Van Wassenhove (2009) y Rachih, Mhada & Chiheb (2018) han descrito una extensa lista de sistemas de LI y sus estructuras, analizando la variedad de los problemas que surgen a raíz de esta. En consecuencia, los investigadores empezaron a centrar sus esfuerzos en diseñar sistemas de LI, con el fin de atacar los problemas relacionados con el mal manejo y tratamiento de los productos fuera de uso. Autores como Grandjean, Groenewald, McGordon & Marco (2019) y Campolina et al. (2017), han adelantado investigaciones con el fin de diseñar modelos de LI, para el control y buen manejo de materiales peligrosos. De igual forma, Che, Chiang & Kuo (2012) y Hosseinzadeh & Roghianian (2012), han llevado a cabo investigaciones con el fin de

diseñar sistemas de LI para la gestión y recuperación de productos fuera de uso en diferentes industrias como la informática, automotriz, entre otras.

Por otra parte, al momento de aplicar LI, las empresas buscan generar beneficios logísticos, financieros y ambientales (Guide Jr & Van Wassenhove, 2009). De esta forma, una manera correcta de lograr estos beneficios es a través de la mejora ambiental de productos y procesos por medio de la aplicación de sistemas de LI, como por ejemplo la aplicación en los procesos de recolección y disposición final de residuos sólidos. Según el *World Bank* (2018), la generación de residuos sólidos en el mundo ha crecido proporcional al crecimiento de la población, donde se estima que producción anual de desechos sólidos municipales debería ser de aproximadamente 1.3 millones de toneladas para los asentamientos urbanos y que ese número debería duplicarse para fines de 2025.

Debido a lo anterior, Márquez (2010) afirman, que en la mayoría de los casos las rutas que se diseñan son de forma intuitiva, de allí que los tiempos y gastos, como, por ejemplo, en combustible se incrementen. Debido a lo anterior diferentes autores como Buhrkal, Larsen & Ropke (2012) y Ramos, Gomes & Barbosa-Póvoa (2014), llevaron a cabo investigaciones con aplicación a la recolección de residuos sólidos, en los cuales se tuvo una mejora en la eficiencia del servicio a través problemas de ruteo y generación de beneficios

económicos, logísticos, financieros y ambientales.

En consecuencia, Calabrò & Komilis (2019), Almazán-Casali, Alfaro & Sikra (2019) y Greco, Cenciarelli & Allegrini (2018), han adelantado estudios con el fin de definir metodologías de inspección para la evaluación de los sistemas de recolección de residuos sólidos municipales y cómo influye la participación ciudadana en la eficiencia de estos sistemas y la repercusión que tiene para la ciudad en términos de costos y turismo. Igualmente, autores como Hannan et al. (2018), Akhtar et al. (2017) y Louati (2016) han adelantado investigaciones con el fin de desarrollar modelos de programación para la recolección de residuos sólidos basados en algoritmos matemáticos y en el *Vehicle Routing Problem* (VRP), cuyo objetivo es determinar las mejores rutas que se pueden realizar para la recolección de dichos residuos, teniendo en cuenta variables como distancia de viaje, desechos recolectados, consumo de combustible, costo de combustible y eficiencia.

Debido a lo anterior, la investigación desarrollada presenta un estudio en la zona urbana del municipio de Samacá, para rediseñar las rutas y minimizar la distancia total del recorrido. En la investigación se desarrolló un modelo matemático de programación lineal con el fin de realizar un diseño logístico para la recolección de los residuos sólidos domiciliarios del municipio de Samacá, para lo cual inicialmente se realizó la caracterización de la empresa y posteriormente el diseño de

un modelo de optimización, con el fin de comprobar la hipótesis nula si con un modelo matemático del problema del cartero chino se podría lograr la recolección de la totalidad de los residuos generados por el municipio. En este sentido, el presente artículo se estructura de la siguiente manera: en la Sección dos (2) se muestra la estructura metodológica, donde

se explica cada una de las fases que se llevaron a cabo para el diseño de la red de logística inversa. Luego, en la Sección tres (3) se muestran de manera sintetizada los resultados de la investigación. Finalmente, en la Sección cuatro (4) se presentan las conclusiones producto de la investigación desarrollada.

METODOLOGÍA

La investigación desarrollada es un estudio de caso según los lineamientos de Yin (2017), la cual maneja dos niveles de investigación: descriptivo y experimental con un enfoque netamente cuantitativo. Para el diseño del modelo logístico, se siguió la metodología expuesta por Taha (2012), la cual consta de las siguientes etapas:

Etapa 1. Definición del Problema. En esta etapa se realizó un diagnóstico del proceso que se desarrolla actualmente en la zona bajo estudio para la recolección y disposición final de los residuos sólidos. A través de la observación directa en las jornadas de recolección adelantadas por la empresa encargada, se describió detalladamente por medio de un diagrama de flujo el proceso actual de recolección. Finalmente, en esta etapa, se describieron todos los parámetros y variables que inciden en el proceso de recolección y disposición de residuos sólidos, incluyendo todos los aspectos necesarios de acuerdo a la delimitación de la

investigación. Finalmente se determinó el objetivo del modelo matemático como posible solución al problema planteado.

Etapa 2. Construcción del Modelo. En esta etapa se construyó del modelo matemático de programación lineal entera mixta. En primera instancia se realizó una codificación de las variables y los parámetros definidos anteriormente, con el fin de facilitar la creación del modelo. Inicialmente se determinó la función objetivo de acuerdo con el propósito definido en la etapa anterior. Seguidamente se determinaron las restricciones del modelo de acuerdo a las condiciones y delimitaciones actuales del proceso

Etapa 3. Solución del Modelo. Se adelantaron visitas de campo con el fin de tomar los datos necesarios sobre cantidades generadas en cada punto identificado y así mismo por medio de la empresa recolectora se obtuvo la información pertinente de acuerdo con los parámetros establecidos. Finalmente, la información organizada se

ingresó al modelo para darle solución a través del software especializado de Investigación de Operaciones LINGO versión 14 ®.

Etapa 4. Validación del Modelo. A partir de la solución del modelo desarrollado en la etapa anterior, se realizó una validación teórica del modelo, donde se contrastó que dicho modelo planteado arrojaba los

resultados que se esperaban y fueran acordes y confiables con el sistema actual. Asimismo, se plantearon y evaluaron posibles escenarios de mejora del sistema actual, donde la empresa recolectora tendrá la posibilidad de implementar dichos escenarios de acuerdo a las mejoras sugeridas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Descripción del Municipio de Samacá

Samacá es un municipio de unos 172.9 km² de extensión; 171.7 km² de área rural y 1.2 km² de área urbana, que pertenece a la provincia del centro del departamento de Boyacá. Dista a 32 km de Tunja y 159 km de Bogotá. Limita por el oriente con Cucaita, Tunja y Ventaquemada, por el occidente con Raquira, por el norte con Sachica, Sora y Cucaita y por el sur con Ventaquemada, Raquira y Guacheta. La entidad administradora del acueducto urbano, al igual que la prestación del servicio de aseo en el municipio, es una empresa de carácter mixto de servicios públicos, denominada SERVITEATINOS SAMACA S.A. - E.S.P. quien coordina la operación, mantenimiento y rehabilitación de las redes de acueducto y alcantarillado sanitario y pluvial además de la prestación de los servicios de recolección de residuos sólidos y transporte de estos al sitio de disposición final, como el barrido de las calles y limpieza de áreas públicas del municipio.

Para el servicio de recolección de los residuos sólidos, la empresa cuenta con un (1) camión compactador de 9 toneladas. La ruta de recolección de residuos actual divide al pueblo en 4 macrorutas cubriendo toda el área urbana con aproximadamente 1952 suscriptores los cuales son clasificados según su tipo de estrato u objeto social (tabla 1), siendo en su mayoría, residencias de estrato 2 y en menor medida los entes oficiales (Alcaldía, Hospital, Colegios públicos).

Tabla 1. Clasificación y número de usuarios del servicio de aseo en el municipio de Samacá

Estrato	Número de usuarios
Bajo-Bajo (1)	336
Bajo (2)	1064
Medio (3)	371
Comercial	147
Oficial	34
TOTAL	1952

Fuente: SERVITEATINOS SAMACA S.A. - E.S.P

Descripción del proceso actual de logística inversa

El proceso actual de LI para residuos sólidos domiciliarios que se realiza en el municipio de Samacá, no tiene en cuenta las actividades propias de la LI. Además, no se utiliza ninguna herramienta tecnológica o de ingeniería que aporte tanto en la planificación como en la ejecución de

las jornadas de recolección. El proceso de logística inversa que se desarrolla actualmente comprende 4 etapas: Generación, Recolección, Recuperación y Disposición. En la figura 1 se muestra el diagrama de flujo del proceso bajo estudio, el cual lista todas las actividades que comprenden las etapas anteriormente mencionadas.

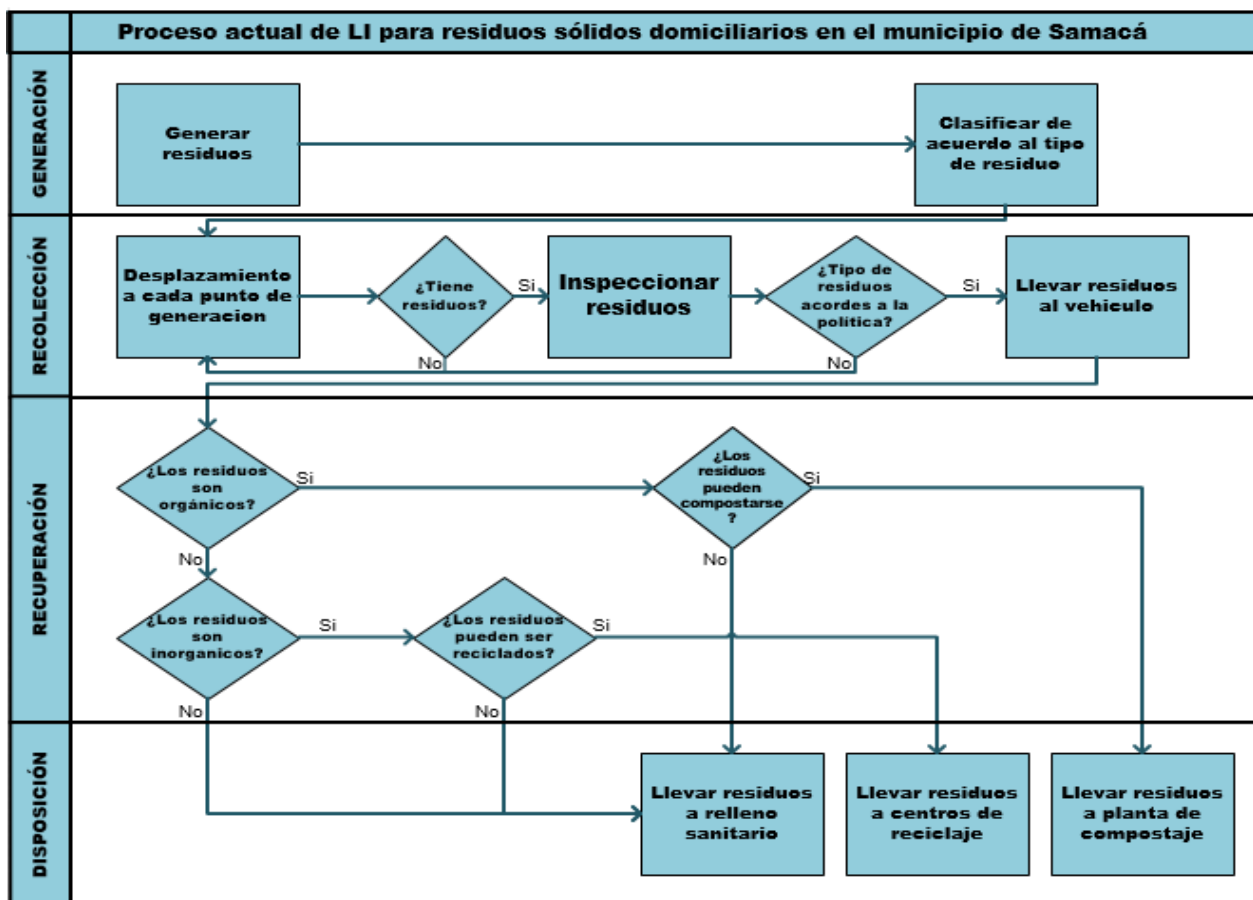


Figura 1. Diagrama del proceso de logística inversa de recolección de residuos sólidos

Fase de Generación. El proceso de aprovechamiento de los residuos sólidos se inicia con la producción de los mismo, ya que, en países subdesarrollados como Colombia, varía dependiendo del estrato

socioeconómico en que se producen, siendo mayor la cantidad de componente orgánico en los estratos bajos. Lo anterior se debe tener en cuenta al momento de implementar las políticas destinadas a la

recuperación de estos. Además, se debe resaltar que en el municipio de Samacá se evidencia un comportamiento en la generación de residuos típicos de un municipio categoría 6 (La categoría 6 agrupa a los municipios con menor volumen de ICLD - límites definidos de población e Ingresos Corrientes de Libre Destinación - y/o menos habitantes), consecuencia directa de las actividades desarrolladas en el casco urbano y veredas del sitio de estudio.

De igual manera, debe destacarse que no se encuentra puntos críticos en el municipio de Samacá, puesto que la generación de residuos sólidos en el casco urbano se halla un comportamiento típico residencial, debido principalmente a que no se cuenta con generadores especiales dentro del área urbana. Sin embargo, se puede establecer que un punto de alta generación de residuos es la plaza de mercado, para la cual tiene un plan para la recolección de sus residuos, lo que hace que no se convierta en problema ni por tiempo ni por cantidad generada.

Fase de Recolección. La siguiente etapa en el proceso es la recolección, la cual consiste en que la empresa de servicios públicos SERVITEATINOS S.A E.S.P., mediante una estrategia en donde se organizan las rutas y los horarios, recoge los residuos de viviendas y establecimientos de comercio. Para la realización de este proceso, el vehículo compactador realiza la ruta de recolección programada y de acuerdo a la generación encontrada se realizarán uno (1) o dos (2) viajes diarios al lugar de

recuperación / disposición final dependiendo del tipo de residuo que se esté recogiendo. Este se realiza en el momento en que el camión este completamente lleno, ocupando su volumen máximo, por lo cual se obtendrá un peso aproximado de 9 toneladas en promedio, las cuales cambian por la densidad de los residuos generados en cualquier periodo de recolección.

Los residuos no aprovechables son dispuestos en el relleno sanitario de Pírgua desde el año 2009; avalado por reportes mensuales procedentes de la empresa SERVITUNJA S.A. quien realiza el manejo técnico final de estos residuos en celdas de un relleno sanitario. Por otra parte, para la zona rural el servicio de recolección se presta en un 5.2% de la siguiente forma: residuos orgánicos, reciclables y no aprovechables los días martes con una frecuencia cada 8 días. Dicho porcentaje comprende los centros poblados denominados: El Desaguadero, La Fábrica, La Cumbre, sectores El Durazno, El Valle, La Batea, El Quite, Pataguay, Salamanca, El Llanito y Gacal, junto con las instituciones educativas que se encuentran en dichos sectores, en el horario de seis de la mañana a dos de la tarde. Estos residuos se disponen en el relleno sanitario de Pírgua (SERVITEATINOS, 2018).

De igual manera se presta el servicio de recolección de residuos al sector minero los días sábado cada quince (15) días, entre estas están: Mina Milpa, Geoformaciones, Carbones Samacá, Carbones andinos, Montana, Intercarbon, Coquecol.

Fase de Recuperación. Una vez recolectados los residuos, el siguiente paso en la cadena es la recuperación de los mismo, lo cual se puede realizar mediante diferentes mecanismos. En mayor medida el aprovechamiento se realiza para los residuos orgánicos en una planta de compostaje, la cual se basa en los procesos de descomposición biológica de la materia orgánica contenida en los residuos. Este material resultante del proceso es un producto de color negro, rico en humus y calcio útil como fertilizante orgánico, que puede usarse como abono en campos agrícolas, en la recuperación de los suelos erosionados, ya sea, por cultivos inadecuados o destruidos por corte excesivo de madera.

Por otra parte, los residuos inorgánicos son aprovechados en forma de reciclaje, proceso que consiste en volver a utilizar materiales que fueron desechados, y que aún son aptos para elaborar otros productos o re fabricar los mismos. Los residuos reciclables son utilizados en actividades de recuperación, aprovechamiento y comercialización por parte de un grupo de recicladores y el porcentaje que no entre en estos ítems se adiciona a los residuos sólidos que se disponen en el relleno sanitario de Pirgua por dicho grupo.

Fase de Disposición. La última etapa del proceso es la disposición, la cual consiste en depositar los residuos que no han podido ser reutilizados mediante ningún mecanismo, acabando así con su vida útil. El destino de los residuos sólidos es de gran

importancia pues repercute directamente en grandes aspectos como la contaminación ambiental, la salud de la comunidad, el carácter estético de los sitios de disposición final y en el aumento de los costos.

Para el caso del municipio de Samacá, se hace uso del relleno sanitario Pirgua en la ciudad de Tunja; dicho sistema se usa en grandes ciudades y consiste en seleccionar un sitio adecuado, en el cual posteriormente se esparcen y compactan los residuos para que su volumen se reduzca y finalmente se cubre con tierra la cual se debe aplanar.

Modelo para diseño de red de logística inversa para residuos de plaguicidas

Se desarrolló un modelo matemático con el empleo de programación lineal entera mixta para efectuar el diseño de la red de logística inversa de residuos sólidos domiciliarios en el municipio de Samacá – Boyacá; por medio de un proceso de decisión que evalúe matemáticamente las rutas optimas a seguir para realizar las tareas de recolección y transporte de residuos sólidos domiciliarios generados en el área urbana del municipio, tomando como base variables relevantes descritas en el apartado anterior (tipos de residuos y cantidades recogidas, tipo de transporte, actores de participación, entre otros).

De igual manera, para la construcción e interpretación del modelo se aclara que los términos vértice y nodo representan los cruces de calles del municipio, es decir, la intersección entre una calle y una carrera; y

los términos arco y arista se asocian al trayecto que existe entre dos vértices, es decir, una calle o carrera, cuya distancia comprende el largo de una cuadra o manzana.

Parámetros

$DIST_{ij}$ = Distancia en metros desde un nodo origen tipo i hasta un nodo destino tipo j

DEM_{ij} = Demanda en kilogramos asociada al arco comprendido entre un nodo origen tipo i y un nodo destino tipo j

$CAPD$ = Capacidad en kilogramos del vehículo compactador

Variables

X_{ij} = Variable binaria que indica si existe un recorrido desde el nodo origen i hasta el nodo destino j

Y_{ij} = Cantidad de veces que se recorre el arco comprendido entre un nodo i y un nodo j

$CAPU$ = Capacidad en kilogramos utilizada por el vehículo compactador durante el recorrido

Formulación Matemática

$$MIN Z = \sum_i^n \sum_j^n X_{ij} * DIST_{ij} \quad \forall i \neq j \wedge DEM_{ij} \neq 0 \quad (1)$$

s.a

$$X_{ij} = 0 \quad \forall i = j \quad (2)$$

$$X_{ij} + X_{ji} \geq 1 \quad \forall ij \wedge DEM_{ij} \neq 0 \vee DEM_{ji} \neq 0 \quad (3)$$

$$X_{ij} = 1 \quad \forall ij \wedge DEM_{ij} \neq 0 \wedge DEM_{ji} \neq 0 \quad (4)$$

$$X_{ji} = 1 \quad \forall ij \wedge DEM_{ij} \neq 0 \wedge DEM_{ji} \neq 0 \quad (5)$$

$$\sum_i^n \sum_j^n X_{ij} + \sum_i^n \sum_j^n X_{ji} = Y_{ij} \quad \forall ij \wedge DEM_{ij} \neq 0 \vee DEM_{ji} \neq 0 \quad (6)$$

$$\sum_i^n \sum_j^n X_{ij} * DEM_{ij} + \sum_i^n \sum_j^n X_{ji} * DEM_{ji} = CAPU \quad \forall DEM_{ij} \neq 0 \vee DEM_{ji} \neq 0 \quad (7)$$

$$CAPU \leq CAPD \quad (8)$$

$$\sum_i^n \sum_j^n X_{ij} = \sum_i^n \sum_j^n X_{ji} \quad \forall j = 1 \dots n \wedge DEM_{ij} \neq 0 \vee DEM_{ji} \neq 0 \quad (9)$$

$$X_{ij} = [0,1] \quad \forall ij \quad (10)$$

$$Y_{ij} \geq 0 \quad \forall ij \quad (11)$$

La ecuación (1) representa la función objetivo de minimizar la distancia total de la ruta. La ecuación anula una ruta en donde el origen y destino coincidan y (3) obliga a que debe haber un desplazamiento por un arco que tenga demanda asociada. Las ecuaciones (4) y (5) establecen la obligatoriedad de pasar dos veces por aquellas calles que, por sus características viales o de alto flujo vehicular, necesiten ser recorridas por cada una de sus aceras de forma independiente. La ecuación calcula el número de desplazamientos que se realiza por un arco, mientras que (7) calcula la cantidad total recolectada y a su vez (8) restringe dicha cantidad a la capacidad del vehículo. La ecuación (9) genera la continuidad de la ruta, estableciendo que cada vez que se ingresa a un nodo, de igual manera se debe salir del mismo, garantizando así que no se quede detenido en un solo punto. Finalmente (10) y (11) son restricciones lógicas del modelo.

Para ejecutar la solución del modelo se hizo uso del software especializado de investigación de operaciones LINGO, el cual se desarrolló el modelo para dos zonas del municipio: Sur y Norte. En las tablas 2 y 3 se observa el resumen de la ejecución del modelo en el software para cada grafo. Una vez realizada la codificación y programación de la sintaxis necesaria, se da solución al modelo. Inicialmente se obtuvieron los resultados de las aristas que

debe transitar para minimizar la distancia total de la ruta, así como la dirección en la que debe ser recorrido cada una de ellos.

Tabla 2. Resumen de la ejecución del modelo para la ruta norte del municipio

SOFTWARE	Lingo
VERSIÓN	17.0
VARIABLES	10083
RESTRICCIONES	359
TIEMPO DE SOLUCIÓN	3.39 segundos
FUNCIÓN OBJETIVO	4941.645 Metros

Tabla 3. Resumen de la ejecución del modelo para la ruta sur del municipio

SOFTWARE	Lingo
VERSIÓN	17.0
VARIABLES	13449
RESTRICCIONES	415
TIEMPO DE SOLUCIÓN	4 segundos
FUNCIÓN OBJETIVO	6158.073 Metros

Los datos se generan en forma de una matriz de incidencia (ver tabla 4), y se presentan a través de una codificación binaria, representando la decisión de recorrer un arco en una determinada dirección (1) o no (0) de acuerdo a su categorización. De igual forma al realizar la solución del modelo, se obtienen los resultados de las cantidades transportadas durante el desarrollo de la ruta.

Tabla 4. Sección de la matriz de incidencia generada como solución por el modelo

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
5	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	16	0	0	0	0
9	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
19	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0

Por otra parte, y aunque el software LINGO genera una solución para el modelo en forma de tabla, no establece la secuencia que debe ser recorrida. Por esta razón se hizo necesaria la implementación de un programa basado en el algoritmo de Hierholzer, el cual ordena la matriz de incidencia generada y compone una secuencia que representa la ruta que debe realizar el vehículo para poder completar el trayecto establecido.

El desarrollo del programa basado en el algoritmo de Hierholzer, se realizó en el software MATLAB y para su ejecución se requiere tanto de la matriz de incidencia que genera el software LINGO, como

también las coordenadas de los diferentes vértices que componen la red.

Para este caso, la matriz de incidencia, es utilizada como base para la ordenación de los resultados, el cual los presenta en forma de un recorrido continuo y se exponen en forma de un vector (ver figura 2), el cual es el conjunto de los diferentes ciclos que conforman la ruta.

De igual manera, se usan las coordenadas de los diferentes vértices, las cuales sirven para representar gráficamente la construcción de los diferentes segmentos de ruta que componen la totalidad del ciclo, así como también la suma de dichos segmentos; todo esto a través de la interfaz gráfica del software (figura 3).

1	69	70	33	7	11	8	9	5	4	19	17	18	28	23	28	19	20
---	----	----	----	---	----	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----

Figura 2. Sección del vector Solución que contiene la ruta a realizar

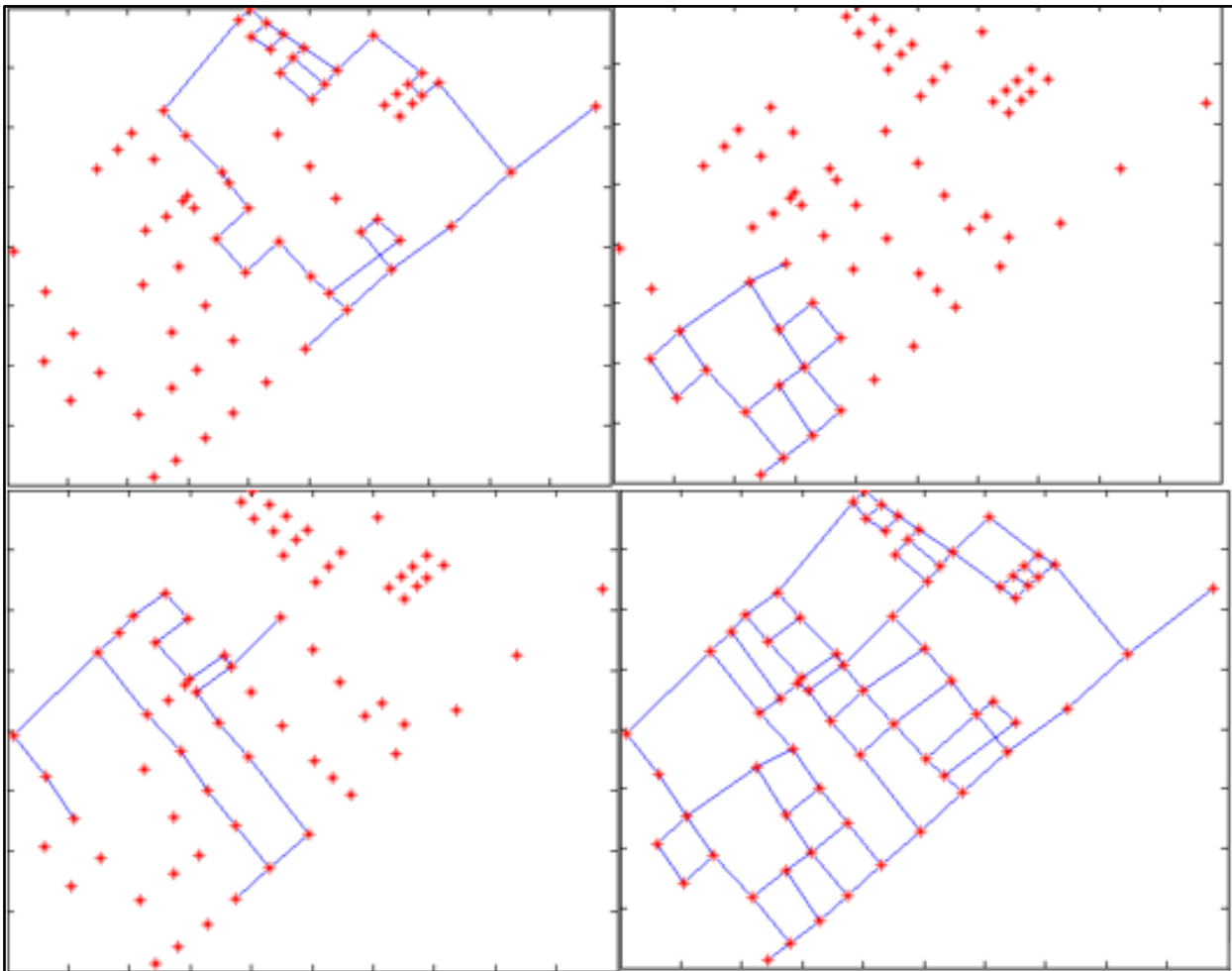


Figura 3. Representación Gráfica de los diferentes ciclos que hacen parte de la ruta generada

Finalmente, se realiza de nuevo la sistematización del vector solución para poder tener una interpretación real de la ruta generada, todo esto a través de la codificación realizada al inicio del proceso.

La figura 4 presenta una sección de la matriz resultante con la secuencia real a seguir por el vehículo compactador para la zona sur del municipio.

Ruta de recolección de residuos para la Zona Norte

Desde	Carrera	5	con	calle	6	Hasta	carrera	6	con	calle	6
Desde	Carrera	6	con	calle	6	Hasta	carrera	7	con	calle	6
Desde	Carrera	7	con	calle	6	Hasta	carrera	8	con	calle	6
Desde	Carrera	8	con	calle	6	Hasta	carrera	8	con	calle	7
Desde	Carrera	8	con	calle	7	Hasta	carrera	9	con	calle	7
Desde	Carrera	9	con	calle	7	Hasta	carrera	9	con	calle	8
Desde	Carrera	9	con	calle	8	Hasta	carrera	9	con	calle	9
Desde	Carrera	9	con	calle	9	Hasta	carrera	7	con	calle	9
Desde	Carrera	7	con	calle	9	Hasta	carrera	6	con	calle	9
Desde	Carrera	6	con	calle	9	Hasta	carrera	7	con	calle	9
Desde	Carrera	7	con	calle	9	Hasta	carrera	7	con	calle	8
Desde	Carrera	7	con	calle	8	Hasta	carrera	7	con	calle	6
Desde	Carrera	7	con	calle	9	Hasta	carrera	9	con	calle	9

Figura 4. Matriz decodificada de la solución

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En general, con el planteamiento del modelo se lograrían recorrer un total de 11,10Km en la totalidad de las calles que comprenden el área urbana del municipio de Samacá. En comparación con la distancia promedio del recorrido actual (aproximadamente 14.5 km, según estimaciones de la empresa de servicios públicos del municipio), con el modelo propuesto se disminuiría en un 23.45% la distancia total recorrida, logrando así una mayor eficiencia durante el proceso de recolección y por ende garantizando una mayor capacidad de respuesta por parte de la empresa al momento de realizar la recolección de los residuos, lo que conllevaría a la mitigación de problemas ambientales y de salud.

Por otra parte, se estima que, para la implementación del modelo realizado en la presente investigación, la empresa de servicios públicos del municipio de Samacá, no incurriría en costos mayores a los que puedan generar capacitaciones y socializaciones del mismo.

Si bien la reducción de la distancia total del recorrido en la ruta propuesta es sólo del 23%, se debe tener en cuenta que la ruta inicial fue determinada con base en la experiencia y el conocimiento de personas que trabajan diariamente en la recolección y transporte de los residuos sólidos domiciliarios. Esto evidencia que la utilización de herramientas científicas puede mejorar aún más procesos basados en la intuición y en experiencia

Finalmente, en la definición del sistema a trabajar se estableció que el costo asociado a los arcos entre cada par de nodos sería la distancia euclidiana. Aunque la distancia euclidiana, es una buena aproximación para establecer rutas cortas, es claro que se dejan de lado muchas de las características reales de las calles. Una mejora interesante

para este trabajo sería poder utilizar las distancias de los trayectos reales entre las paradas. El uso de programas GPS, junto con alguna herramienta automatizada que permita levantar la esta información de manera eficiente, entregaría resultados mucho más cercanos a la realidad.

CONCLUSION

Tras realizar la caracterización del sistema y la empresa, es posible visualizar la operación del sistema actual e identificar que el proceso bajo estudio comprende 4 etapas: Generación, Recolección, Recuperación y Disposición; pero, aunque aplica actividades propias de la logística inversa, no se utiliza ninguna herramienta tecnológica o ingenieril para la planificación y ejecución de las mismas. Por otra parte, se observa que la distancia del

recorrido actual puede estar sujeta a mejoras y por lo tanto afectar directamente a la rentabilidad de la empresa de servicios públicos. Por consiguiente, y como alternativa de mejora del proceso de recolección de residuos, se plantea un modelo matemático haciendo uso de la Programación Lineal Entera Mixta, con el fin de determinar la ruta que disminuyera la distancia total del recorrido en la zona urbana para realizar dicho proceso.

REFERENCIAS

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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.022>

Almazán-Casali, S., Alfaro, J. F. & Sikra, S. (2019). Exploring household willingness to participate in solid waste collection services in Liberia. *Habitat International*, 84, 57-64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2019.01.001>

Bouzon, M., Govindan, K., Rodriguez, C. M. T. & Campos, L. M. (2016). Identification and analysis of reverse logistics barriers using

fuzzy Delphi method and AHP. *Resources, Conservation and Recycling*, 108, 182-197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.05.021>

Buhrkal, K., Larsen, A. & Ropke, S. (2012). The waste collection vehicle routing problem with time windows in a city logistics context. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 39, 241-254. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.105>

Calabrò, P. S. & Komilis, D. (2019). A standardized inspection methodology to evaluate municipal solid waste collection performance. *Journal of Environmental Management*, 246, 184-191. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.142>

- Campolina, J. M., Sigrist, C. S. L., de Paiva, J. M. F., Nunes, A. O. & da Silva Moris, V. A. (2017). A study on the environmental aspects of WEEE plastic recycling in a Brazilian company. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(12), 1957-1968. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.142>
- Che, Z. H., Chiang, T. A., & Kuo, Y. C. (2012). Multi-echelon reverse supply chain network design with specified returns using particle swarm optimization. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 8(10), 6719-6731. Recuperado de: <http://www.ijicic.org/ijicic-10-09080.pdf>
- Dowlatshahi, S. (2000). Developing a theory of reverse logistics. *Interfaces*, 30 (3), 143- 155. DOI: <https://doi.org/10.1287/inte.30.3.143.11670>
- Govindan, K., Kadziński, M., Ehling, R. & Miebs, G. (2019). Selection of a sustainable third-party reverse logistics provider based on the robustness analysis of an outranking graph kernel conducted with ELECTRE I and SMAA. *Omega*, 85, 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.05.007>
- Grandjean, T. R., Groenewald, J., McGordon, A. & Marco, J. (2019). Cycle life of lithium ion batteries after flash cryogenic freezing. *Journal of Energy Storage*, 24, 100804. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100804>
- Greco, G., Cenciarelli, V. G. & Allegrini, M. (2018). Tourism's impacts on the costs of municipal solid waste collection: Evidence from Italy. *Journal of cleaner production*, 177, 62-68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.179>
- Guide Jr, V. D. R. & Van Wassenhove, L. N. (2009). OR FORUM—The evolution of closed-loop supply chain research. *Operations research*, 57(1), 10-18. DOI: <https://doi.org/10.1287/opre.1080.0628>
- Hannan, M. A., Akhtar, M., Begum, R. A., Basri, H., Hussain, A. & Scavino, E. (2018). Capacitated vehicle-routing problem model for scheduled solid waste collection and route optimization using PSO algorithm. *Waste management*, 71, 31-41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.019>
- Hosseinzadeh, M. & Roghanian, E. (2012). An optimization model for reverse logistics network under stochastic environment using genetic algorithm. *International Journal of Business and Social Science*, 3(12), 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.02.007>
- Kannan, D., Garg, K., Jha, P. C. & Diabat, A. (2017). Integrating disassembly line balancing in the planning of a reverse logistics network from the perspective of a third party provider. *Annals of Operations Research*, 253(1), 353-376. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10479-016-2272-7>
- Louati, A. (2016). Modeling municipal solid waste collection: A generalized vehicle routing model with multiple transfer stations, gather sites and inhomogeneous vehicles in time windows. *Waste management*, 52, 34-49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.041>
- Marquez, J. (2010). Macro y micro ruteo de residuos sólidos residenciales (tesis de pregrado). Universidad de Sucre, Sincelejo, Colombia.
- Rachih, H., Mhada, F. Z. & Chiheb, R. (2018). Meta-heuristics for reverse logistics: A literature review and perspectives. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 45-62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.058>
- Ramos, T. R. P., Gomes, M. I. & Barbosa-Póvoa, A. P. (2014). Planning a sustainable reverse logistics system: Balancing costs with environmental and social concerns. *Omega*, 48, 60-74. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.11.006>
- Rubio, S. & Jiménez-Parra, B. (2017). Reverse logistics: concept, evolution and marketing

- challenges. In *Optimization and Decision Support Systems for Supply Chains* (pp. 41-61). Springer, Cham.
- Rogers D. (2007, Marzo). Glossary. Recuperado el 20 de Agosto de 2019 en <http://www.rlec.org/glossary.html>
- Sangwan, K. S. (2017). Key activities, decision variables and performance indicators of reverse logistics. *Procedia CIRP*, 61, 257-262. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.185>
- Serviteatinos (2018). Informe Anual de Gestión. Samacá, Colombia: Serviteatinos. Recuperado de: <https://www.serviteatinosamaca.com>
- Stock, J. R. & Mulki, J. P. (2009). Product returns processing: an examination of practices of manufacturers, wholesalers/distributors, and retailers. *Journal of Business Logistics*, 30(1), 33-62. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2009.tb00098.x>
- Tornese, F., Pazour, J. A., Thom, B. K. & Carrano, A. L. (2019). Environmental and economic impacts of preemptive remanufacturing policies for block and stringer pallets. *Journal of Cleaner Production*, 235, 1327-1337. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.060>
- Taha, H.A. (2012). *Investigación de Operaciones*. Mexico D.F.: Pearson Educación, pp. 824.
- World, B.(2018). *World Bank annual report 2018*. World Bank, Washington. Recuperado de: <https://www.bancomundial.org/es/news/immersive-story/2018/09/20/what-a-waste-an-updated-look-into-the-future-of-solid-waste-management>
- Yin, R. K. (2017). *Case study research and applications: Design and methods*. Sage publications. Thousand Oaks, CA., pp. 282.

Autores

Julián Silva Rodríguez. Ingeniero Industrial, Magister en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Industrial. Universidad Antonio Nariño, Tunja, Colombia. Grupo de investigación GISPA, Gestión integral de los Servicios y Productividad Agroindustrial, Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7497-8632>

Email: juliansilvar04@gmail.com

Elkin Ramírez Gil. Ingeniero Industrial, Universidad Antonio Nariño, Tunja, Colombia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0460-8665>

Email: eramirez69@uan.edu.co

Recibido: 01-08-2019

Aceptado: 10-12-2019