



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**Modelación para la planeación táctica de la operación
de una Estación de Transferencia de residuos sólidos
en la ciudad de Medellín**

Autora
Angie Paola Vargas Restrepo

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Industrial
Medellín, Colombia
2021



Modelación para la planeación táctica de la operación de una Estación de Transferencia de
residuos sólidos en la ciudad de Medellín

Angie Paola Vargas Restrepo

Informe de práctica como requisito para optar al título de:
Ingeniera Industrial

Asesores

Asesor interno

Juan Guillermo Villegas Ramírez

Msc. en Ingeniería Industrial

Msc. en Matemática Aplicada

PhD. en Ingeniería

Asesor externo

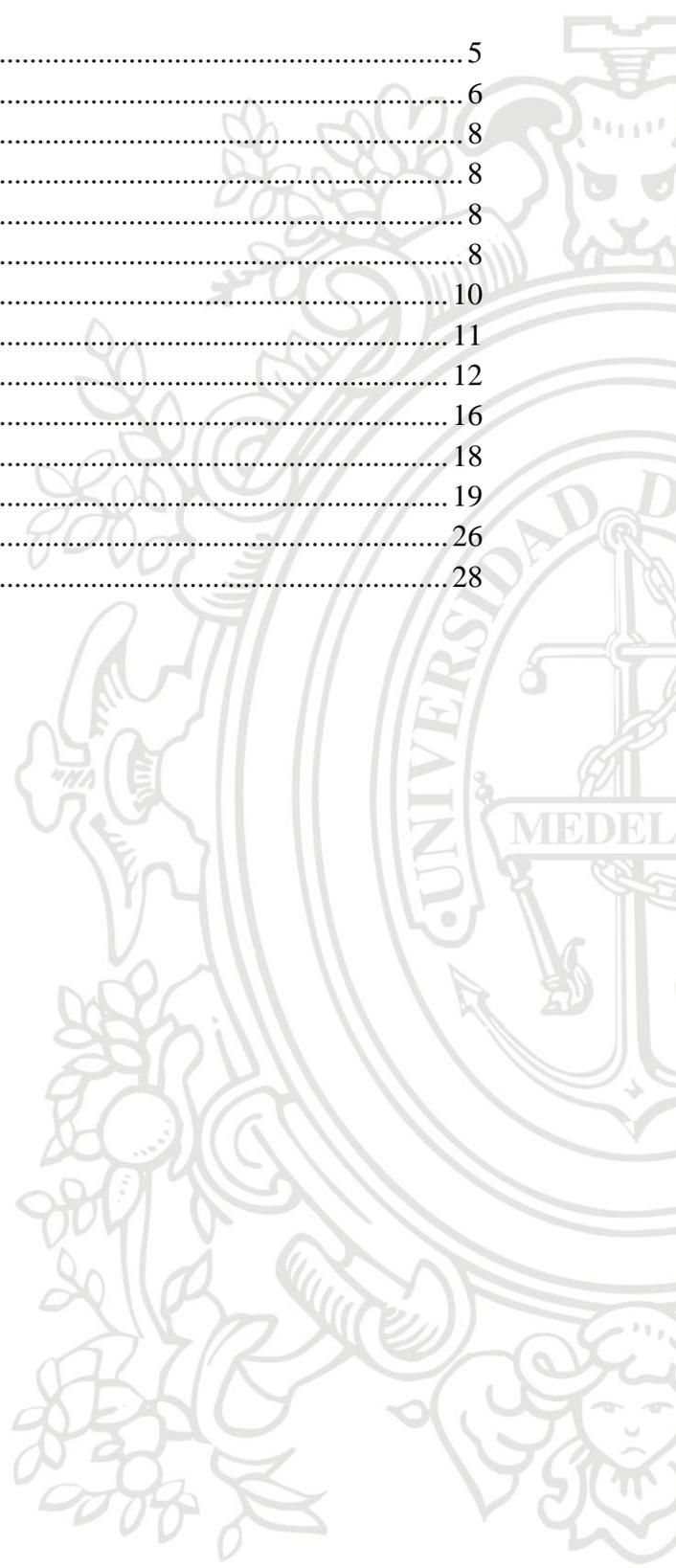
Santiago Jaramillo González

Ingeniero de Producción

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Industrial
Medellín, Colombia
2021

Tabla de contenido

Resumen	5
1. Introducción	6
2. Objetivos	8
2.1. Objetivo general	8
2.2. Objetivos específicos	8
3. Marco teórico y estado del arte	8
4. Metodología	10
4.1. Diagnóstico del proceso actual	11
4.2. Modelación matemática	12
4.3. Heurístico de secuenciación	16
4.4. Simulación	18
5. Resultados y análisis	19
6. Conclusiones	26
7. Referencias bibliográficas	28



Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Procesos involucrados en la gestión de residuos sólidos. Fuente: Elaboración propia.....	6
Ilustración 2. Ciclo actual de recolección de residuos sólidos. Fuente: Elaboración propia.....	11
Ilustración 3. Ciclo esperado de recolección de residuos sólidos. Fuente: Elaboración propia.....	16
Ilustración 4. Esquema de la fase de construcción aleatorizada para la asignación de microrrutas a vehículos compactadores. Fuente: Elaboración propia.....	17
Ilustración 5. Esquema de la fase de mejora para la asignación de microrrutas a vehículos compactadores. Fuente: Elaboración propia.....	18
Ilustración 6. Toneladas de residuos sólidos recolectados por tipo de recolección. Fuente: LCI.....	19
Ilustración 7. Toneladas promedio recolectadas semanalmente. Fuente: LCI.....	20
Ilustración 8. Proyección del tamaño de flota de vehículos compactadores. Fuente: Elaboración propia.....	21
Ilustración 9. Cantidad de toneladas recolectadas dado el cambio porcentual en las frecuencias de recolección. Fuente: Elaboración propia.....	22
Ilustración 10. Comportamiento de la llegada de vehículos compactadores a la ET después de la recolección de residuos en las microrrutas bajo la aplicación de la fase de construcción aleatorizada. Fuente: LCI.....	23
Ilustración 11. Comportamiento de la llegada de vehículos compactadores a la ET después de la recolección de residuos en las microrrutas bajo la aplicación de las fases de construcción aleatorizada y mejora.....	23
Ilustración 12. Comportamiento de la llegada de vehículos compactadores a la ET al cambiar las restricciones en las franjas horarias de recolección. Fuente: LCI.....	24
Ilustración 13. Modelo Estación de Transferencia. Fuente: LCI.....	25

Lista de tablas

Tabla 1. Resultados indicadores ET para 2023. Fuente: LCI.....	26
--	----

Resumen

El crecimiento acelerado de la población y el consumo de bienes produce un aumento sostenido de la generación de residuos sólidos. En este trabajo se presenta el caso de una empresa colombiana dedicada a la recolección, transporte y disposición final de residuos sólidos. El problema asociado consiste en la optimización de la flota y la secuencia en la llegada de los vehículos compactadores al destino de descarga de residuos de manera que se reduzca la posible congestión en el sistema y se evite el colapso dentro de la instalación de descarga. La metodología utilizada se divide en cuatro etapas. La primera etapa consiste en el diagnóstico del proceso actual de recolección de residuos sólidos. En la segunda etapa se desarrolla un modelo matemático mediante el cual se determina el tamaño óptimo de flota. Posteriormente, en la tercera etapa, se emplea un algoritmo heurístico para secuenciar las microrrutras a realizar por cada vehículo durante la semana. Finalmente, en la cuarta etapa se realiza un análisis de sensibilidad con el objetivo de determinar la cantidad de recursos requeridos en la Estación de Transferencia para atender la demanda de residuos sólidos recolectados. Los resultados obtenidos revelan una reducción entre el 10% y 30% de la flota actual y una secuenciación que permite aumentar la cantidad de viajes diarios realizados por cada vehículo.

Palabras clave: recolección de residuos sólidos, optimización, heurísticos.

Abstract

The accelerated growth of the population and the consumption of goods produce a sustained increase in the generation of solid waste. This work presents a case study of a Colombian company dedicated to collection, transportation, and final disposal of solid waste. The associated problem consists of optimizing the fleet and the arrival times of the vehicles at the waste unloading destination to reduce possible congestion in the system and avoid collapse inside the discharge facility. The methodology used comprises four stages. The first one consists in the diagnosis of the current solid waste collection process. In the second stage, a mathematical programming model is developed by which the optimal fleet size is found. In the third stage, a heuristic algorithm is used to sequence the collection micro routes to be carried out by each vehicle during the week. Finally, in the fourth stage, a sensitivity analysis is carried out to determine the number of resources required at Waste Transfer Station to meet the demand for solid waste collected. The result obtained reveal a reduction between 10% and 30% of current fleet and sequencing that allows increasing the number of daily trips made by each vehicle.

Keywords: solid waste collection, optimization, heuristics.

1. Introducción

En el mundo se producen anualmente 2010 millones de toneladas de residuos sólidos, su generación aumenta al ritmo que crece la población, se promueve el desarrollo económico (Banco Mundial, 2018), mejora la calidad de vida y cambian los hábitos de consumo (Ojeda & Quintero, 2008). Los residuos sólidos se generan a partir de los materiales no deseados o desechados al cumplir su vida útil; son producto del consumo doméstico, comercial, institucional e industrial (Sulemana, Donkor, Forkuo, & Oduro-Kwarteng, 2018). Estos proceden principalmente de la materia orgánica la cual representa el mayor porcentaje de residuos generados y la fracción restante proviene de metales, vidrio, plástico, papel (Banco Mundial, 2018), cuero, goma, baterías, textiles y materiales de construcción (Miezah, Obiri-Danso, Kádár, Fei-Baffoe, & Mensah, 2015).

A nivel mundial, los países desarrollados son los generadores del 34% de residuos (Banco Mundial, 2018). En América Latina se genera en promedio un kilogramo de residuos sólidos por habitante al día y la región en su conjunto representa alrededor del 10% de la generación de residuos a nivel mundial (Noticias ONU, 2018). Colombia, genera aproximadamente el 6% de estos residuos lo cual es equivalente a 12 millones de toneladas anuales. La generación de estos residuos y el bajo aprovechamiento de los mismos conlleva a que se presente saturación en los rellenos e instalaciones utilizadas para disponer y tratar estos residuos y, por ende, genera un impacto negativo en el medio ambiente y en la sociedad (Semana, 2020).

La gestión de los residuos sólidos se divide en varios procesos, entre los cuales se incluye la generación, separación en las fuentes, almacenamiento en sitio, recolección, transferencia y transporte, tratamiento, recuperación y disposición final (Rada, Ragazzi, & Fedrizzi, 2013). En la *ilustración 1* se observa los procesos involucrados y sus objetivos.

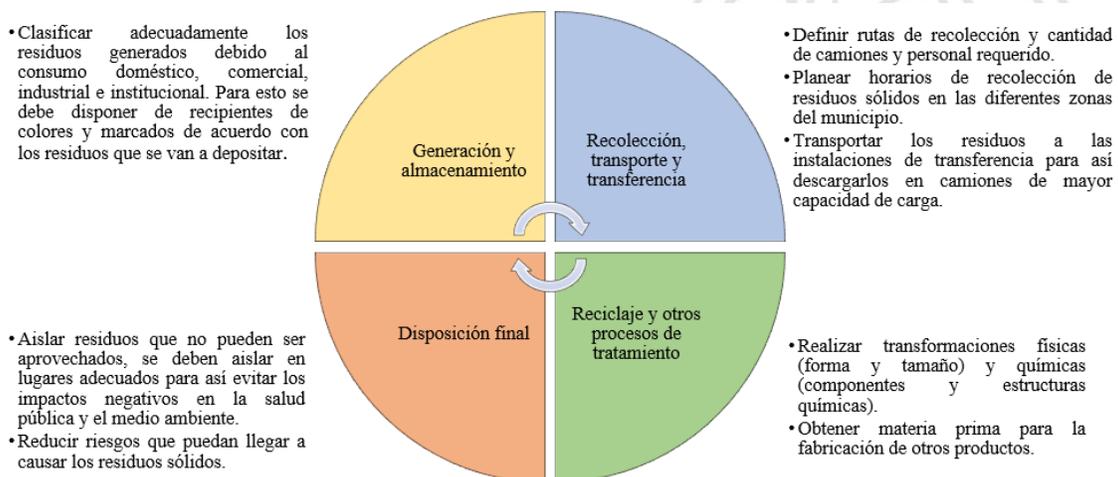


Ilustración 1. Procesos involucrados en la gestión de residuos sólidos. Fuente: Elaboración propia.

La recolección y el transporte representan entre el 60% y 80% del presupuesto destinado para el manejo de residuos sólidos (Beliën, De Boeck, & Van Ackere, 2014) (O'Connor, 2013). Estos procesos comprenden las actividades de recoger y transportar los residuos sólidos hasta un lugar de destino que puede ser un relleno sanitario, una instalación de procesamiento o tratamiento de materiales o una estación de transferencia (ET) (Ojeda & Quintero, 2008).

Una ET es un lugar dentro del casco urbano donde se realiza la transferencia de residuos sólidos de vehículos compactadores a otros vehículos con mayor capacidad de carga, los cuales se encargan de transportar los residuos hasta el relleno sanitario ubicada por lo general en las afueras de la ciudad. El funcionamiento de estas instalaciones depende de la gestión adecuada de los municipios, quienes se encargan de generar las estrategias para el manejo adecuado y de definir las áreas posibles de localización (Alcaldía de Medellín, 2016-2027).

La instalación de una ET trae consigo beneficios a nivel ambiental y social; además, permite que la operación sea más eficiente y al tiempo se genere una reducción en los costos (Loarte Rubina, Huerta, Celi, & Cerna, 2016). Las ETs generan otros impactos positivos relacionados con la flota de vehículos compactadores, como la disminución en los tiempos de viaje hasta los rellenos sanitarios y de los tiempos improductivos.

En la ciudad de Medellín la organización encargada de prestar el servicio de recolección de residuos sólidos es Empresas Varias de Medellín S.A. E.S.P. (EMVARIAS). La producción diaria de residuos en la ciudad es de 0.7 kilogramos por habitante. Actualmente, la operación de recolección y transporte de residuos se lleva a cabo haciendo uso de vehículos compactadores los cuales se encargan de transportar dichos residuos desde los territorios de las microrrutas establecidas hasta el relleno sanitario La Pradera.

Para 2023 se tiene previsto el inicio de la operación de una nueva ET mediante la cual se pueda mejorar la prestación del servicio respecto a actividades como la recolección, transporte y transferencia de residuos sólidos. Con esta instalación se busca minimizar los tiempos que actualmente recorren los vehículos compactadores, permitiendo así que con cada vehículo se puedan atender más microrrutas durante la jornada laboral y que los encargados de transportar dichos residuos al relleno sanitario sean tractocamiones de mayor capacidad de carga. Asimismo, se espera optimizar la flota y balancear la llegada de vehículos a la ET con el fin de reducir la probabilidad de cola en el sistema y evitar el colapso en el tráfico vehicular de la ciudad cerca de dicha ET.

En este sentido, se presenta la formulación del modelo matemático para determinar el tamaño óptimo de la flota y un algoritmo heurístico construido para secuenciar las

microrrutas que atenderá cada vehículo durante la semana, para los cuales se consideró la configuración actual de las microrrutas.

Este proyecto estuvo a cargo de la firma consultora Logística, Consultoría e Integración la cual tiene más de 15 años de experiencia en el sector logístico y se encarga del estudio de la operación, diseño, planeación e implementación de soluciones efectivas que contribuyan a la mejora y ajuste de la cadena de valor de sus clientes a las nuevas exigencias del mercado.

2. Objetivos

2.1. *Objetivo general*

Crear modelos matemáticos para la operación en la Estación de Transferencia mediante los cuales se obtenga el tamaño de flota óptimo y el balance de vehículos compactadores que llegan a la ET para reducir las colas generadas en el sistema.

2.2. *Objetivos específicos*

- Analizar la situación actual de la generación de residuos sólidos en Medellín y la proyección de crecimiento en toneladas para 2023.
- Definir el tamaño óptimo de flota mediante un modelo de optimización.
- Desarrollar un heurístico de secuenciación que permita balancear la llegada de vehículos a la ET.
- Realizar análisis de sensibilidad de las variables influyentes en la operación.

3. Marco teórico y estado del arte

La investigación de operaciones (IO) es una disciplina en la cual se tratan problemas de decisión y a través de la aplicación del método científico se orienta el proceso decisorio. Se concibe tanto como ciencia y arte. Es una ciencia debido a las técnicas matemáticas que incorpora y un arte porque el éxito de las fases que conducen a la solución depende en gran medida de la creatividad y de la experiencia del equipo de IO (Taha, 2012). De acuerdo con este autor, la piedra angular de la investigación de operaciones la constituye la modelación matemática.

(Hillier & Lieberman, 2010) plantean que esta disciplina se centra en “investigar sobre las operaciones” por lo cual se aplica a problemáticas relacionadas con la conducción y la coordinación de actividades en una organización. Su implementación se realiza en cinco

fases: definición del problema, formulación del modelo, solución del modelo, validación del modelo e implementación de la solución.

La investigación de operaciones ha sido aplicada exitosamente en la planeación de sistemas de recolección de residuos sólidos para la toma de decisiones en los niveles estratégicos, tácticos y operativos. En la práctica se han utilizado modelos de localización para ubicar rellenos sanitarios, ETs y contenedores en zonas residenciales (Ghiani G. , Laganà, Manni, & Triki, 2012). Asimismo, se han abordado tanto decisiones tácticas de asignación de frecuencia y zonificación (Sahoo, Kim, Kim, Kraas, & Popov Jr, 2005) como decisiones operativas de enrutamiento (Ghiani, Mourão, Pinto, & Vigo, 2015) y asignación de personal (De Bruecker, Beliën, De Boeck, De Jaeger, & Demeulemeester, 2018).

El lector interesado puede recurrir a (Ghiani G., Laganà, Manni, Musmanno, & Vigo, 2014) para una revisión reciente enfocada en decisiones como la localización de instalaciones (rellenos sanitarios o ETs) que permitan minimizar los costos asociados con la recolección de estos residuos. Y otras decisiones estratégicas y tácticas (zonificación, asignación de frecuencias, composición de flota, enrutamiento, entre otros). Adicionalmente, en (Beliën, De Boeck, & Van Ackere, 2014) se presenta una revisión enfocada en el enrutamiento de los vehículos recolectores.

En el ámbito colombiano, la investigación de operaciones se ha usado para la planeación de sistemas de recolección de residuos tanto residenciales como peligrosos o para reciclaje. Por ejemplo, en (Manyoma , Orejuela, Torres, Marmolejo, & Vidal, 2015) se estudió la localización de rellenos sanitarios con posibilidades de expansión futura para abordar el problema causado por el número de rellenos que han llegado al final de su vida útil en Colombia y otros países emergentes. Utilizando un modelo de optimización multiobjetivo, los autores de este trabajo exploraron el *trade-off* entre costos de operación y el riesgo ambiental para un caso colombiano en el centro del Valle del Cauca. De igual manera, en (Medaglia, Villegas, & Rodríguez-Coca, 2009) se estudia la ubicación de ETs para la recolección de residuos hospitalarios peligrosos con un modelo de optimización biobjetivo que se resuelve con un algoritmo genético.

Recientemente, el interés por el aprovechamiento de los residuos en el marco de proyectos de economía circular como *waste-to-energy* o simbiosis industriales ha abierto nuevas oportunidades de aplicación de modelos de optimización y métodos heurísticos de solución. Por ejemplo, la presentada en (Rivera-Cadavid, Manyoma-Velásquez, & Manotas-Duque, 2019) donde se aprovechan los residuos de caña de azúcar para la cogeneración de energía y las presentadas en (Aguirre-Gonzalez & Villegas, 2017) (Patiño Chirva, Daza Cruz, & López-Santana, 2016) donde se aborda el diseño de rutas de recolección para el aprovechamiento de residuos.

En particular, para la determinación del tamaño de flota en la recolección de residuos sólidos se aprovecha la posibilidad de realizar múltiples viajes con el mismo vehículo en un día. Esta característica da como resultado el problema de enrutamiento de vehículos con ventanas de tiempo y múltiples viajes como el que se estudia en (Battara, Monaci, & Vigo, 2009). En este trabajo, los autores generan inicialmente las rutas con un problema de enrutamiento de vehículos con ventanas de tiempo y en una segunda etapa las agrupan en viajes realizados por un mismo vehículo compactador para minimizar el tamaño de la flota.

Asimismo, en (Quan Li, Borenstein, & Mirchandani, 2008) se estudió la programación de rutas de recolección de residuos en un contexto similar en el cual las rutas de recolección están fijas. En una aplicación real realizada en la ciudad de Porto Alegre (Brasil) se busca minimizar los costos de recolección que incluyen los costos fijos (de la flota) y variables asociados con la realización de las rutas. Aunque dicho problema puede resolverse eficientemente en algunos casos, el objetivo de balance de residuos que llegan a las instalaciones de transferencia y reciclaje hizo necesario que los autores de este estudio recurrieran a métodos heurísticos inspirados para el problema de asignación generalizada.

(Melián, Moreno, & Moreno, 2003) indican que un heurístico es un procedimiento para el cual se tiene un alto grado de confianza en que encuentra soluciones de buena calidad con un coste computacional razonable, aunque no se garantice su optimalidad o factibilidad. Este tipo de procedimiento se caracteriza por ser iterativo, con cada iteración se busca una nueva solución que puede llegar a ser mejor o no a la solución inicial.

En este proyecto se utilizaron métodos heurísticos para la programación de las rutas en un día particular, se considera una función objetivo que ha sido estudiada con antelación en la literatura en el denominado *truck allocation problem* (Beliën, De Boeck, & Van Ackere, 2014). Esta es la minimización del número de rutas que llegan a la ET en una hora determinada con el fin de prevenir la formación de colas y el colapso de la operación interna. Por otro lado, se realizó un análisis de sensibilidad con el objetivo de determinar los recursos necesarios para la viabilidad operativa de la ET. Este análisis permitió identificar la sensibilidad de los parámetros del modelo. Los parámetros sensibles son aquellos que no pueden cambiar sin modificar la solución óptima (Hillier & Lieberman, 2010).

4. Metodología

Para llevar a cabo el proyecto, se analizó su alcance y se determinaron cuatro fases principales mediante las cuales fue posible conocer el proceso actual de recolección de residuos, definir el tamaño de flota óptima de vehículos compactadores cuando la ET inicie

su operación y asignar las microrrutas que realizará cada vehículo durante el día laboral logrando un balance en la llegada de vehículos a la ET.

Por otro lado, el proyecto realizado en conjunto por la firma consultora Logística Consultoría e Integración y la organización EMVARIAS permitió realizar un análisis de sensibilidad a partir de variables como el número de tráilers, tractocamiones externos e internos que permitan atender la demanda de residuos que llegan a la ET y contribuyan a la disminución de cola al interior de la misma. Para esta última fase se usó un modelo de simulación de eventos discretos, su construcción no se contempla en este trabajo.

4.1. Diagnóstico del proceso actual

A partir de la información suministrada por EMVARIAS sobre la generación de residuos sólidos en Medellín para el año 2019 e inicios del 2020, se procedió a realizar el análisis estadístico del comportamiento de dicha generación de residuos para el cual se considera una serie de eventos presentados durante la operación. En la *ilustración 2* se observan los eventos que ocurren en la operación actual (desplazamiento de los vehículos compactadores hasta el relleno sanitario La Pradera).



Ilustración 2. Ciclo actual de recolección de residuos sólidos. Fuente: Elaboración propia.

El primer evento ocurre con la *salida de la base de operaciones*, la cual se registra cuando un vehículo compactador sale de la base para llegar a un punto específico de la ciudad e *iniciar el proceso de recolección en una de las microrrutas*. Una vez recolectadas las toneladas en la microrruta, el vehículo se dispone a salir del lugar para dirigirse al relleno sanitario, en ese momento se marca la *finalización de la microrruta*. El siguiente evento

ocurre con el *ingreso del compactador al relleno sanitario La Pradera*, donde se dispone a realizar la descarga de residuos sólidos y lixiviados. Cuando se termina el proceso completo de descarga (registro, pesado en báscula, descarga de lixiviados y descarga de residuos sólidos), el vehículo compactador se dispone a *salir del relleno* y dirigirse a la base de operaciones. Con el *ingreso a la base de operaciones* se registra el fin del ciclo completo de la microrruta realizada por un vehículo compactador.

4.2. Modelación matemática

Las ETs permiten la descarga de residuos de vehículos compactadores a contenedores o vehículos de mayor capacidad, lo cual evita que los compactadores se desplacen hasta los rellenos sanitarios. Esto permite que se obtenga una reducción en los tiempos de recorrido y que aumente el número de viajes que pueden hacer los compactadores a las microrrutas. En Medellín, una ciudad en la que se tienen definidas las microrrutas en las que se realiza la operación, una implementación de una ET conlleva a una reducción en la flota de vehículos y un ahorro en los costos operativos. Por ello, a través de la aplicación de técnicas de programación lineal se desarrolló un modelo matemático para determinar el tamaño óptimo de la flota.

El modelo de optimización se formuló como un modelo bi-objetivo lexicográfico con el cual se obtiene el número de vehículos necesarios para prestar el servicio y adicionalmente, se logra balancear la cantidad de toneladas recolectadas durante cada día por estos vehículos compactadores. A continuación, se presenta la notación utilizada para la formulación del modelo matemático.

Conjuntos

- ***M***: Conjunto de microrrutas en las cuales se lleva a cabo la operación de recolección de residuos sólidos.
- ***F***: Conjunto de frecuencias, define las combinaciones posibles de días de recolección para las microrrutas, por ejemplo: lunes-jueves, lunes-miércoles-viernes.
- ***D***: Conjunto de días de la semana en los cuales se realiza la operación.

Parámetros

Microrrutas

- $duracion_m$: Duración del proceso de recolección de la microrruta $m \in M$.
- ton_m : Toneladas promedio recolectadas en la microrruta $m \in M$.
- $tInicio_m^{BO}$: Tiempo desde la base de operaciones al inicio de la microrruta $m \in M$.
- $tInicio_m^{ET}$: Tiempo desde la ET al inicio de la microrruta $m \in M$.
- $tFin_m$: Tiempo desde la microrruta $m \in M$ a la ET.
- $freqActual_m$: Frecuencia actual de recolección en la microrruta $m \in M$.
- $reqVisitas_m$: Número de recolecciones en la semana para la microrruta $m \in M$.
- mc : Máximo número de microrrutas que pueden cambiar de frecuencia.

Frecuencias

- $Nvisitas_f$: Número de visitas que se requieren en la frecuencia $f \in F$.
- $Visita_{df}$: Parámetro binario, toma el valor de 1 si la frecuencia $f \in F$ incluye el día $d \in D$ y 0 en caso contrario.

Constantes

- tET : tiempo de servicio en la ET.
- tET_Base : Tiempo de recorrido desde la ET a la Base de Operaciones.
- $dispVehiculosDia$: Tiempo disponible de los vehículos durante cada día para ejecutar el proceso de recolección de residuos sólidos.
- ϵ : Número real muy pequeño.

VARIABLES DE DECISIÓN

Para determinar el tamaño de flota se definen las siguientes variables:

- Y : Número de vehículos compactadores requeridos para realizar la recolección.
- X_{mf} : Variable binaria, toma el valor de 1 si la microrruta $m \in M$ está asignada a un vehículo en la frecuencia $f \in F$ y 0 en caso contrario.
- C_m : variable binaria, es igual a 1 si la microrruta $m \in M$ cambia de frecuencia en la nueva planeación y 0 en caso contrario.
- W_d : Cantidad de toneladas de residuos sólidos recolectados en el día $d \in D$.
- W_{min} : Cantidad mínima de toneladas de residuos sólidos recolectados.
- W_{max} : Cantidad máxima de toneladas de residuos sólidos recolectados.

Función objetivo

La función bi-objetivo tiene como objetivo prioritario la reducción del tamaño de flota de los vehículos compactadores para la operación en la ET y luego, minimizar la diferencia de toneladas mínima y máxima recolectadas a lo largo de los días de la semana.

$$\text{Min } Y + \epsilon(W_{\max} - W_{\min}) \quad (1)$$

Restricciones

La función objetivo está sujeta a las siguientes restricciones:

$$\bullet \sum_{f \in F} X_{mf} = 1 \quad \forall m \in M \quad (2)$$

$$\bullet \sum_{f \in F} N_{visitas_f} X_{mf} = req_{visitas_m} \quad \forall m \in M \quad (3)$$

$$\bullet \frac{\sum_{m \in M} \sum_{f \in F} \text{Visita}_{df} * X_{mf} * (\text{duracion}_m + \max[\text{tInicio}_m^{ET}, \text{tInicio}_m^{BO}] + \text{tFin}_m + \text{tET} + \text{tET}_{Base})}{dispVehiculosDia} \leq Y \quad \forall d \in D \quad (4)$$

$$\bullet \sum_{m \in M} \sum_{f \in F} ton_m X_{mf} \text{visita}_{df} = W_d \quad \forall d \in D \quad (5)$$

- $W_{min} \leq W_d \leq W_{max}$ (6)

- $C_m \geq 1 - X_{mf} \quad \forall m \in M, f = freq_m$ (7)

- $\sum_{m \in M} C_m \leq mc$ (8)

- $Y \in Z^+$ (9)

- $X_{mf} \in \{0,1\} \quad \forall m \in M, f \in F$ (10)

- $C_m \in \{0,1\} \quad \forall m \in M$ (11)

- $W_d > 0 \quad \forall d \in D$ (12)

- $W_{min}, W_{max} > 0$ (13)

El primer término de la función objetivo (1) busca minimizar el número de vehículos compactadores, teniendo en cuenta que con esta cantidad se cubrirá la totalidad de microrrutas, mientras que la segunda parte (multiplicada por un número muy pequeño ϵ) minimiza (lexicográficamente) la diferencia de toneladas mínima y máxima recolectadas a lo largo de los días de la semana, para que de esta manera se logre un balance en las toneladas recolectadas diariamente. Las restricciones (2) y (3) garantizan que una microrruta sólo se asignará a un vehículo en una frecuencia que sea compatible y que dicha frecuencia a su vez será compatible con el número de recolecciones semanales en el que se debe visitar la microrruta ($reqVisitas_m$). El conjunto de restricciones (4) asegura que se tiene la suficiente disponibilidad de flota para atender todas las microrrutas, dados los tiempos de inicio de la operación en las microrrutas (desde la ET o la Base de Operaciones), la duración de la microrruta, el tiempo de finalización de la operación, el tiempo de descargue en la ET y la disponibilidad diaria de operación para los vehículos. Las restricciones (5) acumulan cada día las toneladas de las microrrutas asignadas a frecuencia que incluyan ese día en específico de la semana. Que las toneladas recolectadas se encuentren entre la cantidad mínima y máxima recolectadas en la semana se garantiza a través de las restricciones (6). Por su parte, las restricciones (7) y (8) cuentan y controlan la cantidad de microrrutas que son cambiadas de frecuencia (con un valor máximo mc) teniendo en cuenta que sólo pueden cambiarse para aquellas que incluyan la misma cantidad de visitas semanales en las restricciones (3) y considerando la asignación actual de cada microrruta. Finalmente, las restricciones (9), (10), (11), (12) y (13) indican la naturaleza de las variables de decisión.

4.3. Heurístico de secuenciación

Cuando inicie la operación en la ET, se espera un ciclo de recolección de residuos como el que se visualiza en la *ilustración 3*. Durante este ciclo, cada vehículo compactador realizará dos microrrutas por turno, la primera tiene como punto de partida la base de operaciones y la segunda parte desde la ET. Esto quiere decir que diariamente un vehículo podrá realizar cuatro microrrutas.

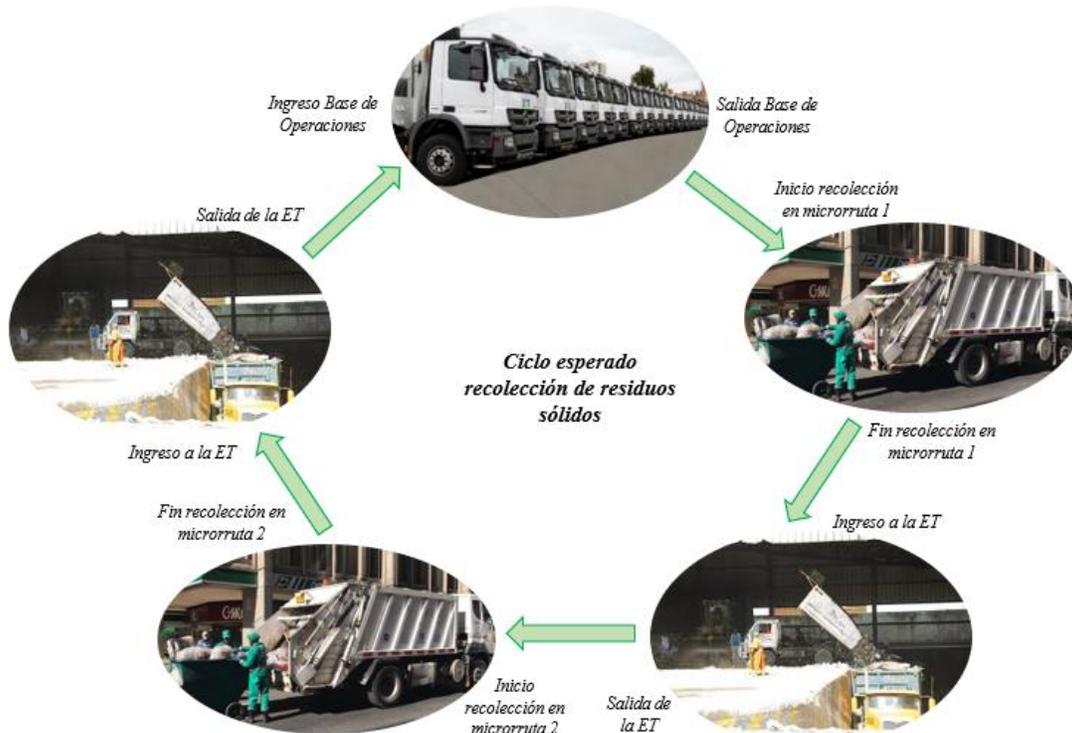


Ilustración 3. Ciclo esperado de recolección de residuos sólidos. Fuente: Elaboración propia.

Para la programación de las microrrutas que deben realizar los vehículos cada día se desarrolló un algoritmo heurístico bajo la lógica del problema de secuenciación de máquinas paralelas (Rardín, 1998). Este algoritmo está compuesto de una fase de construcción aleatorizada y una fase de mejora para el balanceo. La implementación de las dos fases tiene como fin realizar una asignación de las microrrutas a los vehículos de tal manera que se logre balancear la llegada de los mismos a la ET con el fin de evitar la congestión que pueda generarse en su interior.

La fase de construcción aleatorizada consiste en asignar las microrrutas a los vehículos teniendo en cuenta los posibles recorridos que puede realizar. Los vehículos compactadores pueden seguir dos rutas, la primera tiene como punto de partida la base de operaciones y la

segunda ruta parte desde la ET, ésta última ruta se lleva a cabo sólo si el vehículo ha realizado su primera microrruta y tiene la posibilidad de hacer un segundo recorrido sin exceder la jornada laboral. El esquema general de esta fase se observa en la *ilustración 4*.

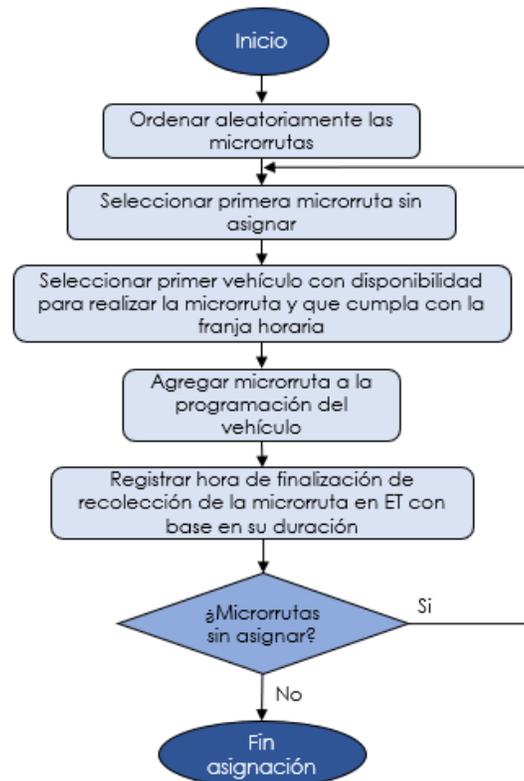


Ilustración 4. Esquema de la fase de construcción aleatorizada para la asignación de microrrutas a vehículos compactadores. Fuente: Elaboración propia.

La fase de mejora consiste en lograr un mejor balanceo en la llegada de vehículos a la ET, para esto se tiene como objetivo minimizar la cantidad de vehículos que llegan por hora a la instalación. Mediante las alternativas cambio de hora de inicio en la recolección de las microrrutas e intercambio de orden de visita en las microrrutas de un mismo vehículo, se puede mejorar los resultados obtenidos en la fase de construcción, es decir, se puede mejorar el balance. Teniendo la cantidad de vehículos que llegan por hora a la ET se implementa la mejora mientras se encuentre una solución que mejore el resultado anterior. En estas alternativas se analiza sistemáticamente el efecto de desplazar (en hasta tres pasos de 30 minutos adelante o atrás) la hora de inicio de la primera ruta de cada vehículo compactador que está involucrado en la franja horaria crítica. Y cuando esta modificación no surte efecto se analiza también la posibilidad de intercambiar sistemáticamente el orden de las microrrutas consecutivas de los vehículos que llegan en la franja horaria crítica.

La fase de mejora finaliza cuando se encuentre un óptimo local, es decir, un resultado mejorado que ayude a disminuir la cantidad de vehículos que llegan por hora a la ET. Al

terminar, se reporta el mejor balance obtenido con el heurístico (un óptimo local para los dos procedimientos de mejora). Esta fase se aprecia en la *ilustración 5*.

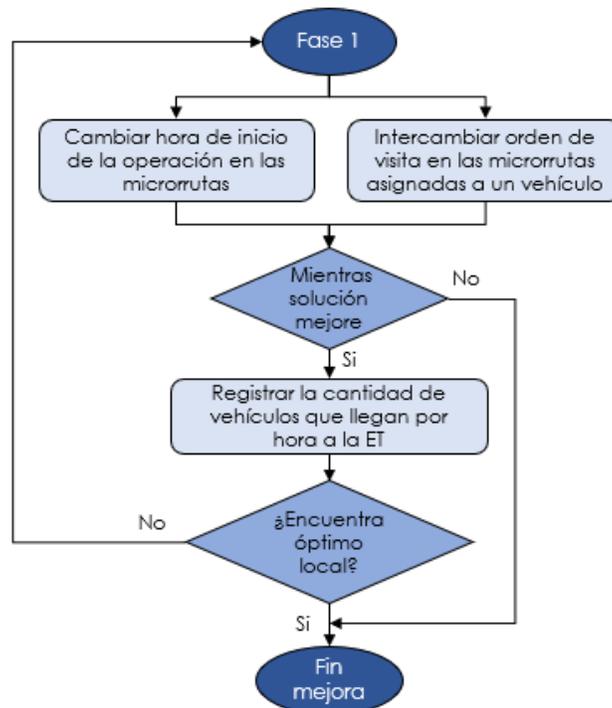


Ilustración 5. Esquema de la fase de mejora para la asignación de microrrutas a vehículos compactadores.
Fuente: Elaboración propia.

4.4. Simulación

En este estudio se utilizó un modelo de simulación de eventos discretos con el objetivo de determinar la cantidad de recursos necesarios para la operación interna de la ET de manera que esta sea viable operativamente y pueda reducirse el tiempo de los vehículos compactadores al interior de la misma. Esto implica determinar a partir de la simulación la cantidad de tráilers y tractocamiones internos y externos.

Para esto se realizó un análisis de sensibilidad en el cual se varió la cantidad de estos recursos teniendo en cuenta la distribución de llegada de vehículos compactadores para el año en que la ET entre en operación generada con el proceso de secuenciación y el rango de colas máximas que pueden haber dentro de la instalación para los vehículos compactadores y tractocamiones.

5. Resultados y análisis

En la primera fase de este estudio se llevó a cabo el análisis de la operación actual para la cual se determinó que la recolección de tipo domiciliaria es la que representa el mayor porcentaje de los residuos recolectados en la ciudad, siendo este alrededor del 80% (ver *ilustración 6*). Por su parte, la recolección comercial representa el 10% y el porcentaje restante corresponde a recolección industrial y otros tipos de recolección especiales definidos por la empresa.

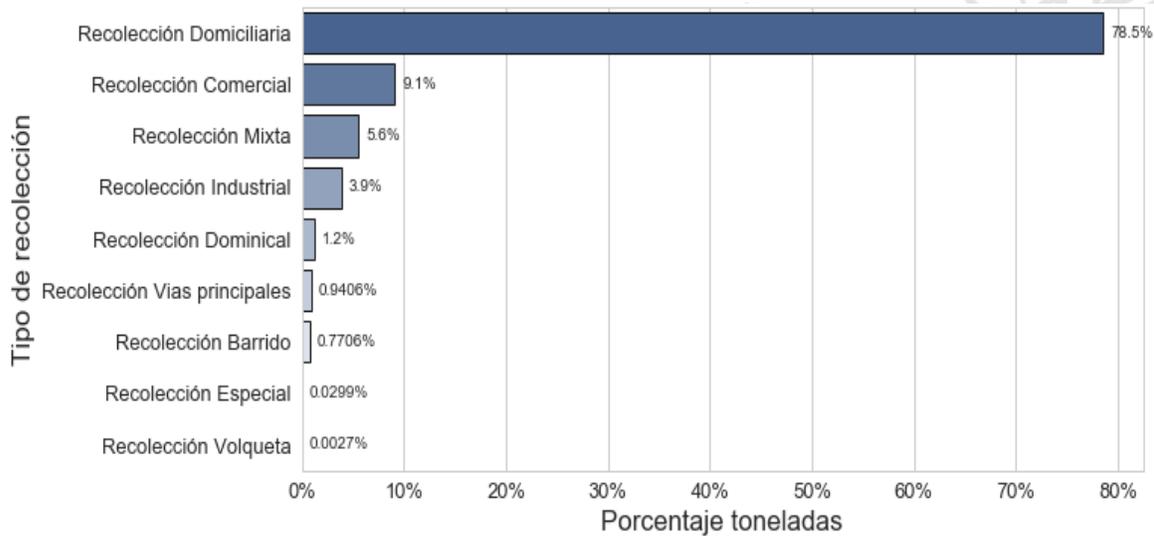


Ilustración 6. Toneladas de residuos sólidos recolectados por tipo de recolección. Fuente: LCI.

Teniendo en cuenta que actualmente los vehículos compactadores transportan los residuos hasta el relleno sanitario La Pradera, se realiza el análisis de toneladas de residuos descargados por día en el relleno, para el cual se percibe en la *ilustración 7* una tendencia positiva en las frecuencias lunes – martes – miércoles y jueves – viernes – sábado. El objetivo es lograr un balance en las toneladas recolectadas cuando inicie la operación en la ET. Para el domingo, la situación cambia debido a que este día no se realiza recolección domiciliaria que es la más representativa.

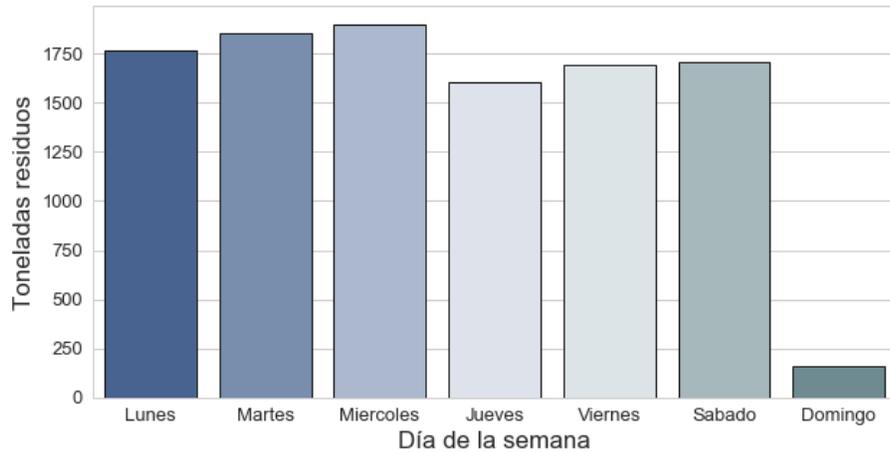


Ilustración 7. Toneladas promedio recolectadas semanalmente. Fuente: LCI.

Las microrrutas atendidas se dividen en nueve zonas en las cuales se recolecta en promedio ocho toneladas de residuos sólidos con un tiempo promedio de recolección de tres horas. En la actualidad, diariamente se visitan la misma cantidad de microrrutas (más de 200), a excepción del domingo, donde la recolección constituye menos del 20% respecto a los demás días.

Actualmente, el largo trayecto que recorren los vehículos hasta el relleno sanitario conlleva a que sólo puedan realizar una microrruta por turno. Se obtuvo un tiempo de operación para los vehículos compactadores entre cuatro y siete horas desde que estos salen de la base de operaciones hasta que ingresan a La Pradera, por estos tiempos, para algunos compactadores no será factible realizar una segunda microrruta sin superar las horas legales de trabajo permitidas. Lo que se busca cuando comience la operación en la ET es que se puedan cubrir durante un turno dos microrrutas ya que el tiempo de desplazamiento se reducirá por la ubicación de la ET en la ciudad.

Hoy en día, en La Pradera realizan la operación de descarga otros municipios de Antioquia, los cuales se deberán tener en cuenta cuando la ET comience su operación. Los vehículos encargados de llevar a cabo la operación en los municipios no se tienen en cuenta dentro de la flota estimada en este estudio. En este sentido es importante definir los rangos horarios adecuados para que estos vehículos lleguen a la ET sin generar colas que hagan colapsar el sistema.

Luego del análisis del proceso actual, se procedió a implementar un modelo matemático (1) – (13) en el software de optimización Xpress, teniendo en cuenta una proyección en el crecimiento de toneladas de 2023 a 2038. Mediante este modelo el cual considera los tiempos efectivos de operación de los vehículos durante la recolección de residuos sólidos, se obtuvo una reducción del 30% en la cantidad de vehículos compactadores para el año en que la ET iniciará su operación respecto a la flota con la cual actualmente se ejecuta la

operación. Para el último año proyectado (2038) la reducción es cercana al 10%. Esta reducción se presenta debido a la disminución del tiempo (cerca del 40%) dedicado al transporte de residuos con la nueva ET. Estar más cerca de las microrrutas al realizar la descarga de residuos, permite que los vehículos compactadores puedan llevar a cabo más viajes durante el día respecto a los que realizan en la actualidad.

En la *ilustración 8* se percibe la cantidad de vehículos compactadores necesarios para llevar a cabo la recolección en las microrrutas en los años siguientes a la entrada en operación de la ET. Esta cantidad considera la flota con la cual se realizó la programación de microrrutas. Para esta se utilizaron más vehículos de los que fueron determinados a partir del modelo matemático debido a que por restricciones en las franjas horarias de las zonas no fue posible programar la totalidad de microrrutas con el tamaño de flota determinado, el cual aumentó en un 4% para el primer año proyectado.

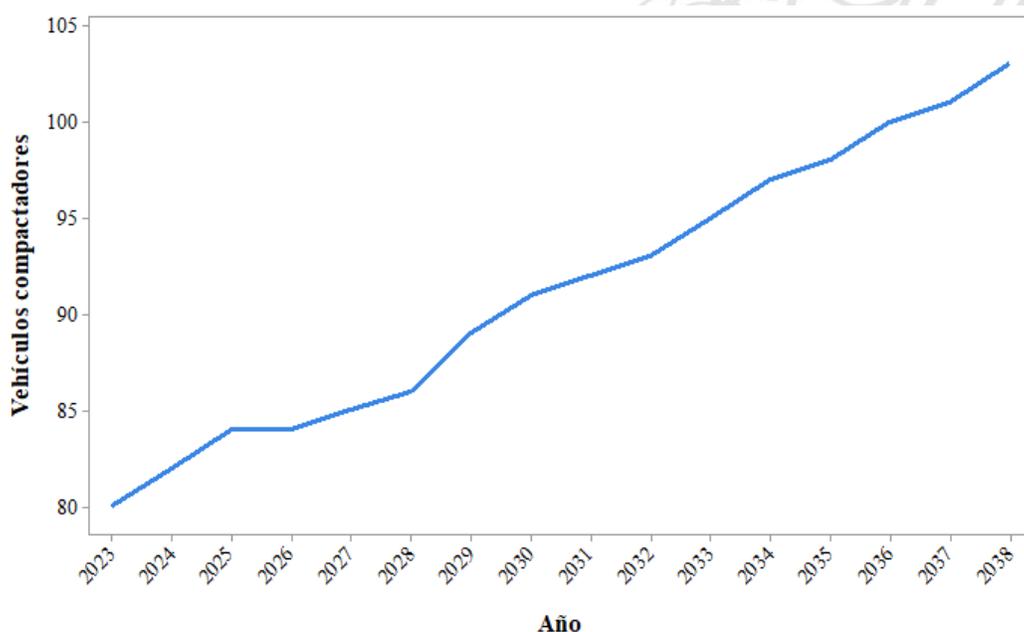


Ilustración 8. Proyección del tamaño de flota de vehículos compactadores. Fuente: Elaboración propia.

Al considerar un cambio en las frecuencias de realización de las microrrutas, se obtuvo un mejor balance de las toneladas recolectadas diariamente (ver *ilustración 9*). Con tan sólo un cambio de frecuencia del 10% de las microrrutas se logra un rango inferior a una tonelada recibida entre los diferentes días de la semana (i.e., la diferencia entre el día de mayor recolección y el de menor recolección). Es de anotar que en la situación inicial (con las frecuencias actuales) este rango es de 121 toneladas. El mejor balanceo de los residuos recolectados también trae consigo una reducción del 4% en el tamaño de la flota.

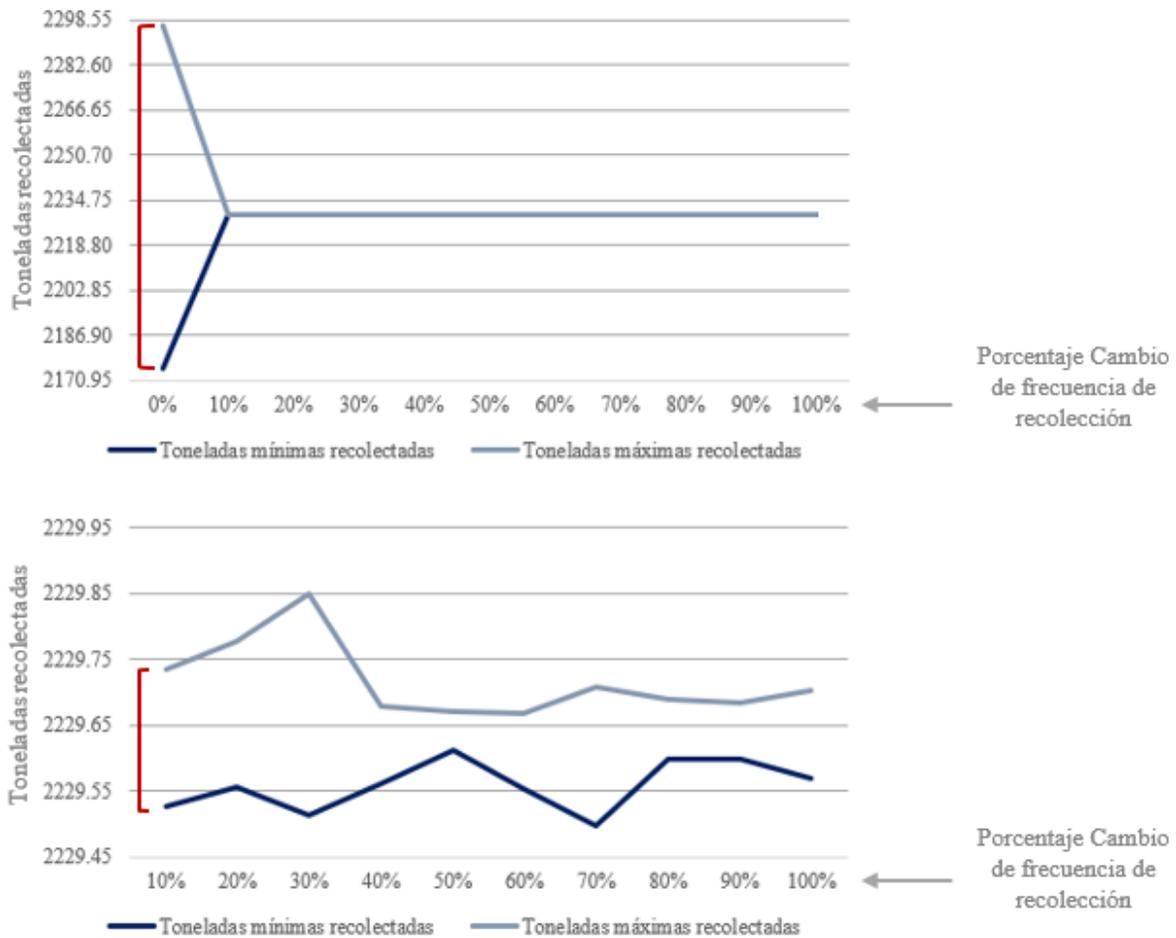


Ilustración 9. Cantidad de toneladas recolectadas dado el cambio porcentual en las frecuencias de recolección. Fuente: Elaboración propia.

Para realizar la asignación de microrrutas y obtener el balance de llegada de vehículos compactadores a la ET se hizo uso del lenguaje de programación Visual Basic para Aplicaciones de Excel (VBA) para desarrollar el algoritmo heurístico.

Para el primer año proyectado, en el cual la ET habrá comenzado su operación, se presentan los resultados obtenidos con el heurístico. Con la primera fase, correspondiente a la construcción aleatorizada, se obtiene la llegada de vehículos a la ET representada en la *ilustración 10*. La hora crítica se presenta en la tarde, en la cual 29 vehículos finalizan el 12.3% de las microrrutas e ingresan a la ET para realizar la respectiva descarga de residuos sólidos, durante esta hora aumenta la cola generada al interior de la ET ya que todos los vehículos pasan por unas operaciones internas de descarga en las que se permite un vehículo a la vez. Con la implementación de la primera fase de construcción aleatorizada aproximadamente el 17% de vehículos puede realizar entre una y dos microrrutas diarias. Para la operación en la nueva ET no resulta rentable operar un vehículo para realizar

únicamente uno o dos viajes tal como se realizan actualmente para transportar y descargar los residuos sólidos en el relleno sanitario La Pradera. No obstante, en los resultados obtenidos se evidenció que la aleatorización de las microrrutas es un factor influyente en la asignación y puede ser una de las causas por las cuales algunos vehículos no alcanzan a realizar más de dos microrrutas, lo esperado es que completen hasta cuatro. Este objetivo se alcanza con la fase de mejora.

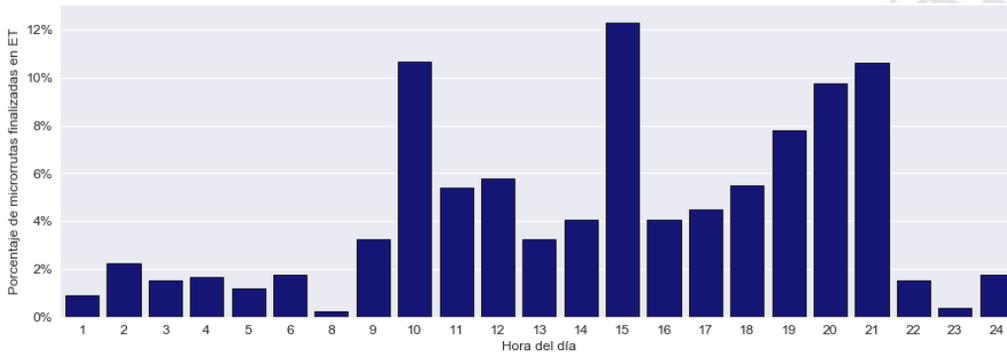


Ilustración 10. Comportamiento de la llegada de vehículos compactadores a la ET después de la recolección de residuos en las microrrutas bajo la aplicación de la fase de construcción aleatorizada. Fuente: LCI.

Al implementar ambas fases del heurístico, se estima que el 6.5% de los vehículos realizarán dos microrrutas al día y el porcentaje restante se encargará de hacer la recolección de residuos sólidos en tres o cuatro microrrutas con las cuales se completa el tiempo disponible de operación efectiva para los vehículos compactadores durante el día. Esto indica que aproximadamente el 94% de los vehículos van a realizar diariamente entre tres y cuatro microrrutas. Bajo este escenario, el porcentaje de vehículos que arriba a la ET en la hora crítica disminuye en aproximadamente 14%. En la *ilustración 11*, se aprecia el resultado obtenido con la implementación de las dos fases del heurístico, en este caso, para la hora crítica los vehículos llegan a descargar los residuos del 10.3% de las microrrutas promedio atendidas diariamente.

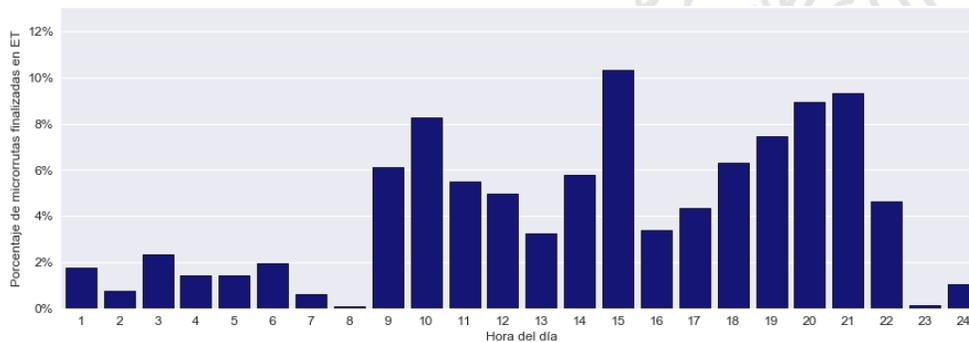


Ilustración 11. Comportamiento de la llegada de vehículos compactadores a la ET después de la recolección de residuos en las microrrutas bajo la aplicación de las fases de construcción aleatorizada y mejora. Fuente: LCI.

Comparando las *ilustraciones 10 y 11* se observa como mediante la asignación aleatorizada y las mejoras implementadas con el heurístico se pudo obtener un mejor balance en la llegada de vehículos a la ET en horas críticas. Por otro lado, con la reducción en los tiempos de llegada a la nueva instalación se logra que los vehículos tengan una mayor utilización debido a que realizan la operación en una cantidad de microrrutas que supera los viajes realizados actualmente.

Teniendo en cuenta la cantidad de limitaciones definidas para el modelo, se pudo dar cuenta de que, flexibilizando la restricción correspondiente a las franjas horarias de recolección, se mejora mucho más el balance de llegada de vehículos a la ET como se observa en la *ilustración 12*. Además de mejorar el balance, las microrrutas se logran cubrir con la cantidad de vehículos obtenida en el modelo de optimización. A pesar de que los resultados son más deseables, deben tenerse en cuenta las restricciones del modelo para poder llegar a una representación del sistema real.

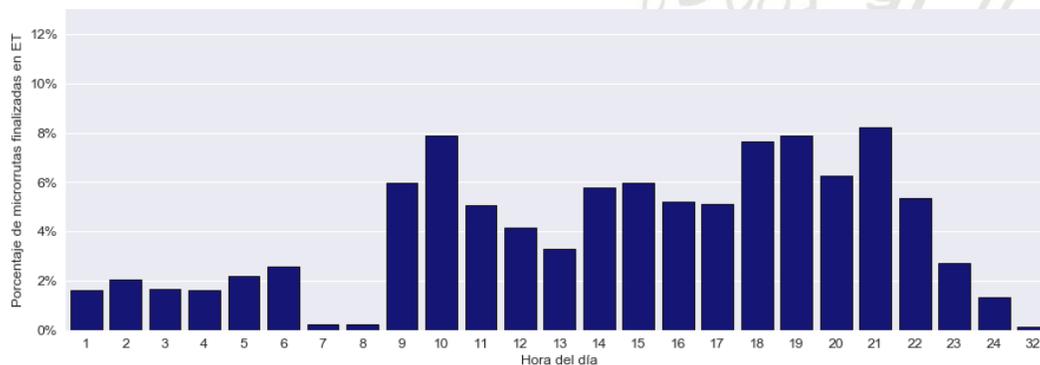


Ilustración 12. Comportamiento de la llegada de vehículos compactadores a la ET al cambiar las restricciones en las franjas horarias de recolección. Fuente: LCI.

Con el fin de evaluar el desempeño al interior de la nueva ET utilizando el tamaño de la flota de vehículos compactadores determinado y la programación de microrrutas propuesta, se hizo uso del modelo de simulación de eventos discretos desarrollado en el software Flexsim (ver *ilustración 13*). Este modelo permitió determinar la cantidad de recursos que se necesitan como tráilers y tractocamiones internos y externos con los que la ET sea viable operativamente.



Ilustración 13. Modelo Estación de Transferencia. Fuente: LCI.

Se analizó el comportamiento de llegada y las colas generadas en la báscula ubicada antes de pasar a los puntos de descarga. Esta resulta ser una cola crítica en la instalación, su formación depende de la disponibilidad de puntos de descarga, de tráilers y tractocamiones internos, si en un momento determinado ninguno de estos recursos está disponible o se encuentra ocupada la báscula se empezará a formar cola al interior de la ET. La cola máxima que puede formarse en este punto es de 12 compactadores.

Se hicieron varias corridas del modelo aumentando cada recurso en una unidad, los valores plasmados en la *tabla 1* son claves para representar el cambio en los indicadores para el año 2023. Con estos resultados se concluyó que para una operación efectiva al interior de la ET se requieren 35 tráilers en los cuales los compactadores puedan depositar los residuos, 20 tractocamiones externos los cuales se van a encargar de enganchar los tráilers y llevarlos hasta el relleno sanitario y 5 tractocamiones internos que se van a utilizar para desplazar los tráilers dentro de la ET. Con esto la máxima cola que se puede formar en este punto es 12 y dentro de la ET hay capacidad para que lleguen este máximo de vehículos. De acuerdo con estos resultados, en promedio un compactador esperará en cola 2 minutos y pasará en promedio 23 minutos dentro de la estación mientras pasa por todas las operaciones internas para poder realizar la respectiva descarga de residuos. Los días en que se presenta mayor estancia de los vehículos compactadores en la ET son los martes, miércoles y jueves durante un tiempo que oscila entre 40 y 50 minutos.

Tráilers	Tractocamiones	Cabezotes internos	Compactadores					
			Cola máx	Cola prom	Tiempo máx en cola (min)	Tiempo prom en cola (min)	Tiempo máx en ET (min)	Tiempo prom en ET (min)
21	18	4	35	3	148	20	169	40
29	18	4	18	2	77	15	98	35
35	20	5	12	0.5	24	2	48	23
40	20	5	12	0.17	25	2	47	22

Tabla 1. Resultados indicadores ET para 2023. Fuente: LCI.

El tiempo de simulación fue de 6.5 horas en el cual se excluyen las microrrutas llevadas a cabo solamente el domingo ya que son pocas y la llegada de los vehículos no generarían colapsos al interior de la ET.

Mediante la simulación se encontró que los 20 tractocamiones externos realizan semanalmente entre 23 y 25 viajes, lo cual corresponde a 3.4 viajes en promedio por día. El uso de este recurso permitirá una eficiencia en la operación para la ET, su disponibilidad en horas críticas contribuye a la reducción en las colas de compactadores. Al disminuir la cantidad de este recurso se evidencia mayores colas en el sistema, puesto que habrá menos disponibilidad para transportar los tráilers cargados a La Pradera y volverlos a dejar vacíos en la ET para que los compactadores realicen la operación de descarga.

6. Conclusiones

La etapa inicial del proyecto permitió llevar a cabo un análisis inicial del proceso, conocer la operación y el comportamiento de generación de residuos a partir de los cuales fue posible el planteamiento y desarrollo de los modelos para tomar decisiones en torno a la mejora del proceso actual.

Los modelos matemáticos son una gran herramienta para apoyar la toma de decisiones tácticas de la operación de recolección y transporte de residuos sólidos. En este trabajo se desarrolló un modelo matemático con el objetivo de determinar el tamaño óptimo de flota de vehículos compactadores para cubrir el total de microrrutas en los años siguientes a la entrada en operación de una nueva ET. Mediante la aplicación de este modelo se evidenció una reducción entre el 10% y 30% de la flota de vehículos para los años proyectados respecto al tamaño de flota con el que opera la empresa en la actualidad. Esta disminución se obtuvo gracias a la reducción en el tiempo de transporte de residuos sólidos por parte de los vehículos compactadores.

Para secuenciar la llegada de vehículos a la ET se realizó la programación mediante un algoritmo heurístico compuesto de dos fases. La primera fase consiste en una construcción

aleatorizada en la que se realiza una asignación de microrrutas a los vehículos compactadores y la segunda fase permite realizar una mejora de la asignación inicial con el objetivo de balancear la llegada de vehículos a la ET, esta mejora se obtiene a partir de dos alternativas: cambio de hora de inicio de recolección e intercambio de microrrutas de un mismo vehículo. Se obtuvo un mejor balance en la llegada de vehículos a la ET al aplicar ambas fases del heurístico.

Este estudio permitió dar cuenta que la reducción del tiempo de transporte de residuos a la ET permite que los vehículos tengan un mayor nivel de utilización y más del 90% puedan realizar entre 3 y 4 microrrutas diarias, lo cual supera las microrrutas realizadas actualmente.

Para el continuo funcionamiento de la ET es indispensable la disponibilidad de tráilers vacíos para la descarga de residuos, la simulación evidenció que para el 2023 la cantidad óptima de tráilers es de 35 los cuales permiten minimizar las colas generadas al interior de la ET y la reducción de los tiempos de estancia de los vehículos compactadores. Además, se requieren 20 tractocamiones externos que apoyen la operación de transporte de residuos al relleno sanitario La Pradera, estos recursos son los encargados de llevar los tráilers vacíos a la ET de manera que los vehículos compactadores continúen con su operación de descarga de residuos.

Un estudio futuro para complementar este proyecto podría considerar la realización de un recocido simulado con el objetivo de mejorar la programación de realización de microrrutas y el balance la llegada de vehículos a la ET. Por otro lado, se puede realizar un ruteo de vehículos compactadores de manera que se logre disminuir los tiempos de realización de las microrrutas para que los vehículos completen las rutas esperadas diariamente y, por ende, se reduzca el tamaño de flota.

Así mismo, se podría considerar el efecto del cambio en las frecuencias de las microrrutas con el fin de conocer su impacto en la programación de las microrrutas y en la determinación del tamaño de flota. Por otro lado, se podría incluir la programación de las jornadas laborales para los transportistas y ayudantes dentro de la asignación de las microrrutas a los vehículos. Esto con el fin de incluir de mejor manera la legislación laboral que regula la asignación del personal a la operación y su bienestar.

7. Referencias bibliográficas

- Aguirre-Gonzalez, E. J., & Villegas, J. G. (2017). A two-phase heuristic for the collection of waste animal tissue in a Colombian rendering industry. *Communications in Computer and Information Science*, 742, 511-521.
- Alcaldía de Medellín. (2016-2027). *Seguimiento Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipio de Medellín*. Obtenido de <https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/pccdesign/medellin/Temas/MedioAmbiente/Publicaciones/Shared%20Content/Documentos/2019/SeguimientoPGIRS2019.pdf>
- Antunes, A. (1999). Location analysis helps manage solid waste in central Portugal. *Interfaces*, 29(4), 32-43.
- Banco Mundial. (20 de Septiembre de 2018). *Informe del Banco Mundial: Los desechos a nivel mundial crecerán un 70 % para 2050, a menos que se adopten medidas urgentes*. Obtenido de <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2018/09/20/global-waste-to-grow-by-70-percent-by-2050-unless-urgent-action-is-taken-world-bank-report>
- Banco Mundial. (20 de Septiembre de 2018). *Los desechos: un análisis actualizado del futuro de la gestión de los desechos sólidos*. Obtenido 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>
- Battara, M., Monaci, M., & Vigo, D. (2009). An adaptive guidance approach for the heuristic solution of a minimum multiple trip vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 36(11), 3041-3050.
- Beliën, J., De Boeck, L., & Van Ackere, J. (2014). Municipal Solid Waste Collection and Management. Problems: A Literature Review. *Transportation Science*, 48(1), 78-102.
- De Bruecker, P., Beliën, J., De Boeck, L., De Jaeger, S., & Demeulemeester, E. (2018). model enhancement approach for optimizing the integrated shift scheduling and vehicle routing problem in waste collection. *European Journal of Operational Research*, 266(1), 278-290.
- Ghiani, G., Laganà, D., Manni, E., & Triki, C. (2012). Capacitated location of collection sites in an urban waste management system. *Waste Management*, 32(7), 1291-1296.
- Ghiani, G., Laganà, D., Manni, E., Musmanno, N., & Vigo, D. (2014). Operations research in solid waste management: A survey of strategic and tactical issues. *Computers & Operations Research*, 44, 22-32.

- Ghiani, G., Mourão, C., Pinto, L., & Vigo, D. (2015). Routing in Waste Collection Applications. En *Arc routing: Problems, methods, and applications, Society for Industrial and Applied Mathematics* (págs. 351-370).
- Hillier, F., & Lieberman, G. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones*. México: Mc Graw Hill Education.
- Loarte Rubina, M., Huerta, F., Celi, K., & Cerna, B. (2016). Propuesta de implementación de estación de transferencia de residuos sólidos en la zona urbana del distrito de Huaraz. *Aporte Santiaguino*, 9(1), 15-26.
- Manyoma, P., Orejuela, J. P., Torres, P., Marmolejo, L. F., & Vidal, C. J. (2015). Landfill Location with Expansion Possibilities in Developing Countries. *International Journal of Industrial Engineering*, 22(2), 292-300.
- Medaglia, A. L., Villegas, J. G., & Rodríguez-Coca, D. M. (2009). Hybrid biobjective evolutionary algorithms for the design of a hospital waste management network. *Journal of Heuristics*, 15, 153-176.
- Melián, B., Moreno, J., & Moreno, J. (2003). Metaheurísticas: Una visión global. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 7-28.
- Miezah, K., Obiri-Danso, K., Kádár, Z., Fei-Baffoe, B., & Mensah, M. (2015). Municipal solid waste characterization and quantification as a measure towards effective waste management in Ghana. *Waste Management*, 46, 15-27.
- Mourão, M. C., Nunes, A. C., & Prins, C. (2009). Heuristic methods for the sectoring arc routing problem. *European Journal of Operational Research*, 196(3), 856-868.
- Noticias ONU. (12 de Octubre de 2018). *Cómo la basura afecta al desarrollo de América Latina*. Obtenido de <https://news.un.org/es/story/2018/10/1443562>
- O'Connor, D. (2013). *Solid Waste Collection Vehicle Route Optimization for the City of Redlands, California*. (Master's thesis, University of Redlands). Obtenido de https://inspire.redlands.edu/gis_gradproj/201/.
- Ojeda, L., & Quintero, W. (2008). Generación de residuos sólidos domiciliarios por periodo estacional: el caso de una ciudad mexicana. . *I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*. Castellón.
- Patiño Chirva, J. A., Daza Cruz, Y. X., & López-Santana, E. R. (2016). Hybrid Mixed-Integer Optimization and Clustering Approach to Selective Collection Services Problem of Domestic Solid Waste. *Ingeniería*, 21(2), 235-257.
- Quan Li, J., Borenstein, D., & Mirchandani, P. B. (2008). Truck scheduling for solid waste collection in the City of Porto Alegre, Brazil. *Omega*, 36(6), 1133-1149.

- Rada, E., Ragazzi, M., & Fedrizzi, P. (2013). Web-GIS oriented systems viability for municipal solid waste selective collection optimization in developed and transient economies. *Waste Management*, 33(4), 785-792.
- Rardín, R. (1998). *Optimization in Operations Research*. Prentice Hall.
- Rivera-Cadavid, L., Manyoma-Velásquez, P. C., & Manotas-Duque, D. F. (2019). Supply Chain Optimization for Energy Cogeneration Using Sugarcane Crop Residues (SCR). *Sustainability*, 11(23), 6565.
- Sahoo, S., Kim, S., Kim, B. I., Kraas, B., & Popov Jr, A. (2005). Routing optimization for waste management. *Interfaces*, 35(1), 24-36.
- Semana. (1 de Marzo de 2020). El 78% de los hogares colombianos no recicla. págs. <https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/el-78-de-los-hogares-colombianos-no-recicla/44231>.
- Seref, M., & Ahuja, R. (2008). Spreadsheet-based decision support systems. En *Handbook on Decision Support Systems 1* (págs. 277-298). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Sulemana, A., Donkor, E., Forkuo, E., & Oduro-Kwarteng, S. (2018). Optimal Routing of Solid Waste Collection Trucks: A Review of Methods. *Journal of Engineering*, 12.
- Taha, H. (2012). *Investigación de operaciones*. México: Pearson Education 9 ed.