

CAPÍTULO 11

MEJORAMIENTO AL SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS DE VILLAVICENCIO MEDIANTE UN MODELO DE TRANSPORTE (COMUNAS 2, 3, 6 Y 8)

Improvement to the solid waste collection system of Villavicencio through a transportation model. (Communes 2, 3, 6 and 8)

David Mauricio Patiño Ardila

Marly Fernanda Valderrama Gutiérrez

RESUMEN

Este capítulo describe la formulación de un modelo VRP para la recolección de basuras en las comunas 2, 3, 6 y 8 de la ciudad de Villavicencio producto de una iniciativa por un plan de mejora de la empresa prestadora del servicio Bioagrícola del Llano SAS. Bajo el sistema tradicional de recolección por aceras se evidencian inconvenientes como los altos costos operacionales implícitos al recorrer largas distancias (consumo de combustible, depreciación del vehículo, entre otros), y la contratación de mano obra. Además, inconvenientes ambientales al disponer de las basuras de esta forma debido a la formación de plagas y posible contagio de enfermedades. El proyecto cuenta con tres fases para su desarrollo, iniciando con la identificación de las variables de mayor relevancia en el planteamiento y ejecución del modelo a través de una revisión bibliográfica previa, luego se continúa con el desarrollo de un modelo de transporte estático de recolección de contenedores para la minimización de los costos teniendo en cuenta las restricciones y requerimientos de la empresa y los usuarios. Finalmente se realiza una contrastación del modelo actual de recolección por aceras y el modelo propuesto por contenedores comprobando las mejoras en la eficiencia operativa del proceso de recolección y disposición de residuos en la ciudad.



Palabras clave: macrorruta, microrruta, modelo de transporte, modelo estático, residuos sólidos.

ABSTRACT

This article describes the formulation of a VRP model for garbage collection in communes 2, 3, 6 and 8 of the city of Villavicencio as a result of an initiative for an improvement plan for the company that provides the SAS service of Bioagrícola of the Llano. Under the traditional system of collection by sidewalks, there are drawbacks such as the high operating costs implicit in traveling long distances (fuel consumption, depreciation of the vehicle, among others), the hiring of labor. In addition, environmental inconveniences to eliminate the garbage in this way due to the formation of plagues and the possible contagion of diseases. The project has three (3) phases for its development, starting with the identification of the most relevant variables in the approach and execution of the model through a previous bibliographic review, then continues with the development of a static transport model of collection of containers for the minimization of costs taking into account the restrictions and requirements of the company and the users, finally a comparison is made of the current model of collection by sidewalks and the model proposed by containers that verify the improvements in the operative efficiency of the process of collection and disposal of waste in the city.



Keywords: Macroroute, Microroute, Transport model, Static model, Solid waste.

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas con la llegada del nuevo siglo es el notable incremento en la generación de basuras y el mal procesamiento para su reutilización o destrucción. Este problema acoge muchos aspectos, desde cómo se producen las basuras, la carencia de una concientización de carácter social en los ciudadanos, su sistema de recolección, el procesamiento y la disposición final.

Colombia es un país en vía de desarrollo, que busca ser competitivo y reconocido en el mercado mundial. Para lograrlo se debe pensar en la calidad de vida de su fuerza de trabajo que son sus habitantes, para así obtener un mayor rendimiento en sus tareas. Esto incluye pensar en el ámbito salubre del país que es conformado en parte por el sistema de recolección y manejo de basuras en los distintos departamentos y ciudades de Colombia. Para el caso de la presente investigación se analiza esta problemática en la ciudad de Villavicencio.

En el mundo se han visto cambios significativos en torno a estos sistemas de recolección, como lo es el experimentado en la ciudad de Lima, con el cambio en su sistema de recolección de basuras tradicional por cuadradas, a uno por contenedores mediante la implementación de un modelo PVRP para la reducción de costos en el ruteo (Portugal, 2012). Otro caso es el explicado por MARTIS (2015) con un modelo VRP para la recolección de basuras por contenedores en las calles con el cual se logra una minimización en los tiempos de recolección y por consiguiente una reducción en costos. De igual forma, en Japón (Tatsuo Suwa, 2007) se presenta un estudio de implementación del sistema de rutas tradicional al de contenedores, en este proyecto no sólo se estableció un sistema de rutas óptima; además se trabajó en dirección a la concientización y buen manejo de los residuos por parte de los usuarios. Este último es un caso similar al presentado en la ciudad de Villavicencio, debido al crecimiento en la población el sistema actual no cumple satisfactoriamente con el servicio. Por lo tanto, realizar un cambio en el sistema de recolección por acera al de contenedores permite una mejora frente a los costos operativos y ambientales para la empresa y la ciudad.

Actualmente Bioagrícola del Llano S.A.S es la empresa encargada del servicio de recolección y disposición de basuras en la ciudad de Villavicencio a través de método de recolección por aceras domiciliaria con una frecuencia de tres veces por semana. Sin embargo, este método es contraproducente debido a la ineficiencia del sistema que se ve reflejado en las dificultades y problemas de movilidad.

En consecuencia, a los problemas anteriormente mencionados Bioagrícola del Llano SAS se ha propuesto realizar un cambio del método por aceras por método de contenedores, en el cual los usuarios deberán disponer sus basuras en el contenedor más cercano. Es así que el trabajo de investigación realiza inicialmente un diagnóstico desde la percepción de los usuarios sobre la calidad del servicio actual e igualmente identificar las variables de mayor afectación que se tendrán en cuenta durante el planteamiento y desarrollo del nuevo modelo matemático a partir de un problema de transporte (VRP). Finalmente obtener el diseño de las nuevas rutas de recolección a partir del modelo propuesto para posteriormente contrastarlas con las actualmente establecidas por el modelo de recolección de la empresa prestadora, y verificar las mejoras obtenidas en el servicio.

MODELO ESTÁTICO

Este algoritmo como solución a un problema de transporte brinda una solución óptima económica debido a que no permanece iterando en tiempo real, así que no se requiere un software y hardware costoso para su ejecución. Sin embargo, se

prefiere el uso de la programación dinámica en vista de que permanece iterando frecuentemente teniendo en cuenta los cambios en las variables (tiempo, demanda, oferta, entre otras) del programa.

Es un modelo en el que las decisiones se toman en un solo período sin considerar cambios futuros en las variables o restricciones (G.D Eppen, 2000).

PROBLEMA DE TRANSPORTE (VRP)

Un problema clásico de este tipo determina la ruta óptima para un grupo de vehículos para entregar un producto a varios clientes ubicados distintas locaciones. En un contexto real el problema va tomando complejidad debido a las restricciones que deben tomarse en cuenta para la obtención de una solución más cercana a la realidad, tales como: la capacidad del vehículo, el tiempo de entrega (o recogida), la cantidad de viajes permitidos, entre otros (Oluyinka y Joshua, 2016).

Se puede representar con un modelo lineal en el que el problema radica en el número de unidades x_{ij} que se deben enviar de un producto desde m orígenes, O_1, \dots, O_m , a n destinos, D_1, \dots, D_n , en las siguientes condiciones (Jauregi, 2013).

- Cada origen $O_i, i = 1, \dots, m$, dispone de una oferta a_i .
- Cada destino $D_j, j = 1, \dots, n$, realizar una demanda b_j .
- $C_{ij}, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$, es el coste de enviar una unidad desde el Origen O_i al destino D_j .

La formulación lineal de este problema es la siguiente:

$$\text{Min } z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} x_{ij}$$

Sujeto a

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i, \quad i = 1, \dots, m$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq b_j, \quad j = 1, \dots, n$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$$

Las primeras m restricciones se refieren a las ofertas de los orígenes que no se deben sobrepasar. Las n restricciones son las demandas de los destinos que deben satisfacer. Las variables no pueden ser negativas debido a que representan cantidades de producto que debe transportarse.

El VRP presenta distintas variaciones para su solución dependiendo de los requerimientos del modelo. En nuestro caso se tuvo en cuenta el siguiente:

PROBLEMA DE RUTEO PERIÓDICO DE VEHÍCULO (PVRP)

Es un modelo en el que las decisiones se toman en un solo período sin considerar cambios futuros en las variables o restricciones (G.D Eppen, 2000).

Este tipo de problemas es común en la vida cotidiana, servicios de mensajería, distribución de materiales, y en nuestro caso la recolección de residuos sólidos. En un PVRP clásico se debe programar la ruta de una flota de vehículos capacitados, los cuales inician y terminan en un depósito durante un período de tiempo. Su objetivo es minimizar el costo total de viaje para cada vehículo, teniendo en cuenta satisfacer las demandas del cliente y la capacidad del vehículo. (Oluyinka y Joshua, 2016).

Además, se deben tomar tres decisiones fundamentales para la optimización de un PVRP: la selección del esquema para cada cliente, la asignación del grupo de clientes que recibirá el servicio cada día, y la ruta que debe seguir cada vehículo.

METODOLOGÍA

Este proyecto se basará en un estudio de tipo correlacional, debido a que determina la relación y la manera en la que interactuarán diversas variables asociadas al sistema de rutas de recolección de residuos sólidos en las comunas 2, 3, 6 y 8 de la ciudad de Villavicencio.

POBLACIÓN Y MUESTRA

Para la determinación de la muestra poblacional para la realización de las encuestas sobre el servicio de recolección y disposición de basuras ofrecido por Bioagrícola en las comunas 2, 3, 6 y 8 se utilizó la siguiente fórmula teniendo en cuenta una población finita obtenida a partir del censo poblacional realizado por el DANE en el año 2006:

$$n = \frac{N(Z_{\alpha}^2)(p)(q)}{d^2(N-1) + (Z_{\alpha}^2)(p)(q)}$$

Donde:

N= Total de la población

Z_{α} = 1,96 al cuadrado (si la seguridad es del 95%)

p= Proporción esperada (en este caso 5% = 0,05)

q= 1- p (En este caso 1-0,05= 0,95)

d= precisión (en su investigación use n 5%)

Tabla 1. Población y muestra.

	Comuna 2	Comuna 3	Comuna 6	Comuna 8
Población	31.459	32.305	25.411	98.485
Muestra	379	379	378	382

Fuente: elaboración propia

Se tienen en cuenta las siguientes variables involucradas en el funcionamiento del sistema destinado a la recolección de residuos:

1. Variables controlables:
 - Tiempos de recorrido en la recolección de basura
 - Número de usuarios
 - Paradas
 - Esquinas
 - Número de operarios
 - Costos de funcionamiento
 - Distancia entre los puntos de partida y llegada del sistema
2. Variables incontrolables:
 - Retrasos obras viales
 - Cantidad de basuras generadas por los usuarios
 - Incapacidad laboral
 - Cambios climáticos
 - Problemas mecánicos

TÉCNICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para dar cumplimiento al objetivo general se tienen las siguientes fases:

Fase 1. Identificación de variables que conforman el modelo actual de recolección y disposición de basuras en la ciudad de Villavicencio. Con lo cual se realiza un diagnóstico de dichas variables a partir de encuestas y el estudio del estado del arte relacionado a los diversos sistemas de recolección de basuras.

La recolección de la información se adquiere directamente de la empresa prestadora de servicio de recolección de basuras Bioagrícola del Llano S.A.E.S.P. Esta información

está relacionada con el volumen de basuras y tiempos por rutas, días y comunas de la ciudad durante el año 2016. De igual forma la información indirecta, se obtiene teniendo en cuenta la observación y encuesta a los usuarios de este servicio.

De otra parte, se tiene en cuenta datos suministrados por otras investigaciones correspondientes a la implementación y optimización de los sistemas de recolección de basuras, basados en modelos de tipo estático y dinámico, junto a las normas que rigen esta actividad de recolección de residuos y modelo de transporte.

Fase 2. Establecer un modelo de transporte estático para mejorar los procesos de recolección de basuras que minimice los costos de operación en las comunas 2, 3, 6 y 8, a partir de la observación e información suministrada por la empresa Bioagrícola del Llano S.A. E.S.P. y las bases bibliográficas.

Para la elaboración de dicho modelo se tienen en cuenta los requerimientos y necesidades de la empresa, a saber: minimización de costos de operatividad y la implementación de un modelo por contenedores, las necesidades de la población, reconstrucción de rutas y microrutas por comuna y cumplimiento de las normas establecidas por el Gobierno nacional.

Fase 3. Contrastar los resultados obtenidos del modelo actual con el modelo propuesto, para lo cual se realiza una evaluación del impacto que genera el uso del nuevo modelo sobre el modelo actual. Se tiene en cuenta la relación y aplicación con otros modelos en el ámbito internacional y nacional, junto a las restricciones de la empresa y evaluar la validación del modelo generado a partir de las variables controlables, tomando como referencia el índice Hom-Min/Ton (Hombre - Minutos necesarios para recolectar una tonelada de basura), para determinar la eficiencia de las nuevas rutas de recolección. Además, emplear una metodología con formulación estadística para valorar las variables descritas y los resultados obtenidos con el fin de determinar un modelo de transporte acorde con las necesidades de la organización y buscando un análisis de costo-beneficio en la empresa.

RESULTADOS

IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES QUE CONFORMAN EL MODELO ACTUAL DE RECOLECCIÓN Y DISPOSICIÓN DE BASURAS EN LA CIUDAD DE VILLAVICENCIO

En esta fase se describe inicialmente el estudio sobre los distintos artículos que planteen una mejor solución a un VRP de recolección de basuras a partir de un modelo estático y dinámico. Para determinar de forma más clara cuáles son las variables de mayor incidencia y afectación en el desarrollo de un modelo matemático aplicativo en la ciudad de V/cio. Con el fin de conocer el estado del modelo actual de recolección en la ciudad se usa la información suministrada por la empresa Bioagrícola S.A, junto a un diagnóstico con base a encuestas aplicadas a usuarios del servicio suministrado por la empresa Bioagrícola S.A para conocer su percepción sobre la calidad de este.

La empresa Bioagrícola del Llano presta el servicio de recolección y disposición de basuras a través de 56 microrrutas semanales en la ciudad, llevadas a cabo en vehículos compactadores de 16 yd³ y 25 yd³, tipo Ampliroll, furgón y volqueta para la recolección de los residuos en hogares, la línea de barrido y servicios especiales.

El servicio se basa en las labores de recolección de residuos de origen residencial, residuos en contenedores (usuarios generadores de un gran volumen de basuras) y producto de la labor de barrido. En el caso del tipo de recolección por acera o esquina los residuos deben ser dispuestos frente a la residencia, o en la esquina más cercana en caso de que las condiciones de la vía y el sector impidan el paso del vehículo. con una anticipación máxima de tres horas según el horario y frecuencia establecida, de tal forma que brinden la seguridad, higiene y faciliten la operación de recolección por la empresa.

IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

Se realizó una revisión previa entre los distintos trabajos de investigación y artículos. Se seleccionaron 15 debido a su relevancia en la identificación de las variables de mayor interés que se deben tener en cuenta para su evaluación y posteriormente en el planteamiento del modelo matemático de recolección basuras.

En concordancia con los artículos mencionados anteriormente se determinan las variables predominantes para el desarrollo del modelo debido a su mayor afectación sobre el diseño, adecuación al panorama actual del VRP de recolección de basuras en la ciudad de V/cio y la frecuente mención durante los 15 artículos. Estas variables se describen a continuación:

1. Cantidad de basuras. Esta información fue suministrada por la empresa prestadora del servicio de recolección de residuos Bioagrícola S.A. E.S.P. Es importante conocer el volumen de basuras producido por los usuarios de cada comuna para calcular la cantidad de contenedores necesarios para suplir la demanda, según lo mencionado por varios artículos, entre ellos “A survey of recent advances in vehicle routing problems” (Oluyinka y Joshua, 2016) quién destaca la importancia de su medición debido a que a partir de estos datos se establece la cantidad de viajes según la capacidad del vehículo y la necesidad del servicio en cada contenedor.
2. Frecuencia de recolección. La frecuencia varía entre las distintas comunas según el tiempo promedio en que una zona o contenedor alcanza su capacidad y requiere su estado original de vacío. Entre los artículos se resalta el tener en cuenta que el tiempo transcurrido desde la generación de basuras hasta su recolección no supere al ciclo de reproducción de la mosca (Márquez, 2007). En promedio suele ser 3 días/semana en las que se realiza el servicio de recolección.
3. Capacidad de camiones. Se debe establecer la capacidad máxima de cada camión para definir la cantidad de contenedores que podrá recolectar antes de presentarse la restricción de carga y deber regresar al relleno sanitario de la ciudad “Parque ecológico Reciclante (PER)”. En el modelo se considera la capacidad por cada camión en Toneladas. Según “A survey of recent advances in vehicle routing problems” (Oluyinka y Joshua, 2016) la capacidad del vehículo es de relevancia para conocer la oferta de clientes (contenedores) que la tolva del camión puede disponer para ser llevados posteriormente al PER.
4. Mano de obra. Se refiere al costo promedio de contratación de los operarios de recolección en la empresa. En la recolección tradicional de basuras suele necesitarse entre 2 y 3 operarios para el cumplimiento del servicio en un camión, mientras que en el modelo de recolección fija por contenedores tan solo se requiere uno debido a la automatización del camión recolector. El modelo desarrollado mide esta variable según la cantidad de personas requeridas en un vehículo para la realización de las rutas de recolección.
5. Distancia. Es la medida en kilómetros de la trayectoria realizada por los camiones al recolectar las basuras en cada punto y llevarlas al PER. El objetivo de este sistema es minimizar la distancia que ofrezcan como resultado las rutas que brinden un camino más corto. En la totalidad de los artículos descritos se concuerda con que esta es una de las variables de mayor afectación sobre el modelo, debido a que a partir de allí se plantea realizar una minimización de distancia y en consecuencia de los tiempos, según lo demostrado por Kirci (2016) en su caso aplicativo al establecer como objetivo minimizar la distancia total de entre los contenedores al depósito.

6. Tiempo de ruteo. Representa el tiempo requerido (en minutos) que los camiones toman para visitar los puntos de recolección en la ciudad y los lleve al centro de acopio de Bioagrícola en la ciudad. Esta variable también es afectada en tiempo real por características cualitativas como el tráfico y la condición actual de la malla vial en la ciudad. Los artículos concuerdan al mencionar en todos ellos la trascendencia de esta variable debido a que al haber una reducción tiempos por lo general incurre en una mayor eficiencia del servicio y reducción de los costos, un ejemplo de esto son los artículos “macro y micro ruteo de residuos sólidos residenciales” (Márquez, 2007) y “optimización aplicada a un problema de recolección de residuos industriales” (Osorio, 2012).
7. Ubicación de los contenedores. Se deben establecer los mejores puntos para el funcionamiento de los contenedores teniendo en cuenta una cobertura excelente para los usuarios de este servicio. La ubicación de estos se realiza de forma heurística teniendo en cuenta el ser situados en sitios públicos que no generen inconformidades en los hogares debido a la higiene, estética, junto a la cantidad de basuras producidas en la zona. Tal como se menciona en artículos como “An optimization algorithm for a capacitated vehicle routing problema with time windows” (Kirci, 2016) y “A survey of recent advances in vehicle routing problems” (Oluyinka y Joshua, 2016).

Además, dentro de las variables identificadas en la revisión de antecedentes (tabla 3), no se emplearon las siguientes variables debido a que, según el enfoque sobre el cual se está planteando el modelo VRP para la ciudad de Villavicencio, no se ajustan a las restricciones aplicadas en función del modelo que se describen a continuación.

1. Consumo de energía. Se refiere a la tasa total de consumo de energía considerando las diferentes tecnologías empleadas dentro del sistema de recolección de basuras (estaciones de transferencia, vehículos, relleno sanitario). Este varía según el nivel de tecnología que el sistema de recolección disponga. actualmente la empresa Bioagrícola posee un nivel 2 debido a que cuentan con tecnologías de compactación, recolección transporte de basuras promedio que, si reducen la tasa de consumo de energía, sin embargo, producen un mayor consumo en comparación al nivel 3. (Jabbarzadeh, Farzaneh Daniyan, y Jabalameli, 2016). No se emplea debido a que nuestro modelo pretende optimizar el servicio al minimizar las distancias de recolección y disposición de basuras.
2. Condiciones de la vía. No se aplica debido a que el modelo propuesto es estático por los bajos costos de implementación. Además, para la adaptación de esta variable sería necesario el diseño de un modelo dinámico de recolección el cual se iterará automáticamente para reajustar las rutas dentro de un tiempo óptimo

con las condiciones reales del medio que se puede ver afectado por el clima o las irregularidades del camino (no pavimentada, hundimientos, huecos, alto tráfico). Según se menciona en los artículos relacionado a modelos aplicativos VRP, tales como: “Using simulation to assess the opportunities of dynamic waste collection” y “macro y micro ruteo de residuos sólidos residenciales” (Márquez, 2007).

ESTABLECER UN MODELO DE TRANSPORTE ESTÁTICO PARA MEJORAR LOS PROCESOS DE RECOLECCIÓN DE BASURAS EN LAS COMUNAS 2, 3, 6 Y 8

Previamente debe establecerse la cantidad de basuras producidas por los usuarios de cada comuna, tipo y capacidad del contenedor empleado, el número de contenedores, el factor de compactación de basuras de la tolva, y finalmente el diseño de las rutas propuesta de recolección y disposición de basuras en las comunas 2, 3, 6 y 8 de la ciudad de Villavicencio.

$$B_h = B_d / n_h$$

B_h = Promedio de basura por día/número de habitantes en Villavicencio

N_h = Número de habitantes por comuna establecido mediante una proyección poblacional a partir del Censo poblacional realizado por el DANE en el 2006.

B_d = Promedio de basuras depositadas en el relleno sanitario PER por día entre los años 2016-2017.

Tabla 2. Cálculo del promedio de basuras por día/número de habitantes por comuna.

Variable	Comuna 2	Comuna 3	Comuna 6	Comuna 8
B_d	14.529	24.182	20.085	111.615
N_h	34.031	34.947	27.489	106.538
B_h	0,43	0,69	0,73	1,05

Fuente: elaboración propia

Luego se prosigue con el cálculo de volumen de basura en m³ por habitante.

V_{bh} = Volumen de basura en m³ por habitante

$$V_{bh} = B_h / V_{pc}$$

V_{pc} = Volumen en Kg de basura por contenedor. Se tomó de los resultados de Duque y Tul (2013), equivalente a 189,56 Kg/m³.

Tabla 3. Cálculo del volumen en metros cúbicos por habitante en cada comuna.

Variable	Comuna 2	Comuna 3	Comuna 6	Comuna 8
B_h	0,43	0,69	0,73	1,05
V_{pc}	189,56	189,56	189,56	189,56
V_{bh}	0,002252	0,003650	0,003855	0,005527

Fuente: elaboración propia

V_c = Volumen del contenedor en m^3 . Teniendo en cuenta que los contenedores son de $5 Yd^3$ ($3,82 m^3$), además su frecuencia de recolección aproximada es de cada 2 días, en consecuencia, el volumen disponible por día en el contenedor es de $1,91 m^3$.

P_c = Población por contenedores.

$$P_c = V_c / V_{bh}$$

Finalmente, para determinar la cantidad de contenedores necesarios por comuna se obtiene mediante la siguiente formula:

N_c = Número de contenedores.

$$N_c = N_h / P_c$$

Tabla 4. Cálculo de la población por contenedores (P_c) y el número de contenedores (N_c)

Variable	Comuna 2	Comuna 3	Comuna 6	Comuna 8
V_{bh}	0,002252	0,003650	0,003855	0,005527
V_c	1,91	1,91	1,91	1,91
P_c	848,08	523,24	495,52	345,59
N_c	40	67	55	308

Fuente: elaboración propia

Luego, para determinar el factor de compactación de vehículo se partió de las especificaciones referentes a esto, estableciéndose un rango de compactación de los residuos depositados en ella de entre 386-354 Kg. Con lo anteriormente mencionado se define el peso de basura por contenedor cuando se encuentra lleno.

P_{cl} = Peso del contenedor cuando está lleno.

$$P_{cl} = V_{pc} (V_c) = 189,56 \text{ Kg}/m^3 (3,82m^3) = 724,1192 \text{ Kg}$$

Con base en la relación anterior se aplica la siguiente regla de tres

$$\begin{array}{rclcl} P_{cl} & V_{fc} & = & 724,1192 \text{ Kg} & V_{fc} \\ P_t & V_{ct} & & 386 \text{ Kg} & 1 \text{ m}^3 \end{array}$$

P_t = Peso en la tolva

V_{ct} = Volumen al que compacta la tolva.

V_{fc} = Volumen al que fue compactado.

$$V_{fc} = 724,1192 \text{ Kg} (1 \text{ m}^3) / 386 \text{ Kg} = 1,8759 \text{ m}^3$$

Finalmente, se halla el factor de compactación (α), con la relación del volumen en la que la basura fue compactada y el anterior a este cuando se disponía en el contenedor.

$$\alpha = V_{fc} / V_c = 1,8759 \text{ m}^3 / 3,82 \text{ m}^3 = 0,49 \approx 49\%$$

C_c = Número de contenedores por camión

$$C_c = V_v / V_c(\alpha) = 19,11 \text{ m}^3 / 3,82 \text{ m}^3 (49\%) = 10,20 \cong 10$$

V_v = Volumen del vehículo recolector

La función objetivo del modelo matemático estático del tipo VRP es la siguiente:

$$\text{Min } \sum_{i=1}^{60} \sum_{j=1}^{60} (C_{ij} X_{ij})$$

Además, se deben considerar las siguientes restricciones para su ejecución:

s.a

$$\sum_{j=1}^{60} x_{sj} = 1$$

$$\sum_{i=1}^{60} x_{ji} = 1$$

$$\sum_{\substack{i=60 \\ j=60}} x_{ji} = 1$$

x_{ij} = binarios

i y $j \geq 0$

En donde:

i = origen

j = destino

x_{ij} = cantidad de unidades embarcadas del origen i al destino j .

C_{ij} = Costo por unidad de embarque del origen i al destino j .

S_i = Suministro o capacidad en unidades en el origen i .

jL_i = Demanda en unidades en el destino j .

El camión inicia su ruteo desde el Parque Ecológico Reciclante (PER).

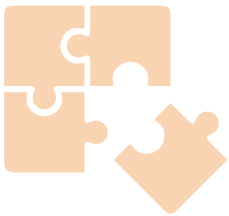
Se tiene $j = 11$ debido a que el camión tiene una capacidad máxima de recolección de 10 contenedores para posteriormente dirigirse al PER.

CONTRASTAR LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL MODELO ACTUAL CON EL MODELO PROPUESTO

En esta fase se pretende evaluar los cambios en la eficiencia con base al sistema actual de recolección por aceras y el propuesto, que consiste en la recolección por contenedores, cuando se finalice el diseño de la totalidad de las micro y macro rutas de cada comuna.

La contrastación de los dos sistemas se realizará conforme a la variación en distancias y tiempos al plantear con este modelo matemático de optimización el diseño y desarrollo de las nuevas rutas propuestas de recolección escogiendo el mejor trayecto entre los caminos más cortos para recolectar la totalidad de los contenedores.

Además, una reducción en la mano de obra en vista que para el funcionamiento del sistema tradicional actual por aceras se requieren de tres operarios, mientras que el propuesto por contenedores requiere tan solo entre uno o dos operarios. Traduciéndose esto en una disminución de los costos operativos.



"Esta fase pretende evaluar los cambios en la eficiencia con base al sistema actual"

DISCUSIÓN O PROPUESTA

A partir del modelo de mejora para la recolección de residuos sólidos, se pueden observar algunas variaciones significativas durante el proceso.

La primera es una reducción de los tiempos y distancias de recolección. Acorde a los resultados obtenidos con el modelo, se logró una reducción en las distancias recorridas debido a que el modelo diseña las rutas de recolección al escoger el mejor camino entre los más costos, y en consecuencia hubo una disminución en los tiempos de recolección.

La segunda es una reducción de la mano de obra. Se realizó el análisis de los resultados y se concluyó de forma implícita el hecho de que en los camiones de recolección de basura para contenedores tan solo se requieren entre 1 ó 2 operarios, mientras que el método tradicional por acera solicita 3 operarios de forma permanente para la operación de recolección. Además, el análisis enseña que al usar un modelo por contenedores se reduce el esfuerzo físico de los operarios de recolección al no tener que agacharse constantemente para tomar y depositar las basuras en el camión.

CONCLUSIONES

El presente trabajo de investigación ofrece a la ciudad de Villavicencio una alternativa de mejora a sus sistemas de recolección previendo el crecimiento acelerado de la ciudad y el surgimiento de problemas en la calidad del servicio y los costos operativos. Los recorridos propuestos para los camiones recolectores de residuos se obtuvieron al minimizar la cantidad de kilómetros necesarios para recorrer las zonas donde se ubican los contenedores, reduciéndose los tiempos para llevar a cabo la actividad, manteniendo la frecuencia de tres veces por semana y ofreciendo un servicio más eficiente a los usuarios.

Los resultados demuestran la utilidad de la modelación matemática para la resolución y mejora de problemas de la vida cotidiana, al combinar herramientas informáticas como el SOLVER para plantear cambios en pro de la calidad de vida de las personas en la ciudad, junto a una reducción de costos y gastos en la empresa prestadora Bioagrícola del Llano SAS.

REFERENCIAS

A. Garrido, E. O. (2015). **Un algoritmo para la optimización de rutas de transporte.** Valencia, España.

Aderemi Oluyinka, O. J. (2016). **A survey of recent advances in vehicle routing. SREQOM.**

Alcaldía de Villavicencio. (2017). Alcaldía de Villavicencio. Recuperado de **www.villavicencio.gov.co**

Alcaldía de Villavicencio. (23 de Marzo de 2012). Comunas. Recuperado de **<http://antigua.villavicencio.gov.co>**

Alexander Alberto Correa Espinal, J. M. (2011). Solución de problemas de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad usando la teoría de grafos. Recuperado de **<https://revistas.unal.edu.co/index.php/avances/article/view/20064>**

Bangswow. (2012). Use case of discrete event simulation. Recuperado de **<http://www.springer.com/la/book/9783642287763>**

Bianchi, C. y. (2012). Municipal waste collection in Ponte de Lima, Portugal- A vehicle routing application.

Bioagícola del Llano. (2007). Recuperado de **<http://www.bioagricoladelllano.com.co>**

Bioagícola S.A. ESP. (2018). Programa para la prestación del servicio público de aseo. Villavicencio.

C.Kinnaman, T. (2009). The economics of municipal solid waste management. Recuperado de **<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.031>**

Cavdar, K. K. (2016). Design and implementation of a smart solid waste collection system. Recuperado de **<https://doi.org/10.1007/s13762-016-0993-4>**

Christian Pillajo, A. M. (2013). **Método de Recolección de basuras.** Quito, Ecuador.

Ferreira, R. y. (2015). **Sectors and Roustes in Solid Waste Collection.**

G.D Eppen, F. G. (2000). **Programación lineal: Aplicaciones. En Construcción de Modelos para la toma de decisiones con hojas de cálculo electrónicas** (pág. 271). Prentice Hall.

Gaviria, A. V. (2017). Validación de un modelo de transporte para la recolección de basuras en las rutas 1 y 2 de la ciudad de Villavicencio.

Gobernación del Meta. (2017). Obtenido de **<http://www.meta.gov.co>**

González Martínez, T. B. (2012). The potential of a sustainable municipal waste management system for Santiago de Chile, including energy production from waste. Recuperado de **<https://doi.org/10.1186/2192-0567-2-24>**

Henaó Guzmán, B. P. (2016). Diseño de un modelo de ruteo de vehículos para la recolección de residuos sólidos en el municipio de Zarzal Valle del Cauca. Recuperado de **<http://hdl.handle.net/10893/9103>**

Hornig, E. S. (2009). Modelo ACO para la recolección de residuos por contenedores. Recuperado de **<http://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v17n2/art12.pdf>**

Jabbarzadeh, A., FarzanehDaniyan, & Jabalameli, M. S. (2016). A Multi-objective Model for location of Transfer Stations: Case Study in Waste Management System of Tehran. Journal of Industrial and Systems Engineering, 109-125.

Jauregi, Z. (2013). Operations Research. Linear Programming. Obtenido de **<https://ocw.ehu.eus/course/view.php?id=170>**

Juan Gallego, Y. A. (2012). Desarrollo de un modelo de localización de contenedores para la recolección de pilas usadas en el área metropolitana para la empresa Tronez S.A.

K, P. (2016). An optimization algorithm for a capacitated vehicle routing problem with time windows.

Karadimas, N. V. (2007). Genetic Algorithms for Municipal Solid Waste Collection and Routing Optimization. Recuperado de **https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-387-74161-1_24**

Kirci, P. (2016). An optimization algorithm for a capacitated vehicle routing problem with time windows. Indian Academy of Sciences.

Korucu, M. K. (2014). Possibility of the most cost efficient choice: A divided process approach to method and location selection for municipal solid waste management. Obtenido de <https://doi.org/10.1177/0734242X14549796>

Kumar, P. R. (2006). Dynamic Programming. En P. R. Kumar, Control systems, robotics and automation. Vol. XI. Illinois. Recuperado de <http://www.eolss.net>

M., M. (2012). Using Simulation to Assess the Opportunities of Dynamic Waste Collection.

Márquez, J. N. (2007). Macro y Micro ruteo de residuos sólidos residenciales. Sincelejo.

Martins, K. (2015). A Routing and Waste Collection Case-Study. Recuperado de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-20328-7_15

Medvedev A., F. P. (2015). Waste Management as an IoT-Enabled Service in Smart Cities. Obtenido de https://doi.org/10.1007/978-3-319-23126-6_10

Moustafa, A. (2013). Waste Collection Vehicle Routing Problem: Case Study in Alexandria, Egypt. Recuperado de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-37270-4_89

Murceigo, Á. L. (7 de Junio de 2016). Smart Waste Collection Platform Based on WSN and Route Optimization. Recuperado de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-40159-1_11

Oluyinka, A., & Joshua, O. (2016). A survey of recent advances in vehicle routing. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 155-172.

Osorio, J. A. (2009). Programación binaria aplicada a sistemas de rutas de recolección de residuos. GTI.

Osorio, J. A. (2012). Optimización aplicada a un problema de recolección de residuos industriales.

Osorio, J. A. (2012). Optimización aplicada a un problema de recolección de residuos industriales. Recuperado de <http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistagti/article/view/2814>

PARIATAMBY, T. (2013). Municipal Solid Waste Management in Asia and the Pacific Islands. Recuperado de doi.org/10.1007/978-981-4451-73-4

Rabbani, M. F.-A. (2016). Solving a bi-objective location routing problem by a NS-GA-II combined with clustering approach: application in waste collection problem.

Rodrigues, A. M. (2015). Sectors and Routes in Solid Waste Collection. Recuperado de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-20328-7_20

Schyns. (2015). An ant colony system for responsive dynamic vehicle routing.

Taha, H. A. (1995). En H. A. Taha, Investigación de Operaciones 5ta Edición. México: Alfaomega Editor.

Tatsuo Suwa, T. U. (2007). Estimation of garbage reduction and recycling promotion under the Containers and Packaging Recycling Law and garbage pricing. Japón.

Valbuena, L. A. (2011). Presente y Futuro de la Disposición de residuos en Colombia. Recuperado de [www.uaesp.gov.co/.../exporesiduos/PRESENTE%20Y%20FUTURO%20DE%20LA%](http://www.uaesp.gov.co/.../exporesiduos/PRESENTE%20Y%20FUTURO%20DE%20LA%20)

Valentina Gutiérrez, J. D. (2012). Reseña del software disponible en Colombia para el diseño de rutas de distribución y servicios. Recuperado de <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/781>