

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE RECOLECCIÓN DE DESECHOS SÓLIDOS DE LA CIUDAD DE AMBATO MEDIANTE EL DISEÑO DE UN MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE REDES.

OPTIMIZATION OF THE SOLID WASTE COLLECTION PROCESS OF THE CITY OF AMBATO THROUGH THE DESIGN OF A NETWORK DISTRIBUTION MODEL

Ángel Geovanny Guamán Lozano¹, Gloria Elizabeth Miño Cascante¹,
Juan Carlos Cayán Martínez¹

¹ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo - Ecuador

e-mail: a_guaman@esPOCH.edu.ec¹, gmino@esPOCH.edu.ec¹, j_cayan@esPOCH.edu.ec¹

Recibido: 14/05/2017

Aceptado: 27/11/2017

Código Clasificación JEL: D6, M54, Q22

RESUMEN

La siguiente investigación presenta el diseño de un modelo de redes que permite además de minimizar costos dentro de la operación de recolección de desechos sólidos, una adecuada distribución de las toneladas por viaje realizado; de esta manera se cumple con las expectativas que se tiene de este servicio por parte de la población del cantón Ambato. Para ello en el diseño de la red se asoció variables como distancias recorridas, toneladas producidas, número de camiones disponible, capacidad de carga y costos de operación dando como resultado una red flexible que se ajuste a las necesidades que exija el sistema. Además, se implementó un modelo de macrorutas que permitió optimizar costos, mediante la asignación de vehículos recolectores a diversas áreas de la ciudad para realizar la recolección. Para llevar a cabo estos modelos se hizo uso de la programación lineal aplicando herramientas informáticas para optimizar la solución. En los resultados se evidencia que el costo diario de recolección actual se reduce considerablemente produciéndose un ahorro económico y reduciendo el número de la flota camiones.

Palabras clave: investigación operativa, técnicas de optimización, transporte.

ABSTRACT

The following research presents the design of a network model that allows, also to minimizing costs within the operation of solid waste collection, an adequate distribution of tons per trip; In this way it fulfills the expectations that one has of this service on the part of the population of the canton Ambato. To do so, the network design associated variables such as distances traveled, tons produced, number of trucks available, load capacity and operating costs resulting in a flexible network that meets the needs of the system. In addition, a model of macrotack was implemented that allowed to optimize costs, by means of the allocation of collecting vehicles to diverse areas of the city to realize the collection. To carry out these models, linear programming was used using computer tools to optimize the solution. In the results it is evident that the daily cost of current collection is reduced considerably, resulting in economic savings and reducing the number of fleet trucks.

Key words: Operational research, optimization techniques, transportation.



INTRODUCCIÓN

En muchas organizaciones, la gestión de las actividades de distribución constituye un importante problema de toma de decisiones. La utilización eficiente y el uso adecuado de la flota de vehículos están en el corazón de casi todos los problemas de distribución-enrutamiento. En particular, una pregunta natural que enfrenta un gestor de distribución es: ¿Cuántos vehículos y qué tamaño se necesitan para acoplar la demanda a un costo mínimo? (Infante Rivera & Litvinchev, 2013).

La tarea de diseñar las rutas de entrega o recolección para atender a los clientes en el campo del transporte y la cadena de suministro se conoce en la literatura como un problema de enrutamiento de vehículos (VRP) (Cordeau, Laporte, Savelsbergh, & Vigo, 2007). Un modelo clásico consiste en diseñar un conjunto en la mayoría de las rutas de entrega o recolección de K para que cada ruta comience y finalice en el depósito, cada cliente es visitado exactamente una vez por exactamente un vehículo, la demanda total de cada ruta no excede la capacidad del vehículo y el coste total de enrutamiento se minimiza. Estableciendo estas suposiciones, se puede desarrollar una formulación compacta de VRP que se puede escribir como:

$$Min_z = \sum_{k=1}^n c_{ij} x_{ij}^k \quad (1)$$

Sujeta a:

$$\sum_{i,j} q_i x_{ij}^k \leq Q, k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

Donde:

c_{ij} = El costo / distancia de viajar de i a j

$x_{ij}^k = 1$ si el vehículo k viaja de i a j ; 0 de lo contrario

m = El número de vehículos disponibles

S_m = El conjunto de todas las soluciones factibles en el problema del vendedor ambulante (m-TSP)

q_i = La cantidad demandada en el lugar i

Q = La capacidad del vehículo.

Sin embargo, el modelo clásico de VRP generalmente no captura un aspecto importante del transporte real y problemas de distribución logística. Esto se debe al hecho de que varios de los parámetros del problema tales como la demanda, el tiempo, la distancia y otros son estocásticos por su naturaleza, pero a menudo son simplificados y tratados como deterministas. Tian Liu, Zhixing Luo, Hu Qin y Andrew Lim (2017) proponen un algoritmo de ramificación y corte para abordar el problema de tipo two-echelon capacitated vehicle routing problem (2E-CVRPGC) con el cual se pueden resolver 32 de 40 instancias a optimalidad con un tiempo de cálculo razonable como lo hacen Fernández, Roca-Riu y Speranza (2017).

Por otro lado, se han aplicado varias metaheurísticas a la VRP. Bajo esa línea, la heurística clásica realiza una búsqueda más completa del espacio de la solución y tienen menos probabilidades de terminar con un óptimo local. Estos pueden ser ampliamente divididos en tres clases (Cordeau, Laporte, Savelsbergh, & Vigo, 2007):

- Búsqueda local, incluyendo recorrido simulado, recorrido determinista y búsqueda

de tabú;

- Búsqueda de la población, incluyendo búsqueda genética y procedimientos de memoria adaptativa;
- Mecanismos de aprendizaje, incluidas las redes neuronales y la optimización de las colonias de hormigas.

Las limitaciones en el uso de estos modelos común son las restricciones sobre la capacidad del vehículo, el tiempo total, el tiempo de las paradas, las relaciones de precedencia entre pares de ciudades, el número de depósitos. Russel (2017) utiliza un enfoque a través de la partición de conjuntos y otro enfoque que emplea el concepto de rutas de semillas para determinar una solución aproximada que secuencia rutas para cada período de tiempo en el horizonte de planificación. Murakami (2017) propuso un nuevo modelo de the electric and diesel-powered vehicle routing problem (EDVRP), donde se introdujo el concepto de gráfico original para considerar las inclinaciones de las carreteras, la velocidad y aceleración del vehículo, esperar las luces de tráfico y el cuerpo del vehículo y el costo de mantenimiento. (Raa y Dullaert, 2017) Una solución se construye en dos fases: diseñando rutas y componiendo la flota.

Al momento de determinar una solución en el dimensionamiento de los sistemas de distribución es necesario considerar la capacidad de transportación de los vehículos y el costo que representa una ruta de servicio. Cuando se analiza el comportamiento del sistema de recolección de desechos sólidos de una ciudad se puede hacer una analogía con el comportamiento real de una colonia de hormigas. En su búsqueda de comida marcan los senderos que están utilizando poniendo una sustancia llamada feromona (Mazzeo & Loiseau, 2004). Todas vuelven a un mismo punto, pero a diferencia de la flota de recolectores siguen una misma ruta lineal y no se dispersan a múltiples destinos.

En la mayoría de ciudades de Latinoamérica el proceso de recolección de basura es similar, sin embargo, se han realizado estudios acerca de los efectos que produce el contacto con los microorganismos y el ser humano, pero no se han hecho mejoras significativas para optimizar las rutas de recolección de las flotas. El objetivo de este trabajo es llegar a determinar un proceso más eficiente en términos de costos y capacidad de los camiones para el caso de estudio, para esto se ha realizó un análisis mediante un modelo de programación lineal en la ciudad de Ambato ubicada en la república del Ecuador.

En los distintos barrios de la ciudad de Ambato, la recolección de los desechos sólidos ha sido un proceso que en los últimos años ha sido tecnificado por parte de la Empresa Pública Municipal de Gestión de Desechos Sólidos (EPM-GIDSA). La organización se dedicada a la gestión integral de desechos sólidos en la ciudad de Ambato con una política que establece sustentabilidad y capacidad de innovación hasta el 2020. Además, maneja de forma eficiente una cédula presupuestaria que permita estudios e implementaciones dentro de la empresa, presentando mejoras considerables dentro del sistema.

La empresa necesita mantener los costos operativos y de mantenimiento bajos para conservar su infraestructura a lo largo de los años; por otro lado, se han dado algunos alcances y políticas en la legislación ecuatoriana, con la publicación del acuerdo ministerial 031 en el que se incluyen los procesos de cierre técnico y saneamiento de botaderos de los desechos sólidos y viabilidad técnica. Además del tratamiento de desechos peligrosos en los acuerdos ministeriales 026, 161 y 142; y de desechos especiales en el acuerdo 190.

Bajo este marco, es claro que actualmente las operaciones logísticas se rigen

bajo un modelo empírico de distribución de vehículos para las zonas que no es adecuado considerando la cantidad de desechos que los pobladores arrojan a los ecotachos; de igual manera, las limitaciones que los camiones presentan en su capacidad de carga hacen que en ocasiones los recorridos se ejecuten de forma ineficiente para una misma zona, esto no es beneficioso y la posibilidad de optimizar y agilizar estos inconveniente brindan un escenario propicio para el desarrollo de un estudio que optimice el proceso de recolección de desechos sólidos en la ciudad de Ambato.

METODOLOGÍA

La estrategia metodológica utilizada en el presente estudio describe la aplicación de un modelo de macroruteo a través del cual se obtiene un manejo adecuado de los costos logísticos de distribución de rutas obteniendo un valor exacto del tipo de vehículos a utilizar para las actividades de recolección.

Obtención de datos

En la primera fase de la investigación se necesita la recolección de los principales datos del sistema que posteriormente se incluyen en el modelo mediante el tratamiento de variables tales como: distancias, zonas, costos de operación, costos de recolección, número disponible de camiones recolectores, capacidad de camiones, habitantes por zonas. Considerando además la demanda del sistema (Camm, Magazine, Kuppussamy y Martin, 2017).

Desarrollo del modelo de macroruteo

La implementación del modelo de macroruteo se basó en una investigación previa de la Secretaría de Desarrollo Social de México (SEDESOL, 1997) que describe un problema de programación lineal que busca la minimización de los costos por horario de uso y dependientes del tipo y número de camiones empleados en la operación como se describe en la ecuación (3).

$$Min_Z = \sum_{k=1}^n c_i x_i \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i x_i N_i \eta_i \geq 2S \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n k_i x_i \leq W \quad (5)$$

$$x_i - y_i = a_i \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

$$p_i y_i \leq l \quad (7)$$

$$x_i \geq 0 \quad (8)$$

$$y_i \geq 0 \quad (9)$$

Donde:

c_i = costo horario del camión tipo i

x_i = número de camiones de tipo i requeridos

n = número total de tipos i de camiones empleados

k_i = costo diario por mano de obra de operación de cada tipo de camión empleado

W = costo máximo diario de operación que el municipio presupuesta.

S = generación diaria de residuos de la ciudad

$$S = (PG+B)$$

P = población total servida en habitantes

G = generación en kg/hab - día

B = generación total de otras fuentes en Kg-día.

w_i = capacidad en kg del camión tipo i

N_i = número de viajes por día del camión tipo i

η_i = eficiencia de llenado del camión tipo i

a_i = número actual de camiones de tipo i

p_i = precio de adquisición de un vehículo nuevo de tipo i

y_i = número de vehículos de recolección nuevos

l = presupuesto que el municipio puede erogar para adquirir equipo nuevo

La restricción (4) establece la cantidad máxima de basura que le es permitida recolectar en el recorrido, esto garantiza que los desechos sean enviados a su centro de acopio de forma completa. En el caso de que la municipalidad requiera establecer un tope presupuestario para estas actividades sanitarias, se limita el costo diario mediante la restricción (5). Además se incluye la posibilidad de incluir vehículos nuevos en el sistema (6) poniendo como limite el presupuesto destinado por el municipio para la adquisición de nuevas unidades (7). Finalmente, para garantizar que se obtenga un número de camiones real, se establecen las condiciones de no negatividad de las ecuaciones (8) y (9).

Ejecución del macroruteo

Las variables que ingresan en la definición del modelo de programación lineal permiten la operacionalización de los datos mediante la aplicación de un software de resolución o mediante hojas de cálculo como Erdogan (2017); en este caso se plantea la solución mediante un código informático bastante simple en el programa LINDO. La programación establece una solución con método simplex para obtener un número de camiones x_i real.

A partir de los resultados obtenidos pueden establecer las mejores estrategias en la toma de decisiones para la municipalidad y para la empresa EPM-GIDSA, permitiéndole plantear mejoras dentro de la operación con una adecuada verificación de las rutas en función de las necesidades de la comunidad.

RESULTADOS

Las cifras se obtuvieron mediante la recolección de información desde la empresa EPM-GIDSA gracias a la política que mantiene para acceder a los datos con fines académicos y de desarrollo. La empresa pública tiene la misión de administrar y ejecutar la recolección de desechos en siete zonas de la ciudad utilizando vehículos de carga lateral y posterior, el resto de rutas está bajo la concesión de una empresa privada. (Figura 1).

Figura 1. Vehículo de carga lateral usado en Ambato



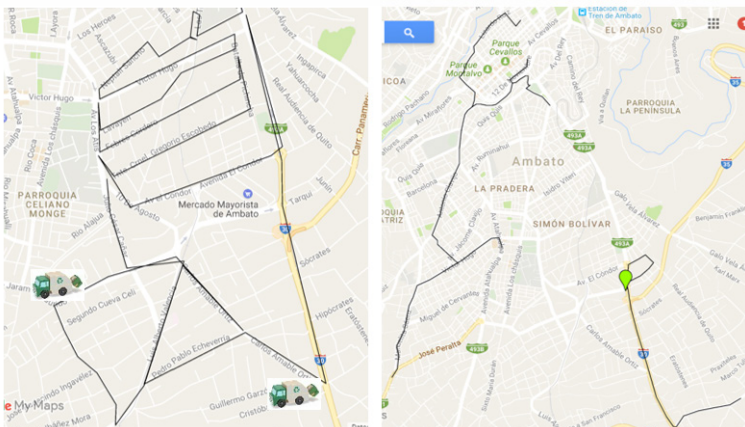
Fuente: Elaboración propia

Detalle de zonas de recolección

Mediante la aplicación de la herramienta web Google Maps, se obtuvieron los valores exactos del recorrido de los camiones en las siete zonas de la ciudad de Ambato bajo la responsabilidad de GID SA. Se graficaron las calles por las cuales los vehículos ejecutan sus actividades la ruta nocturna como se muestra en la figura 2; se observa que el recorrido de la zona 12 está bajo la responsabilidad del vehículo con denominación Hino N°14.

El mismo proceso se replica para obtener de datos restantes del sistema. El recorrido de recolección de la ruta 13 se realiza por el vehículo con denominación Hino N°10; para la zona 17 el recorrido de recolección se realiza por el vehículo con denominación Hino N°16 mientras que el vehículo con denominación Hino N°8 se encarga de la zona 20. El vehículo Mercedes N° 28 está encargado del recorrido de la zona 21 y al Mercedes N° 29 la zona 22; finalmente la ruta de la zona 27 es del carro Mercedes N°25.

Figura 2. VRuta zona 12 (izquierda) y ruta zona 17 (derecha) establecidas por EPM-GIDSA



Fuente: Google Maps

Costos que influyen en el proceso

Los costos fijos mensuales que se integran en el proceso son: el pago de \$ 633.50 al chofer, ayudante \$ 531.00, gasolina \$ 200.00, mantenimiento \$ 136.75 dando un costo total de \$1501.25 correspondientes a cada uno de los camiones. Derivada de la investigación se presenta la tabla 1 donde se muestra los recorridos diarios en kilómetros para las zonas que anteriormente fueron definidas además de incorporar los días laborales por camión.

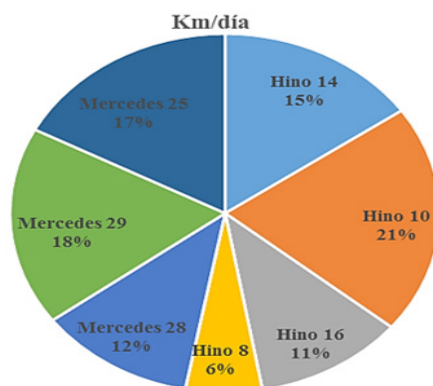
Tabla 1. Kilómetros de recorrido de GIDSA.

| Rutas | Días | Días lab | Km | Km/mes | Camión | Km/día |
|---------|------|----------|-----|--------|-------------|--------|
| Zona 12 | 6 | 24 | 186 | 4464 | Hino 14 | 31 |
| Zona 13 | 6 | 24 | 251 | 6024 | Hino 10 | 41,83 |
| Zona 17 | 6 | 24 | 137 | 3288 | Hino 16 | 22,83 |
| Zona 20 | 6 | 24 | 70 | 1680 | Hino 8 | 11,67 |
| Zona 21 | 4 | 16 | 96 | 1536 | Mercedes 28 | 24 |
| Zona 22 | 4 | 16 | 145 | 2320 | Mercedes 29 | 36,25 |
| Zona 27 | 2 | 8 | 70 | 560 | Mercedes 25 | 35 |

Fuente: Elaboración propia

La zona 13 representa el mayor porcentaje en las operaciones logísticas con un 21 % en 6 días de trabajo y con el camión de tipo Hino 14 de carga lateral, mientras que la zona 20 corresponde al 8% en el sistema de recolección.

Figura 3. Kilómetros de recorrido de GIDSA.



Fuente: Elaboración propia

En base a los valores descritos anteriormente, se determinaron los costos diarios de operación por vehículo, paralelamente se detallan los volúmenes de desechos que se trasladan. El recolector Hino N° 8 maneja un total de 20 toneladas correspondientes al 34 %, seguidos por los vehículos Mercedes N° 29 e Hino N° 14 con 24% y 12% respectivamente como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Costos en base a la capacidad de cada camión

| Camión | Costo por km | Toneladas/día | Nº Habitantes | Costo/día |
|-------------|--------------|---------------|---------------|-----------|
| Hino 14 | 0,34 | 7,7 | 3801 | 10,54 |
| Hino 10 | 0,25 | 7 | 3500 | 10,46 |
| Hino 16 | 0,46 | 4,5 | 9500 | 10,50 |
| Hino 8 | 0,89 | 20 | 8900 | 10,39 |
| Mercedes 28 | 0,98 | 13,83 | 8495 | 23,52 |
| Mercedes 29 | 0,65 | 4,79 | 9715 | 23,56 |
| Mercedes 25 | 2,68 | 0,8 | 7000 | 93,80 |
| | Total | 58,62 | | |

Fuente: Elaboración propia

Implementación del modelo

Para cada zona se aplica un modelo simple de transporte que genera la cantidad óptima que viajes que se requieren en la zona acompañado de un costo total logístico diario dependiendo de la frecuencia semanal de uso. A continuación se presentan los resultados para la aplicación del modelo en la zona 12, cabe indicar que el mismo proceso se usa para el resto de zonas planteadas en la investigación.

Zona 12

Se plantea el uso del vehículo en 13 calles para un viaje y se genera otro viaje para la fase restante, es decir 8 calles. En este caso se realiza el análisis para el día lunes y estos resultados servirán para los días miércoles y viernes porque tienen las mismas condiciones de trabajo.

Tabla 3. Detalles de la cantidad de sólidos trasladados por viaje

| | Toneladas | Km | Calles | Costo / Km |
|---------|-----------|-------|--------|------------|
| | 7,7 | 90 | 21 | 0,34 |
| viaje 1 | 4,77 | 55,71 | 13 | |
| viaje 2 | 2,93 | 34,29 | 8 | |

Fuente: Elaboración propia

Una vez determinados los costos se plantea el modelo de programación lineal que resuelve la red utilizando Solver de Excel como herramienta de optimización, obteniendo como resultado un valor en la función objetivo de 124,49 dólares por día.

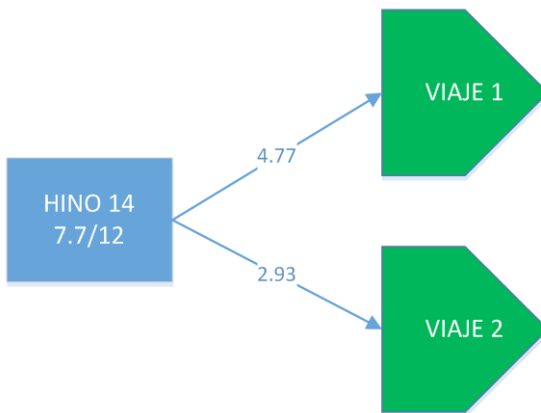
Figura 4. Hoja de cálculo para optimización de la zona 12

| | | | | | |
|----------------------------|------------|---------|---------|------|--------|
| Min Z = | \$124,49 | | | | |
| | | Viaje 1 | Viaje 2 | | |
| | | x11 | x12 | | |
| Vars Dec | | 4,77 | 2,93 | | |
| Cost \$/km | | 18,94 | 11,66 | | |
| Restricciones de capacidad | | | | | |
| ZONA 12 | Hino N° 14 | 1 | 1 | 7,7 | ≤ 12 |
| Restricciones de demanda | | | | | |
| | Viaje 1 | 1 | | 4,77 | = 4,77 |
| | Viaje 2 | | 1 | 2,93 | = 2,93 |

Fuente: Elaboración propia

Durante los días lunes, miércoles y viernes el camión enviado a la zona 12 es el camión Hino N° 14 con una capacidad de 12 toneladas de carga, el número de viajes que realiza son dos, en el primero recoge 4,77 toneladas, en el segundo viaje recoge 2,93 toneladas, de esta manera al día puede recoger las 7,7 toneladas diarias que producen en dicha zona.

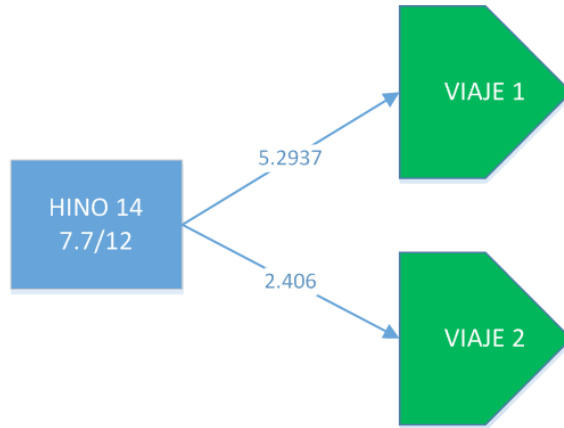
Figura 5. Red de recolección optimizada de la zona 12 para los días lunes, miércoles y viernes



Fuente: Elaboración propia

Durante los días martes, jueves, sábado el camión enviado a la zona 12 es Hino N°14 el cual tiene una capacidad de 12 toneladas, el número de viajes que realiza son dos, ya que son 2 rutas, en el primero recoge 5,2937 toneladas, en el segundo viaje recoge 2,406 toneladas, de esta manera al día puede recoger las 7,7 toneladas diarias que producen en dicha zona.

Figura 6. Red de recolección optimizada de la zona 12 para los días martes, jueves y sábado.



Fuente: Elaboración propia

Usando la misma metodología se pueden detallar los siguientes resultados para el resto de la red logística de GIDSA:

Zona 13

Durante los días lunes, miércoles y viernes el camión enviado a la zona 13 es Hino N°10 el cual tiene una capacidad de 12 toneladas, el número de viajes que realiza es 2, en el primero recoge 3,5 toneladas, en el segundo viaje recoge 3,5 toneladas, de esta manera al día puede recoger las 7 toneladas diarias que producen en dicha zona. Los días martes y jueves el número de viajes que realiza es 2 con el mismo vehículo, en el primero recoge 4,66 toneladas, en el segundo viaje recoge 2,333 toneladas.

El domingo el camión hace son dos viajes, en el primero recoge 1,555 toneladas, en el segundo viaje recoge 5,444 toneladas, de esta manera al día puede recoger las 7 toneladas diarias que producen en dicha zona.

Zona 17

En la zona 17 el camión enviado es un Hino N°16 cuya capacidad de carga es de 12 toneladas, para esta zona la cantidad de basura que debe recoger es de 4,5 toneladas, en un solo viaje.

Zona 20

Se asigna el camión Mercedes N°29 con una capacidad de 16 toneladas, pero para este caso se incluyen 32 toneladas puesto que el camión debe realizar 3 viajes, los dos primeros recoge 8,333 y 6,666 respectivamente, en las dos rutas que debe recorrer abastece su capacidad de 16 por lo que debe dejar la basura en el botadero y regresa por la basura restante, en el viaje número 3 que es de 5 toneladas

Zona 21

Para el camión recolector de basura enviado a la zona 21 es unas Mercedes N°29 cuya capacidad es de 16 toneladas, el número de viajes que realiza es de dos, el primer viaje recoge 8,80 toneladas, en el viaje número dos carga 5,029, completando de esta manera en los dos viajes 13,83 toneladas, cubriendo así la demanda diaria de recolección de basura.

Zona 22

Para la zona 22 se envía un recolector Mercedes N°29 cuya capacidad de recolección es de 16 toneladas, el número de viajes que realiza son dos en los cuales en el primer viaje el número de toneladas de basura es de 2,395, el viaje número dos es de 2,395 completando de esta manera en los dos viajes 4,79 toneladas, cubriendo de esta manera la demanda diaria de recolección de basura.

Zona 27

El día jueves se envía una camioneta la N°23 cuya capacidad de carga es de 2 toneladas, para esta zona la cantidad de basura que debe recoger es de 0,8 toneladas, en una sola ruta por lo que el camión realiza solamente un viaje

En la siguiente etapa se llegó a determinar los costos optimizados para cada zona de forma diaria, semanal, mensual y anual como se detalla en la tabla N° 4.

Tabla 4. Variación de los costos de recolección de GID-SA

| Zona | Lunes | Martes | Miércoles | Jueves | Viernes | Sábado | Domingo | Costo Semanal | Costo Mensual | Costo Anual |
|------|---------|--------|-----------|--------|---------|---------|---------|---------------|---------------|-------------|
| 12 | 124,49 | 133,71 | 124,49 | 133,7 | 124,49 | 133,7 | - | 774,58 | 3098,32 | 37179,84 |
| 13 | 79,62 | 80,69 | 79,62 | 80,69 | 79,62 | 88,16 | - | 488,43 | 1953,73 | 23444,81 |
| 17 | 107,64 | 107,64 | - | 107,64 | 107,64 | 107,64 | 175,95 | 714,15 | 2856,6 | 34279,2 |
| 20 | 432,61 | 432,61 | - | 432,62 | 432,61 | 432,61 | - | 2163,06 | 8652,25 | 103827,06 |
| 21 | 698,95 | - | 698,95 | - | 698,95 | 698,95 | - | 2795,8 | 11183,2 | 134198,4 |
| 22 | 225,73 | - | 225,73 | - | 225,73 | 225,73 | - | 902,92 | 3611,66 | 43339,92 |
| 27 | - | - | - | 64,32 | 85,76 | - | - | 150,08 | 600,32 | 7203,84 |
| T | 1669,04 | 754,65 | 1130,36 | 818,97 | 1756,41 | 1686,79 | 175,95 | 7988,99 | 31956,08 | 383473,07 |

Fuente: Elaboración propia

Cálculo del tipo de vehículo a usar

Paralelamente se analizó el modelo descrito en la ecuación 3 de acuerdo los datos suministrados por la empresa se pudo determinar que Ambato genera un 0,8 Kg/día por habitante.

Tabla 5. Datos iniciales del sistema

| | |
|----------------------|----------|
| Total kg de residuos | 58620,00 |
| P | 50911,00 |
| G | 0,87 |
| S | 44215,80 |
| 2S | 88431,59 |

Fuente: Elaboración propia

$$Z_{min} = 10,54x_1 + 10,46x_2 + 10,5x_3 + 10,39x_4 + 23,52x_5 + 23,56x_6 + 93,8x_7 \quad (10)$$

La ecuación 10 establece una función de minimización que busca encontrar el número de vehículos de acuerdo a la capacidad y el costo de diario de operación y que satisfagan las necesidades de la localidad.

El planteamiento de las restricciones se muestra en la tabla N° 6 y la ecuación 11; nace del cálculo de los costos diarios de operación de los siete camiones, incluido el número de viajes por día y la eficiencia del sistema de recolección.

Tabla 6. Restricción 1 para el macroruteo

| Camión Zona 12 x1 | | Camión Zona 13 x2 | | Camión Zona 17 x3 | | Camión Zona 20 x4 | | Camión Zona 21 x5 | | Camión Zona 22 x6 | | Camión Zona 27 x7 | |
|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|------|
| Wi | 12000 | Wi | 12000 | Wi | 12000 | Wi | 16000 | Wi | 16000 | Wi | 12000 | Wi | 2000 |
| Ni | 2 | Ni | 2 | Ni | 1 | Ni | 2 | Ni | 2 | Ni | 2 | Ni | 1 |
| ni | 0,85 | ni | 0,85 | ni | 0,85 | ni | 0,9 | ni | 0,9 | ni | 0,85 | ni | 0,8 |
| f | 20400 | f | 20400 | f | 10200 | f | 28800 | f | 28800 | f | 20400 | f | 1600 |

Fuente: Elaboración propia

$$20400 x1 + 20400 x2 + 10200 x3 + 28800 x4 + 28800 x5 + 20400 x6 + 1600 x7 \geq 88431,5906 \quad (11)$$

Para la segunda restricción incluye los costos diarios de la mano de obra y el costo máximo de operación que establece la empresa municipal generando la ecuación N° 10.

Tabla 7. Restricción 2 para el macroruteo

| Camión Zona 12 x1 | | Camión Zona 13 x2 | | Camión Zona 17 x3 | | Camión Zona 20 x4 | | Camión Zona 21 x5 | | Camión Zona 22 x6 | | Camión Zona 27 x7 | |
|-------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|
| ki | 48,52 | ki | 48,52 | ki | 48,52 | ki | 48,52 | ki | 48,52 | ki | 48,52 | ki | 48,52 |
| W | 182,77 | W | 182,77 | W | 182,77 | W | 182,77 | W | 182,77 | W | 182,77 | W | 182,77 |
| f | 48,52 | f | 48,52 | f | 48,52 | f | 48,52 | f | 48,52 | f | 48,52 | f | 48,52 |

Fuente: Elaboración propia

$$48,52 x1 + 48,52 x2 + 48,52 x3 + 48,52 x4 + 48,52 x5 + 48,52 x6 + 48,52 x7 \leq 182,77 \quad (10)$$

El resto de restricciones se omiten porque no existe la opción de incluir vehículos de recolección nuevos para el municipio. La solución el problema se plantea aplicando el programa Lindo y arroja los siguientes resultados:

Z LP OPTIMUM FOUND AT STEP 1

OBJECTIVE FUNCTION VALUE

1) 35.47689

| VARIABLE | VALUE | REDUCED COST |
|----------|----------|--------------|
| X1 | 0.000000 | 3.180417 |
| X2 | 0.000000 | 3.100417 |
| X3 | 0.000000 | 6.820209 |
| X4 | 3.414522 | 0.000000 |
| X5 | 0.000000 | 13.130000 |
| X6 | 0.000000 | 16.200417 |
| X7 | 0.000000 | 93.222778 |

| ROW | SLACK OR SURPLUS | DUAL PRICES |
|-----|------------------|-------------|
| 2) | 0.000000 | -0.000361 |
| 3) | 17.097382 | 0.000000 |

NO. ITERATIONS= 1

DISCUSIÓN

Este documento presenta un nuevo problema de dimensionamiento de una flota de vehículos recolectores que surge en un área urbana donde operan, las zonas tienen demanda del servicio. El problema, tiene como objetivo reducir el costo operativo general en un marco que garantice el servicio total de la ciudad. Se aplica una formulación de programación matemática para el problema que se resuelven con un algoritmo de macroruteo. Además, para estimar los ahorros provenientes de la modelo, las soluciones óptimas se comparan con las soluciones que se obtienen con la situación actual de la operadora. Se determinó que se necesita de 4 camiones con una capacidad de 16 toneladas para cumplir con la demanda de 58,62 toneladas diarias, con ello se reduce el número de la flota de camiones de 7 a 4, obteniendo un ahorro anual de \$15885.59 correspondiente a un 30,18% de reducción a diferencia del sistema actual.

CONCLUSIONES

Analizando el proceso de recolección de desechos sólidos de la ciudad de Ambato se puede definir como un problema de enrutamiento de vehículos (VRP) que puede ser optimizado luego de determinar los costos de operación del sistema, la capacidad de carga de los vehículos, frecuencias de recolección, desechos producidos por día, costos de mano de obra.

Al aplicar el modelo de distribución de redes, se pudo determinar el costo de cada una de las siete zonas analizadas en las que el GIDSA opera con sus camiones de carga lateral, obteniendo un costo anual de operación de \$ 383473,07 usando las mismas frecuencias de funcionamiento.

Aplicando el modelo de macroruta se pudo establecer que el sistema actual de recolección necesita de cuatro camiones de carga lateral con una capacidad de 16 toneladas para cumplir con el 100% de la demanda de las siete zonas que producen un estimado de 58,62 toneladas diarias, con ello se reduce el número de la flota de camiones

de siete a cuatro, teniendo un ahorro anual significativo de \$15885.59

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Berhan, E., Beshah, B. y Kitaw, D. (2014). Stochastic Vehicle Routing Problem: A Literature Survey. *Journal of Information & Knowledge Management*, 13(3), p12, doi: 10.1142/S0219649214500221

Camm, J., Magazine, M., Kuppusamy, S. y Martin, K. (2017). The demand weighted vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 262,151-162. doi: 10.1016/j.ejor.2017.03.033.

Cordeau, J., Laporte, G., Savelsbergh, M. W. y Vigo, D., (2007). Vehicle Routing. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Montréal: C. Barnhart and G. Laporte, 367–428. doi: 10.1016/S0927-0507(06)14006-2

Erdogan, G. (2017). An open source Spreadsheet Solver for Vehicle Routing Problems. *Computers and Operations Research*, 84, 62-72. doi: 10.1016/j.cor.2017.02.022

Fernández, E., Roca-Riu, M. y Speranza, G. (2017). The Shared Customer Collaboration Vehicle Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 1-17. doi:10.1016/j.ejor.2017.08.051

Infante Rivera, L. y Litvinchev I. (2013). Routing vehicles in a special transportation network. 6th IFAC Conference on Management and Control of Production and Logistics, 6(1), 385-387,

Liu, L., Luo, Z., Qin, H. y Lim, A. (2017). A branch-and-cut algorithm for the two-echelon capacitated vehicle routing problem with grouping constraints. *European Journal of Operational Research*. doi:10.1016/j.ejor.2017.10.017

Mazzeo, S. y Loiseau, I. (2004). An Ant Colony Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing, *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 18(1), pp. 181-186.

Murakami, K. (2017). A new model and approach to electric and diesel-powered vehicle routing. *Transportation Research Part E*. 23-37. doi: 10.1016/j.tre.2017.09.004.

Raa, B., Dullaert, W. (2017). Route and fleet design for cyclic inventory routing. *European Journal of Operational Research*, 256, 404-411. doi: 10.1016/j.ejor.2016.06.009.

Russell, R. (2017). Mathematical programming heuristics for the production routing problem. *International Journal of Production Economics*. 193, 40-49. doi: 10.1016/j.ijpe.2017.06.033.

SEDESOL. (1997). Manual para el diseño de rutas de recolección de residuos sólidos municipales, México, D.F.: Human Consultores, S.A.