

Optimization of Vehicle Routing in the Distribution of Products of a Company in the City of Sincelejo – Colombia

Gean Pablo Mendoza Ortega, Msc¹, Cesar José Vergara Rodríguez, Msc¹, Marcio Ortiz Rodríguez, Ing¹, Jairo Gamarra Atencia, Ing¹

¹ Corporación Universitaria del Caribe – CECAR, Colombia, gean.mendoza@cecar.edu.co, cesar.vergara@cecar.edu.co, marcio.ortiz@cecar.edu.co, jairo.gamarra@cecar.edu.co

Abstract– This research presents a model for the problem of vehicle routing with restrictions of time, capacity and homogeneous fleet adjusted to a company in the city of Sincelejo; where the distribution chain was characterized, establishing the number of clients and travel times. In this study, the CVRP - HFTC model was coded in GAMS, obtaining a solution in computational times; and reducing costs in distribution operations by approximately 51%. In this way, we can find solutions close to the optimal solution for the problem under study

Keywords- Model, Routing, Distribution, Fleet

Digital Object Identifier (DOI):<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.19>
ISBN: 978-0-9993443-1-6
ISSN: 2414-6390

Optimización del Ruteo de Vehículos en la Distribución de Productos de una Empresa en la Ciudad de Sincelejo – Colombia.

Optimization of Vehicle Routing in the Distribution of Products of a Company in the City of Sincelejo - Colombia.

Gean Pablo Mendoza Ortega, Msc¹, Cesar José Vergara Rodríguez, Msc¹, Marcio Ortiz Rodríguez, Ing¹, Jairo Gamarra Atencia, Ing¹

¹ Corporación Universitaria del Caribe – CECAR, Colombia, gean.mendoza@cecar.edu.co, cesar.vergara@cecar.edu.co, marcio.ortiz@cecar.edu.co, jairo.gamarra@cecar.edu.co.

Resumen – Esta investigación presenta un modelo para el problema de ruteo de vehículos con restricciones de tiempo, capacidad y flota homogénea (CVRP – HFTC) ajustado a una empresa de la ciudad de Sincelejo; donde se caracterizó la cadena de distribución, permitiendo establecer el número de clientes, tiempos de recorrido y número de rutas actuales necesarias para realizar dicho proceso. Los costos de distribución actuales en los que incurre la empresa por semana laboral son de aproximadamente \$162,148.59. En este estudio el modelo CVRP – HFTC fue codificado en el software General Algebraic Modeling System (GAMS), obteniendo una solución en tiempos computacionales aceptables; y permitiendo reducir los costos en las operaciones distribución en un 51 % aproximadamente. De esta manera así hallar soluciones cercanas a la solución óptima para el problema en estudio.

Palabras claves – Modelo, Ruteo, Distribución, Flota.

Abstract – This research presents a model for the problem of vehicle routing with time constraints, capacity and homogeneous fleet (CVRP - HFTC) adjusted to a company in the city of Sincelejo; where the distribution chain was characterized, allowing to establish the number of clients, travel times and number of current routes necessary to carry out said process. The current distribution costs incurred by the company per working week are approximately \$ 162,148.59. In this study, the CVRP - HFTC model was coded in the General Algebraic Modeling System (GAMS) software, obtaining a solution in acceptable computational times; and allowing to reduce costs in operations distribution by approximately 51%. In this way, we can find solutions close to the optimal solution for the problem under study.

Keywords – Model, Routing, Distribution, Fleet

I. INTRODUCCIÓN

Un sistema logístico busca agregar valor a los bienes y servicios en lo referido a la entrega de los productos al consumidor refiriéndose al tiempo y lugar adecuado, teniendo

en cuenta que no solo se debe hacer entrega un producto con calidad sino que también, se debe prestar un excelente servicio, esto se debe a las exigencias de los consumidores [1].

Estos procesos inician desde la compra y recepción de mercancías hasta su fabricación y distribución donde finaliza el proceso logístico; Díez de castro y Navarro [2] afirman, que esta última actividad es de gran relevancia por su significancia en la eficacia y eficiencia del sistema económico de la empresa.

La distribución es el último eslabón del proceso logístico de una organización y abarca actividades desde el cargue y descargue de mercancías a los vehículos en los centros de acopios o depósitos hasta los distintos puntos de ventas, con el objetivo de prever cualquier inconveniente y conseguir que los productos estén justo en el momento y lugar que el cliente los solicite con los mínimos costos; la distribución logística se puede convertir en un punto clave de competencia para la organización en el mercado[3]. Así mismo, [4] define que la distribución es una de las funciones claves en los sistemas logísticos, que implica el flujo de productos desde las plantas de fabricación o los centros de distribución a través de la red de transporte hasta los consumidores.

El sistema de transporte es uno de los mecanismos relevantes para la mayoría de las empresas, así mismo es uno de los factores trascendentales en la satisfacción de los usuarios. Sin embargo, eleva los costos logísticos en gran manera sino se utiliza adecuadamente. Por tal razón, la disminución en los costos de transporte significa una gran ayuda para las industrias [5]. De igual manera Katiyar y Bansal [6] afirman que el uso eficiente de los vehículos afecta directamente dichos costos de un 40% a un 50% del dinero gastado en los envíos, es decir, el manejo inadecuado de estos recursos incide directamente en el incremento de costos. Esto se debe a que el transporte no agrega valor al producto, sino

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.19>
ISBN: 978-0-9993443-1-6
ISSN: 2414-6390

por el contrario lo disminuye, por ende se debe manejar de forma eficiente[7].

Se sabe que el transporte es un componente de consideración en las empresas, donde se identifica el problema, el cual es encontrar el conjunto de rutas que satisfagan los requerimientos de los clientes obteniendo un mínimo costo total; esto se conoce como el problema de ruteo de vehículos (VRP, por sus siglas en inglés) el cual es uno de los principales problemas de optimización combinatoria [8]. Este tipo de problemas es difícil de resolver, y más aún si la cantidad de cliente es elevada[9].

El inicio de la gestión y organización de la distribución demanda disponer de tecnologías eficientes de optimización de las rutas; en lo cual, este sistema, además de afectar el desarrollo de operaciones, también afecta las decisiones tácticas y las estrategias como la asignación óptima de la cantidad de vehículos, valoración de costos, entre otras [10]. En tal sentido, Vazquez [11] define que la optimización es el proceso de concertar los inputs (entradas) a las características de un modelo o experimento y de esta manera hallar los outputs (salidas) o las soluciones mínimas o máximas según sea el caso. Lo que va de la mano con lo expuesto por Guasmayan – Guasmayan [12] quien expresa que el significado de optimización es hallar el mejor valor, el mínimo cuando se busca minimizar y el máximo cuando se busca maximizar, de una función objetivo descrita en un modelo matemático que se limita a una serie de restricciones.

El problema de ruteo de vehículos por primera vez fue propuesto es en el año 1959 por Dantzing y Ramser [13]. A partir de su introducción se hicieron muchos estudios dando a conocer que es un tipo de problema de optimización combinatoria que se produce con frecuencia en aplicaciones de la vida real, como el transporte, la logística y la programación[14]. Su principal objetivo es servir a todos los clientes que imponen una demanda limitada con el mínimo número de vehículos o costo total [15]. Según Katiyar [6] el VRP se ocupa de encontrar el conjunto mínimo de rutas, comenzando y terminando en el depósito central, de una flota de vehículos homogéneos que sirven a un número de clientes con exigencias de un bien de tal manera que se conserva la restricción de capacidad.

Posteriormente surgieron los diferentes tipos de variantes que incluye una larga familia de problemas de optimización, tales como el CVRP (problema de ruteo de vehículos capacitado) [16]. Consecutivamente se habla de VRP heterogéneo (HVRP) refiriéndose cuando se utiliza diferentes tipos de vehículos y las rutas tienen que ser diseñadas de acuerdo a la capacidad de cada vehículo [17]. Luego surgió el VRPTW o problema de ruteo vehicular con ventanas de tiempo en el año 1977; en este escenario, un vehículo puede

visitar un lugar sólo en una ventana de tiempo especificada [15].

Por su parte Baños *et al.* [14] presenta una variante Multi-objetivo del VRPTW que minimiza simultáneamente la distancia recorrida y el desequilibrio de las rutas; este desequilibrio se analiza desde dos puntos de vista: el desequilibrio en las distancias recorridas por los vehículos, y el desequilibrio en las cargas entregadas por ellos. Tavakkoli – Moghaddam *et al.* [9] presentan una extensión de un problema de rutas para vehículos competitivos con ventanas de tiempo (VRPTW) para encontrar rutas cortas con los gastos de desplazamiento mínimo y máximo de venta al proporcionar un buen servicio a los clientes antes de la entrega de los productos por otros distribuidores rivales, en donde para resolver el problema propuesto se desarrolló un modelo matemático, utilizando un enfoque de recocido simulado.

A. Tipos de Problemas de Ruteo

Dentro de los problemas de ruteos más trabajados en la literatura, se puede encontrar el problema del agente viajero o TSP (por sus siglas en inglés), siendo el más simple de los problemas de optimización combinatoria; este problema consiste en un agente o vehículo con capacidad infinita que parte de una ciudad de origen, desea visitar todas las n ciudades en una sola ruta y luego regresar al punto de origen, el objetivo del agente es hacer todo el recorrido con la menor distancia (costo, tiempo, etc.) total de viaje; donde cabe resaltar que no existen restricciones temporales [5]. Una variante de este problema es el problema de m agentes viajeros o m -TPS (por sus siglas en inglés), es una generalización del TSP, donde se tiene un único depósito, n clientes y m agentes o vehículos; donde el objetivo es el de construir m rutas para cada agente o vehículo de manera que cada cliente sea visitado exactamente una vez por un solo vehículo, con la particularidad de que cada ruta debe iniciar y finalizar en el depósito.

También se pueden encontrar otras variantes de este tipo de problemas, como el caso del Problema de Ruteo de Vehículos con restricciones de capacidad (VRP – CVRP) [18], [19]. Así mismo, el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo – VRPTW. Por otro parte se encuentra el problema de ruteo de vehículos con restricciones de tiempos – VRPTC (por sus siglas en inglés), donde se pretende servir a un conjunto de clientes que están geográficamente dispersos y estos solo pueden ser servidos solo una vez por un solo vehículo, estos inician y terminan la ruta en el depósito central, la capacidad considerada de los vehículos no puede ser excedida por las demandas de los clientes en peso ni volumen [20].

II. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

A. Descripción del Problema

En esta investigación se presenta la aplicación del problema de ruteo de vehículos con flota homogénea, restricciones de capacidad y tiempo o CVRP – HFTC (por sus siglas en inglés) en una empresa de distribución de materiales para la construcción. Este tipo de problemas son una variante que nace de la combinación del CVRP y VRPTC anexándole la limitante de que todos los vehículos tienen la misma capacidad. El modelo CVRP – HFTC puede definirse matemáticamente mediante un grafo dirigido $G(N, A)$, en el cual N conforma a un conjunto de vértices, los cuales se dividen en dos subconjuntos: $N_d = \{n_1, n_2, n_3, \dots, n_d\}$ es el conjunto de almacén(es), y $N_c = \{n_1, n_2, n_3, \dots, n_c\}$ es el conjunto de nodos o clientes a los cuales se debe satisfacer una necesidad, haciendo entrega de los productos que esté requiriendo. Por último, $N = \{N_d + N_c\}$ es el conjunto de nodos o clientes incluyendo los depósitos o centros de acopio. Por otro lado A es el conjunto de arcos que interrelaciona a los nodos o clientes a través de una matriz de costo de tamaño $N \times N$ de tal forma que cada arco tiene establecido una distancia C_{ij} , donde el conjunto $A = \{i, j\}$.

En este modelo los recorridos son realizados por los vehículos K los cuales son de capacidad homogénea denominada Q_k que restringe el sistema, los vehículos inician y terminan su ruta en el almacén (N_d), en su recorrido deben satisfacer la demanda D_j de cada uno de los clientes (N_c), haciendo entrega de los productos, la cantidad de productos a entregar se calcula mediante pronósticos teniendo en cuenta el historial de compras de cada uno de los clientes.

Los métodos de solución para este tipo de problemas se pueden agrupar en 3 categorías, métodos exactos, heurísticas y meta heurísticas [21] y estos a su vez se dividen en otros. Para el caso de los métodos exactos, los de mayor aplicación se encuentran los de Ramificación y Acotamiento (Branch and Bound) [22] y los Métodos de Ramificación y Corte (Branch and Cut) [23]–[25]. Dentro de las técnicas Heurísticas, se pueden encontrar la del Vecino más cercano[4], Recocido simulado, búsqueda tabú, colonias de hormigas y algoritmos genéticos, entre otras.

En este trabajo para la solución del modelo planteado se trabajó con método de solución exacto, codificado en el software GAMS, que según Mora [11] es una herramienta de niveles altos para el modelamiento y resolución de programación matemática y optimización, con gran calidad y versatilidad a la hora de escribir los modelos. Una de las ventajas que presenta GAMS, es la facilidad del ingreso de los parámetros y datos a utilizar y permite el uso de métodos exactos, como es el algoritmo de Branch and Cut el cual es ejecutado por el solver CPLEX al momento de resolver problemas de programación entera mixta (MIP, de sus siglas en inglés) [26]. Seguidamente se presenta la formulación del modelo matemático planteado en esta investigación.

El problema considerado en esta investigación, es un problema de ruteo de vehículos con flota homogénea, restricciones de capacidad y tiempo; el cual tiene como objetivo minimizar los costos totales del sistema de distribución. En este modelo los recorridos son realizados por un vehículo con capacidad limitada; este inicia y termina su ruta en la empresa que para este caso hace las veces de centro de distribución (CD), donde los productos se consolidan de acuerdo a sus destinos. En su recorrido debe satisfacer la demanda de los 115 clientes de acuerdo a la planificación de la semana, haciendo entrega de cada uno de los productos que estos requieren.

En el recorrido, los clientes deben ser atendidos dentro de un tiempo máximo de uso del vehículo, el cual se utiliza durante una jornada laboral de 8 horas, donde cada cliente tiene un tiempo de servicio, y un tiempo de viaje del vehículo entre cada cliente.

B. Suposiciones

Las características y suposiciones básicas aplicadas en el modelo propuesto se presentan a continuación:

- El punto de partida y el punto final de cada ruta del vehículo deben ser los mismos
- Los clientes deben ser atendidos por el vehículo de la empresa.
- No se puede sobrepasar la capacidad del vehículo en cuanto al peso de los productos.
- La sumatoria de los tiempos de servicio y transporte de una ruta no puede exceder los 480 minutos (8 horas) que se establecen para utilizar el vehículo.
- Se debe satisfacer la demanda de los clientes.

C. Notaciones y Modelo Propuesto

Las anotaciones utilizadas para el problema se enumeran a continuación:

Conjuntos

| | |
|-------|---|
| N_d | Es nodo que representa la empresa |
| N_c | Es el conjunto de 115 clientes. |
| N | Conjunto de los 115 clientes más la empresa |
| K | Es el vehículo marca JAC |

Parámetros

| | |
|--------------|--|
| Q_k | Es la capacidad de 6000 Kg del vehículo |
| C_{V_k} | Es el costo variable por uso del vehículo. |
| C_{ij} | Es la distancia en kilómetros (Km) de viajar entre los 115 clientes. |
| D_p | Es la demanda a satisfacer de los clientes, representada en cantidad de productos. |
| T_{ijk} | Es el tiempo de viaje del vehículo k entre los clientes representado en min. |
| $T_{s_{jk}}$ | Es el tiempo servicio del vehículo a cada uno del cliente representado en minutos |
| T_k | Es el tiempo máximo de ruta del vehículo representado en min. |

Variables de Decisión

| | |
|-----------|---|
| X_{ijk} | Variable binaria que representa la decisión de, 1 si el vehículo viaja de un cliente a otro, y 0 en caso contrario. |
|-----------|---|

Función objetivo

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in A} \sum_{j \in A} X_{ijk} (C_{V_k} C_{ij}) \quad (1)$$

Restricciones

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N_c} X_{ijk} = 1; \forall i \in N_c \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N_c} X_{iN_d k} = \sum_{j \in N_c} X_{N_d j k}; \forall k \in K, N_d \in N \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N_c} X_{ijk} D_j \leq Q_k; \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N_c} \sum_{j \in N_c} X_{ijk} \leq D_j; \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N_c} T_{s_{jk}} \sum_{j \in N_c} X_{ijk} + \sum_{i \in N_c} \sum_{j \in N_c} X_{ijk} T_{ijk} \leq T_k; \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N_c} \sum_{j \in N_c} X_{ij} \geq 1; \forall N_c \quad (7)$$

$$X_{ijk} \in \{0, 1\}; \forall i, j \in A; k \in K \quad (8)$$

El modelo matemático de ruteo vehicular representado por (1), es construido a partir de las diferentes estructuras desarrolladas por [16], [17], [20]; adaptándolos a los requerimientos específicos para el modelado de la distribución en la empresa en este estudio y busca minimizar los costos de operación.

En este sentido, (2) garantiza que cada uno de los clientes sean visitados solo una vez por el vehículo asignado. Por su parte, (3) asegura que el vehículo inicie en la bodega de la empresa y finalice en el mismo lugar. De la misma manera, (4) garantiza que no se exceda la capacidad del vehículo por cada ruta. Así mismo, (5) establece que la cantidad de productos que se cargue al vehículo no exceda la demanda o requerimientos por parte de los clientes. Igualmente (6) permite establecer que la suma del tiempo requerido para el servicio de los clientes y el tiempo requerido para viajar entre ellos, no exceda el tiempo máximo del cual se puede emplear el vehículo y (7) funciona como restricción que elimina los sub – tours. Por último, (8) define el dominio de las variables.

III. CADENA DE SUMINISTRO A ESTUDIAR

La empresa en la cual se aplicó el modelo planteado anteriormente se encuentra ubicada en la ciudad de Sincelejo, departamento de Sucre – Colombia. Se dedica a la producción y distribución de insumos para la construcción y la industria. El procedimiento de distribución de mercancías se hace una vez se tenga consolidado el pedido para una semana.

La tabla I muestra un segmento de los 115 clientes distribuidos en su gran mayoría en la ciudad de Sincelejo y otros municipios del departamento de Sucre. Para el cumplimiento de los pedidos de estos, se realiza en días de trabajos hábiles semanales, es decir desde el día lunes hasta el día sábado.

TABLE I
LISTA DE CLIENTES DE LA EMPRESA

| N° | Clientes |
|-----|-----------------------|
| 1 | Ferro el pescador |
| 2 | Ferro Sincelejo |
| 3 | Material Laguna |
| 4 | Ferret la Frontera |
| 5 | Ferret Karrasco |
| 6 | Pintucentro DS |
| 7 | Comercializador betel |
| ... | ... |
| 114 | Ferret L y M |
| 115 | Bimcol S.A.S |

Fuente: Elaboración propia

Esta empresa cuenta con una gran variedad de productos de alta calidad que distribuyen a sus clientes; estos productos son de características similares, pero suelen variar en condiciones de peso y volumen; la tabla II muestra una parte de los productos de mayor venta en la empresa.

TABLE II
PRODUCTOS OFERTADOS POR LA EMPRESA

| N° | Nombre | Peso (Kg) |
|----|-------------------------------|-----------|
| 1 | Duraflex estuco base caja 3.5 | 20 |
| 2 | Blancodor boquilla blanca | 2 |
| 3 | Duraboquilla cerámica beige | 2 |
| 4 | Duraboquilla cerámica blanca | 2 |
| 5 | Pegadur cerámico gris | 25 |
| 6 | Tubo sanitario 4" | 5.8 |
| 7 | Pegadurmix | 2 |

Fuente: Elaboración propia

Además, cuenta con un vehículo de capacidad de 5.3 toneladas (t) y las rutas que recorre cada día fueron realizadas por la experiencia y expectativa del conductor. Actualmente se tienen 6 rutas que inicia desde el almacén, atiende a una serie de clientes y luego regresa al lugar de despacho. Por simplicidad de la investigación, se describe una de las rutas; que en este caso se trata de la ruta número 1, desarrollada actualmente en el primer día hábil de la semana, se encuentra compuesta por 20 nodos o cliente donde se incluyendo el centro de despacho de la empresa como se puede ver en la Fig. 1, recorriendo una distancia de aproximadamente 48.5 Km; lo que equivale a un costo de \$29,608 COP.

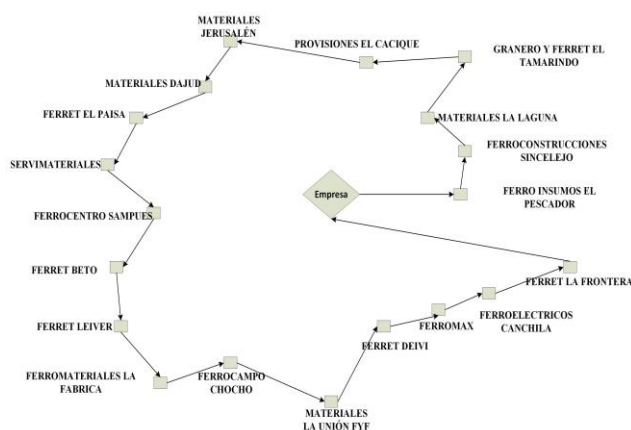


Fig 1. Recorrido ruta numero 1

Fuente: Elaboración propia

En la distribución de los productos a los diferentes clientes, donde se incurre en costos ya sean fijos o variables. En ese sentido, la empresa actualmente cuenta con dos en el área de transporte, un conductor, que hace las veces a su vez

de vendedor y un ayudante encargado de la entrega de mercancías. El primero se le asigna un salario mínimo mensual vigente, incluido prestaciones sociales que exige la ley más una bonificación; igual a \$ 1'314,370 COP. Mientras que al ayudante se le asigna un salario mínimo mensual vigente, incluido prestaciones sociales igual a \$ 1'114,370 COP.

Así mismo, se incurre en costos anuales de seguros por el uso del vehículo, un seguro general y el seguro obligatorio contra accidentes de tránsito de \$ 2'879,940 COP y \$664,400 COP respectivamente. Es decir, los costos mensuales por concepto de seguro son de \$ 295,361.67 COP.

Otro de los costos asociados al uso de vehículo está relacionado con la depreciación del valor de adquisición del mismo con el tiempo. En Colombia, se considera como vida útil probable de los bienes depreciables, lo que tiene que ver en este caso con vehículos automotores en general, es de 60 meses (5 años). El costo mensual por este concepto es de \$881,666.6 COP.

El Ministerio de Hacienda decretó que a partir del 1° de enero de 2017 los valores absolutos del impuesto sobre vehículos para la aplicación de las tarifas del impuesto sobre vehículos automotores, se ajustarán según la meta de inflación fijada por el Banco de la República en 3%. Según lo anterior, para los automotores particulares hasta \$43'953,000 es de 1.5%; los que estén entre \$43'953,000 COP hasta \$98'893,000 COP, es del 2.5% y los que se encuentren por encima de \$98'893,000 equivale al 3.5% [27].

El vehículo de la empresa en estudio se encuentra entre el segundo rango, quiere decir que su impuesto fijado será del 2.5%, teniendo en cuenta que este precio el costo asociado anual es de \$1'322,500 COP, lo que representa una suma de \$110,208.33 COP mensuales. El mantenimiento que se le hace al vehículo de la empresa, se realiza cada trimestre de forma preventiva y tiene un costo aproximadamente de \$650,000 COP; lo que representa un costo mensual de \$ 216,666.67COP; además de esto se hace un lavado del auto cada dos veces al mes con un costo de \$35,000 COP por cada vez que se lava; es decir, que mensualmente se tiene un costo de \$70,000 COP por mes, por este concepto. En resumen, se tiene un total de costos fijos mensuales de aproximadamente \$ 3'984,371 COP.

Dentro de los costos variables en el proceso de distribución de la empresa en estudio, dependen del recorrido en las rutas de distribución, representados en el consumo de combustible, peajes, entre otros. A diferencia de los costos fijos que se calculan por mes, estos costos se calculan por cada Kilómetro recorrido. Este costo se calculó, tomando como base la información recolectada en la empresa, donde se

muestra la distancia recorrida por semana y los costos por consumo de combustibles en la misma, como se muestra en la tabla III. Teniendo un costo por valor de \$390,000 COP mensuales, lo que equivale a un costo de \$ 603.72 COP por Km recorrido.

TABLE III
COSTOS POR CONSUMO DE COMBUSTIBLE

| Semanas | Km Recorrido | Costo de combustible (COP) |
|----------|--------------|----------------------------|
| 1 | 192 | \$100,000 |
| 2 | 211 | \$ 140,000 |
| 3 | 243 | \$ 150,000 |
| Total | 646 | \$ 390,000 |
| Promedio | 215,33 | \$ 130,000 |

Fuente: Elaboración propia

En los cambios de aceites que realiza el vehículo, se tiene en cuenta que este se realiza una vez se haya recorrido 8,000 Km, el costo del cambio de aceite es de \$ 251,000 COP. Es decir que el costo por Km recorrido de aceite es de \$31 COP. Así mismo, el costo asociado por el desgaste de los neumáticos, donde se debe tener en cuenta que la vida útil de estos, es de aproximadamente 50,000 Km, y el valor de cada uno está en aproximadamente \$ 603,900 COP por unidad, sabiendo que el vehículo hace uso de 6 de estas unidades. Esto quiere decir que, el costo representado por este uso por Km es de \$ 71.47 COP. lo que significa que se tienen un costo variable total por Km de \$710.19 COP.

De este modo, se estableció que el costo total actual para realizar el recorrido necesario para atender a los 115 clientes de la empresa en una semana laboral es de aproximadamente \$162,148.59 COP.

IV. RESULTADOS

En esta investigación el modelo ajustado propuesto fue desarrollado en un sistema de modelado para la programación matemática y optimización denominado GAMS, el cual utiliza el solver Cplex. El equipo computacional utilizado en la implementación y ejecución del programa, fue un ASUS X555L, con un procesador Core i5 – 5200U de 2.3 Ghz, 8 GB de RAM y un sistema operativo de 64 bits Windows 10.

Inicialmente se presenta la solución presentada por GAMS para el diseño de pequeñas instancias, en este caso se resuelve el problema con instancias pequeñas de 5, 10, 15, 20 y 30 dado la complejidad por el número de variables del modelo. Se considera los nodos o clientes en la participación de la creación del recorrido, número de iteraciones, tiempos computacionales, costo y mejor resultado con su respectivo porcentaje clientes. En la Fig 2. Se muestra los resultados

obtenidos en cuanto al tiempo computacional necesario para la solución del modelo junto con el Relative gap, el cual representa el porcentaje al cual se encuentra la solución encontrada de la óptima. Presentando que se asegura un resultado óptimo hasta la instancia con 15 clientes, y se va alejando del valor óptimo en la manera en que se aumenta el número de clientes en las instancias debido a que el GAP va aumentando.

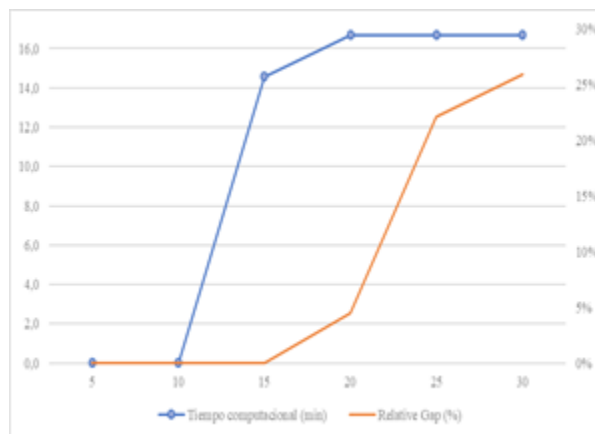


Fig 2. Relación tiempo computacional y GAP

Fuente: Elaboración propia

El modelo de ruteo de vehículos con flota homogénea, restricciones de capacidad y tiempo en la instancia donde se consideran los 115 clientes, produce un modelo con 13,571 variables simples y 13,455 variables discretas (Fig. 3).

MODEL STATISTICS

| | | | |
|---------------------|---------|--------------------|----------------------|
| BLOCKS OF EQUATIONS | 6 | SINGLE EQUATIONS | 26,911 |
| BLOCKS OF VARIABLES | 3 | SINGLE VARIABLES | 13,571 114 projected |
| NON ZERO ELEMENTS | 105,914 | DISCRETE VARIABLES | 13,455 |

Fig 3. Numero variables y ecuaciones del modelo

Fuente: Elaboración propia

La solución del modelo ajustado a las condiciones de la empresa en este estudio obtenida por el software GAMS establece que a distribución se haga utilizando 5 rutas, como se puede ver en las Fig 4, Fig 5, Fig 6, Fig 7 y Fig 8, las cuales representan dichas rutas. Los costos totales de distribución dada la solución obtenida son de aproximadamente \$79,039.784 COP, alcanzados en un tiempo computacional de 3558.28 segundos (s) y un GAP del 26.05 %, dado el tamaño o complejidad del modelo planteado.

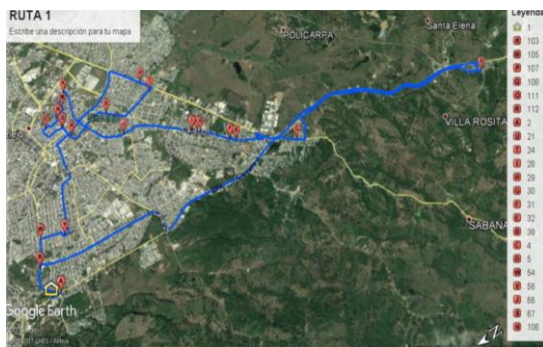


Fig 4. Diseño de la ruta numero 1
Fuente: Elaboración propia



Fig 5. Diseño de la ruta numero 2
Fuente: Elaboración propia

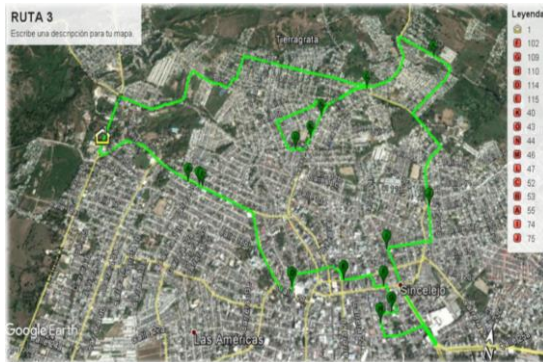


Fig 6. Diseño de la ruta numero 3
Fuente: Elaboración propia

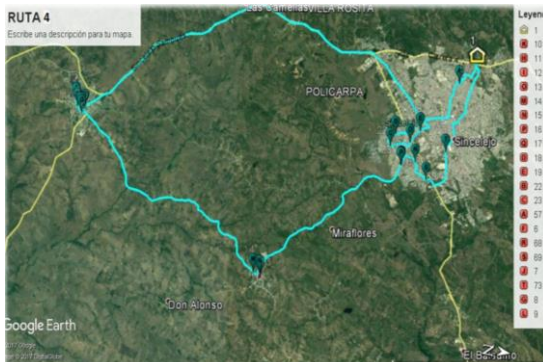


Fig 7. Diseño de la ruta numero 4
Fuente: Elaboración propia

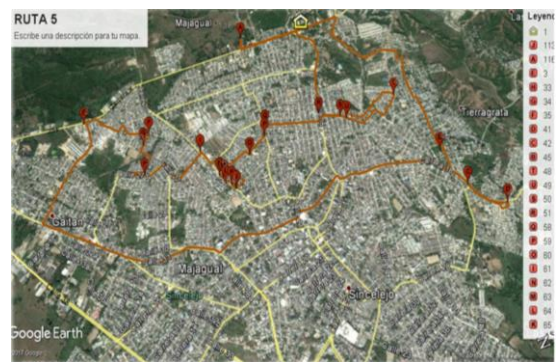


Fig 8. Diseño de la ruta numero 5
Fuente: Elaboración propia

Se hace notoria la disminución en los costos de distribución con respecto a lo manejado actualmente por la empresa en una disminución aproximada del 51 %, lo que hace viable la ejecución del plan de rutas obtenido por el software. La reducción en dinero tiene una disminución de \$83,108.80 pesos semanales, lo que conlleva a una reducción de \$4'321,657.91 COP anuales.

V. CONCLUSIONES

El problema se modela como un problema de enrutamiento de vehículos con un depósito. Presentamos una formulación matemática para el CVRP – HFTC. Se ha codificado en GAMS, quien utiliza un algoritmo exacto de ramificación y corte que es capaz de resolver instancias con hasta 20 nodos, y que esta se encuentre bajo condiciones óptimas.

Se pudo desarrollar un modelo matemático en el campo de la programación entera mixta (MIP) y de esta manera plantear una solución del problema de ruteo de vehículos con flota homogénea, restricciones de capacidad y tiempo; dado que la minimización de costos es uno de los factores que motivan a empresas y organizaciones a la mejora y desarrollo de distintos métodos en vía de la permanencia en el mercado.

Según la solución obtenida en esta investigación se logra reducir los costos en las operaciones de distribución hasta en un 51 %, aunque el tiempo computacional es elevado y relative GAP supera valores aceptables, esto debido a la complejidad del modelo planteado. De esta manera se evidencia la eficiencia de los métodos exactos en la optimización de modelos de programación entera mixta, lo que motiva la necesidad de diseñar algoritmos heurísticos, metaheurísticos y matemáticos que logren reducir este tipo de factores.

Aunque para el caso en estudio en que se está planificando la distribución semanal de una empresa de la ciudad de Sincelejo – Colombia, se pueda considerar aceptables el tiempo computacional necesario para encontrar la solución, aun cuando esta es cercana a la solución óptima.

Hay varias extensiones de este trabajo que podrían considerarse para futuras investigaciones, considerar por ejemplo un tiempo de viaje incierto, un comportamiento de la demanda bajo parámetros estocástico. Evaluar la apertura de otro centro de distribución dentro de la cadena de distribución de la empresa. Además, sería interesante introducir otras estrategias sofisticadas basadas en algunas ideas heurísticas para resolver el CVRP – HFTC.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Corporación Universitaria del Caribe – CECAR, por prestar las instalaciones y equipos para llevar a cabo esta investigación. Así mismo, a la empresa por brindar la información y acompañamiento necesario para la realización de este estudio.

REFERENCIAS

[1] W. A. Sarache Castro *et al.*, “La logística del transporte: un elemento estratégico en el desarrollo agroindustrial.” Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales, 2010.

[2] E. D. Castro and A. N. Garcia, “Naturaleza de la Distribucion.” Recuperado el, pp. 1–13, 2005.

[3] A. Lozada and R. Cadena, “SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS CON VENTANAS DE TIEMPO (VRPTW),” Universidad Industrial de Santander, 2012.

[4] J. R. Montoya-Torres, J. López Franco, S. Nieto Isaza, H. Felizzola Jiménez, and N. Herazo-Padilla, “A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 79, pp. 115–129, 2015.

[5] D. A. Álvarez Porras, “Diseño óptimo de rutas para una empresa que brinda servicios de paquetería, mensajería y logística.” Universidad Autónoma de Nuevo León, 2014.

[6] S. Bansal and V. Katiyar, “Integrating Fuzzy and Ant Colony System for Fuzzy Vehicle Routing Problem with Time Windows,” *arXiv Prepr. arXiv1411.3806*, 2014.

[7] H. J. Quesada-Pineda, U. Buehlmann, and E. Arias, “Pensamiento Lean: Ejemplos y Aplicaciones en la Industria de Productos de Madera,” 2013.

[8] A. Ezzatneshan, “Vehicle Routing Optimization Using Spanning Tree and Ant Colony,” vol. 2015, no. 6, pp. 107–115, 2015.

[9] R. Tavakkoli-Moghaddam, M. Gazanfari, M. Alinaghian, A. Salamatbakhsh, and N. Norouzi, “A new mathematical model for a competitive vehicle routing problem with time windows solved by simulated annealing,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 30, no. 2, pp. 83–92, 2011.

[10] J. R. Medina and V. Yepes, “Optimización de redes de distribución con algoritmos genéticos,” in *Actas del IV Congreso de Ingeniería del Transporte*, 2000, vol. 1, pp. 205–213.

[11] H. M. Mora, “GAMS, ejemplos introductorios,” 2009.

[12] F. A. Guasmayan Guasmayan, “Solución del problema de ruteo de vehículos dependientes del tiempo utilizando un algoritmo genético modificado.” Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira, 2014.

[13] S. Iqbal, M. Kaykobad, and M. S. Rahman, “Solving the multi-objective Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows with the help of bees,” *Swarm Evol. Comput.*, vol. 24, no. Supplement C, pp. 50–64, 2015.

[14] R. Baños, J. Ortega, C. Gil, A. Fernández, and F. de Toro, “A Simulated Annealing-based parallel multi-objective approach to vehicle routing problems with time windows,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 40, no. 5, pp. 1696–1707, 2013.

[15] S. Jawarneh and S. Abdullah, “Sequential insertion heuristic with adaptive bee colony optimisation algorithm for vehicle routing

problem with time windows,” *PLoS One*, vol. 10, no. 7, p. e0130224, 2015.

[16] F. A. Guasmayan-Guasmayan, “Solución del problema de ruteo de vehículos dependientes del tiempo utilizando un algoritmo genético modificado,” p. 187, 2014.

[17] J. de J. Cáceres Cruz, “Randomized Algorithms for Rich Vehicle Routing Problems: From a Specialized Approach to a Generic Methodology,” 2013.

[18] R. Baldacci, A. Mingozzi, and R. Roberti, “Recent exact algorithms for solving the vehicle routing problem under capacity and time window constraints,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 218, no. 1, pp. 1–6, 2012.

[19] A. V. Donati, R. Montemanni, N. Casagrande, A. E. Rizzoli, and L. M. Gambardella, “Time dependent vehicle routing problem with a multi ant colony system,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 185, no. 3, pp. 1174–1191, 2008.

[20] S.-T. Bae, H. S. Hwang, G.-S. Cho, and M.-J. Goan, “Integrated GA-VRP solver for multi-depot system,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 53, no. 2, pp. 233–240, 2007.

[21] D. Bakarcic and G. Di Piazza, “Ruteo de vehículos y asignación de conductores: un enfoque combinado.” Tesis de Licenciatura, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina, 2012.

[22] R. Linfati, J. W. Escobar, and G. Gatica, “Un algoritmo metaheurístico para el problema de localización y ruteo con flota heterogénea,” *Ing. y Cienc. - ing.cienc.*, vol. 10, no. 19, pp. 55–76, 2014.

[23] C. E. Maldonado and N. A. Gómez-Cruz, “Modelamiento y simulación de sistemas complejos,” *Borradores Investig. Ser. Doc. Adm. ISSN 0124-8219, No. 66 (Febrero 2010)*, 2010.

[24] E. A. Bermeo Muñoz and J. H. Calderón Sotero, “Diseño de un modelo de optimización de rutas de transporte,” *El hombre y la máquina*, no. 32, 2009.

[25] W. P. Coutinho, M. Battarra, and J. Fliege, “The unmanned aerial vehicle routing and trajectory optimisation problem, a taxonomic review,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 120, pp. 116–128, 2018.

[26] N. Herazo Padilla, “Modelación matemática del problema de ruteo de vehículos con restricciones de múltiples depósitos, flota heterogénea de vehículos y ventanas de tiempos.” 2013.

[27] Ministro De Hacienda Y Crédito Público, “9 de 2016 PUBLIQUESE Y CÚMPLASE,” 2016.