

# Ruteo de Vehículos desde un Centro de Distribución a una Línea de Supermercados en Barranquilla, Colombia

## Vehicle Routing from a Distribution Center to a Supermarket Line in Barranquilla, Colombia

*Ricardo Prato Torres\**

*Diego Fernando Suero Pérez\*\**

*Oswaldo José Guzmán Ávila\*\*\**

### RESUMEN

El ruteo de vehículos procura encontrar soluciones cercanas al óptimo (debido a su alta complejidad de acuerdo al número de nodos o clientes) para minimizar los costos de operación o maximizar el número de clientes atendidos. En el presente trabajo presentamos la aplicación del método de ruteo heurístico de Clarke Wright, para el mismo problema abordado en el documento "Localización de bodegas y asignación de clientes (FLP) en supermercados de Barranquilla". Las técnicas implementadas revelan como resultado un enrutamiento de menor costo a cada cliente.

**Palabras clave:** Ruteo, Centros de distribución, VRP, CVRP, Heurísticas, Logística.

### ABSTRACT

The vehicle routing tries to find solutions close to the optimum (due to its high complexity according to the number of nodes or clients) to minimize operating costs and maximize the number of clients served. In this work we present the application of the method of Clarke Wright routing heuristics for the same problem addressed in "Location of warehouses and customer allocation (FLP) in supermarkets in Barranquilla". The implemented techniques reveal results in a least cost routing to each customer.

**Key words:** Routing, Distribution centers, VRP, CVRP, Heuristics, Logistics.

\* Docente, Universidad del Norte. Departamento de Matemática y Estadística. [rprato@uninorte.edu.co](mailto:rprato@uninorte.edu.co)

\*\* Estudiante Doctorado Ingeniería Industrial, Universidad del Norte, Docente Investigador Universidad Libre Barranquilla, Colombia. [dsuero@uninorte.edu.co](mailto:dsuero@uninorte.edu.co)

\*\*\* Estudiante Doctorado Ingeniería Civil, Universidad del Norte. [oguzman@uninorte.edu.co](mailto:oguzman@uninorte.edu.co)

## 1. INTRODUCCIÓN

El principal objetivo en problemas de optimización es encontrar el valor óptimo de solución, sin embargo en aquellos problemas denominados NP *hard* o NP duros, la complejidad de los algoritmos puede ser exponencial debido a la elevada cantidad de posibles soluciones, las cuales deben ser evaluadas para encontrar un óptimo. De tal forma que el tiempo de procesamiento para un ordenador común o incluso muy avanzado, podría ser de años o siglos tratando de resolver un problema sencillo de ruteo. Las heurísticas han facilitado la búsqueda de valores cercanos al óptimo en tiempos razonables.

El problema que se presenta es de enrutamiento directo, donde existe un solo centro de distribución que atiende una demanda de 26 puntos de venta localizados dentro del casco urbano de la ciudad de Barranquilla, con una flota de camiones de capacidad conocida. El objetivo es minimizar los costos de transporte de un producto específico; así mismo, se utilizará el método de ruteo de Clarke Wright (o de ahorros) de vehículos para dar cumplimiento a la demanda diaria de cada uno de los puntos de venta de Supertiendas y Droguerías Olímpica S.A. al menor costo posible.

Al final se presenta el comparativo entre el método del barrido usado anteriormente y nuestra implementación.

## 2. PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN EN PLANTA Y RUTEO DE VEHÍCULOS CON CAPACIDAD [1]

Las metaheurísticas han sido métodos utilizados en la búsqueda de soluciones para determinar ruteos u otros tipos de problemas, y han tenido muy buenos resultados. Se definen como un método heurístico guiado paso a paso, donde a través de un proceso de búsqueda local, es susceptible de ser mejorado. Estos procesos de metaheurísticas están basados en simulaciones como la de colonia de hormigas y algoritmos de búsqueda tabú [2].

En general, las aplicaciones potenciales de este problema son para centros de servicio, centros de emergencia, policía, bomberos, centros de almacenes y en nuestro caso, para una empresa de alimentos cuyo producto principal es el aceite de cocina.

El reto que se ha abordado surge de la necesidad de transportar los insumos requeridos desde las bodegas a cada uno de los puntos de las Supertiendas Olímpica, generándose un problema de enrutamiento de vehículos, donde se deben asignar rutas e itinerarios a una flota de camiones. Se pueden dar dos tipos de problemas de enrutamiento, uno es en arcos y el otro, en nodos. En nuestra situación en particular, los vehículos no deben seguir un arco o cumplir con un recorrido, pero sí deben visitar cada uno de los nodos o puntos de venta, configurándose de este modo un problema de ruteo en nodos.

Existen varias técnicas de solución para problemas de enrutamiento en nodos, por ejemplo, la del Árbol

Mínimo de Envergadura Máxima (AMEN), donde en una red dirigida, cada arco tiene un costo asociado, se recorren todos los nodos de la red de tal manera que se minimice la sumatoria de sus costos. En el problema del agente viajero (PAV), empezando desde el origen, un agente vendedor debe visitar un conjunto de clientes exactamente una vez, regresando a su punto de partida, al costo mínimo; problemas básicos asociados usualmente al diseño de rutas de recolección [3].

En general, existen dos maneras de resolver los problemas de enrutamiento de vehículos: en la primera, se trata de construir directamente la ruta con el mínimo costo, a estos métodos se les denomina constructivos; la segunda, parte de una ruta inicial, sin importar que tan buena sea y se trata de mejorar; a estos métodos se les denomina de mejoramiento.

Dentro de los métodos constructivos se encuentran los basados en el AMRM, inserción, asignación y de ahorros. Los métodos de mejoramiento, por su parte, se pueden clasificar en: basados en intercambios, combinación de vecindades, procedimientos aleatorizados y metaheurísticas. Sin embargo existen más de 14 técnicas entre 1969 y 2011 para abordar el problema del CVRP [4]. A continuación mencionaremos algunas:

### **Método de asignar primero, rutear después**

El método (*cluster first, route second*) tiene dos fases: Primero se busca generar grupos de clientes, también llamados *clusters*, que estarían en una misma ruta en la solución final. Luego, para cada *cluster* se crea una ruta que visite a todos sus clientes. Las restricciones de capacidad se consideran en la primera etapa, asegurando que la demanda total de cada *cluster* no supere la capacidad del vehículo.

### **Heurística de inserción más próxima**

Este es un método voraz (*greedy*, en inglés), que gradualmente construye un *tour* por la repetida selección de los arcos más cortos y los adhiere a un *tour*, con tal de que no cree un ciclo con menos de los  $N$  bordes, o aumentos el grado de cualquier nodo a más de 2. No se debe agregar el mismo borde dos veces durante el *tour* [5].

### **Procedimientos aleatorizados**

GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) por sus iniciales en inglés, ha sido también ampliamente utilizado como método constructivo de soluciones PRV, sin olvidar sus desventajas sobre la variabilidad y la dificultad en los análisis de eficiencia; además en el caso de PRV, que es un problema derivado del PAV, se observa que desarrollar algoritmos GRASP es más complejo por las reglas adaptativas.

### Mejoramiento con intercambios k-opt

Los intercambios k-opt funcionan de la misma manera que en el problema del agente viajero (PAV), pero ahora se pueden realizar al interior de la ruta asignada a cada vehículo o entre rutas de distintos vehículos. El principio es el mismo: reemplazar  $k$  aristas actuales de la ruta por  $k$  nuevas aristas para encontrar otra ruta del problema de ruteo de vehículos PRV.

### La heurística de Clarke y Wright para VRP

Este es un ejemplo de un método constructivo, donde inicialmente cada cliente es visitado por un vehículo, por lo tanto existirán tantos vehículos como clientes. Luego, de acuerdo a la capacidad del vehículo, se determina si este puede visitar un segundo nodo cercano al primero, si esto es posible, entonces se constituye un ahorro de un viaje. Se continúa realizando el análisis hasta que la capacidad del vehículo esté copada y la totalidad de los arcos estén cubiertos.

Se han desarrollado nuevas y diversas formas para abordar la solución del “ruteo de vehículos con capacidad” CVRP, como son unos algoritmos genéticos híbridos [6]. Otra forma de resolver el problema es incluyendo variables como el consumo de combustible dentro del modelo [7] o algoritmos constructivos, que implementan algoritmos de búsqueda voraz aleatoria con un algoritmo de búsqueda tabú [8].

Dadas las características del problema que enfrentamos se optó por utilizar una de las técnicas tradicionales como lo es la de los ahorros para así compararla en las mismas condiciones con la Técnica del Barrido. En la heurística de barrido geográfico de Gillet y Miller, los clientes son agrupados y se resuelve un PAV en cada grupo. Si las distancias son razonablemente euclidianas, entonces se obtendrán resultados satisfactorios. Se ubican clientes en un mapa y se realiza un barrido geográfico con una línea recta, se estudia la factibilidad de incluir el cliente en la ruta, dependiendo de la capacidad del camión y de la disponibilidad de tiempo. El algoritmo finaliza cuando no hay más disponibilidad de vehículos o cuando todos los clientes están cubiertos.

Sin embargo no es suficiente con implementar los métodos de ruteo, según la metodología ISM, Análisis de los factores relevantes en la eficiencia de distribución de las cadenas de supermercados, son: las medidas de restricción del tráfico urbano, la estructura de las empresas de logística, el nivel de información y en menor medida, la infraestructura, el medioambiente, el número de vehículos de propiedad de las empresas de logística, el número de personal que participa en la gestión logística y el tiempo de realización de pedidos de los supermercados [9].

### 3. HIPÓTESIS PLANTEADAS

El cambio de método de ruteo desde un centro de distribución equidistante en la zona centro de la ciu-

dad mejorará los costos de operación de la distribución de un tipo de producto en los supermercados y tiendas Olímpica.

#### 4. METODOLOGÍA

El proyecto se desarrolla en cuatro fases a mencionar:

##### A. Nudo de inicio o centro de distribución

Se seleccionó una bodega como centro de distribución. La bodega seleccionada está ubicada en la calle 51 con carrera 52, a la cual se le asignarán todos los clientes. La capacidad de los vehículos es de 4,5 toneladas y una de las principales restricciones es que solo se debe enviar la demanda diaria de la demanda total, debido a los requisitos de cada tienda.

La suma del Costo Total de Transporte y el Costo Total de Instalación obtenido por la Técnica del barrido es \$ 2.038.260 por día.

##### B. Determinación de variables de interés y su respectiva cuantificación

###### **Factor de capacidad en toneladas**

Se seleccionó al azar un producto de una empresa de la ciudad de Barranquilla; Aceite Girasol Gourmet de 1000 cm<sup>3</sup> que se empaca en cajas por 12 unidades, cada caja pesa 11,04 Kg, con 55 cajas por estiba, por lo tanto tenemos 607,2 Kg/estiba. Con 8,44 m de fondo, con pasillos de 3 m y cuerpos de 2 m y 6 niveles de altura, se pueden almacenar 48 estibas en un Área de 13 x 8,44 m.

Por lo tanto, nuestra Área base es de 109,72 m<sup>2</sup> y nuestro peso base, con 48 estibas X 55 cajas X 11,04 Kg = 29145,6 Kg = 29,14 Ton. Para realizar la especificación de la capacidad de la bodega en toneladas se usó el factor de escala, el cual es el cociente entre Peso base y Área base.

$$\text{factor de escala} = \frac{\text{Peso base}}{\text{Área base}} = \frac{29,14 \text{ Ton}}{109,72 \text{ m}^2} = 0,26 \text{ Ton/m}^2$$

###### **Supuestos y variables relevantes:**

- Determinación de distancias entre bodegas y clientes:  
Por medio del aplicativo web Google maps, digitando la ubicación entre cada bodega y clientes, además de distancias entre los clientes.
- Costos fijos:  
El Costo por Kilómetro recorrido fue de \$6.600 según el encargado del enrutamiento de la empresa [10].

Los costos de arriendo, vigilancia y administración están incluidos en el precio del canon de arrendamiento.

### C. Formulación del modelo matemático

Para la solución del caso de estudio planteado es necesario resolver el problema de optimización combinatoria, el cual está descrito a continuación:

#### **Ruteo de vehículos con restricción de capacidad CVRP**

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{si el camión } k \text{ sirve el arco } (i,j) \\ 0 & \text{si no} \end{cases} \quad \forall (i,j) \in A$$

$$y_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{si un camión sirve el arco } (i,j) \\ 0 & \text{si no} \end{cases} \quad \forall (i,j) \in A$$

$$\text{Min} \sum_{l \leq k \leq K} \sum_{\forall (i,j) \in A} c_{ij} x_{ij}^k$$

Sujeto a:

$$\sum_{l \leq k \leq K} x_{ij}^k = y_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_{l \leq j \leq n} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in N - \{1\} \quad (2)$$

$$\sum_{l \leq i \leq n} y_{ij} = 1 \quad \forall j \in N - \{1\} \quad (3)$$

$$\sum_{l \leq j \leq n} y_{ij} = K \quad (4)$$

$$\sum_{l \leq i \leq n} y_{il} = K \quad (5)$$

$$\sum_{2 \leq i \leq n} \sum_{l \leq j \leq n} d_i x_{ij}^k \leq u \quad \forall k = 1, 2, \dots, K \quad (6)$$

$$\sum_{i \in Q} \sum_{j \in Q} y_{ij} \leq |Q| - 1 \quad \forall Q \subseteq \{2, 3, \dots, n\} \quad (7)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A \quad (8)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A, k = 1, 2, \dots, K \quad (9)$$

La anterior formulación matemática describe el problema de determinar el reparto de mínimo costo considerando una flota de  $k$  vehículos homogéneos con capacidad finita  $u$ . Se considera un depósito común (nodo 1) y se atienden un conjunto de clientes (nodos 2,3,...,n) cada uno con demanda  $d_j$ .

La función objetivo plantea la minimización del Costo Total de Transporte, obtenido a partir de las su-

matorias del costo de transporte de cada cliente  $c_{ij}$  visitado en la ruta multiplicado por la variable de decisión  $x_{ij}^k$ .

- (1) La primera restricción controla que cada cliente sea visitado por un solo camión.
- (2) La segunda restricción controla que a todos los clientes llegue solo un camión.
- (3) La tercera restricción refiere a que de cada cliente salga el camión que llegó. Estas últimas restricciones buscan mantener un equilibrio en el flujo.
- (4) La cuarta y quinta (5) restricción buscan garantizar que todos los camiones salgan y regresen al depósito.
- (6) La sexta restricción establece que la cantidad de producto entregado por cada camión  $k$  debe ser menor a su capacidad.
- (7) La séptima restricción garantiza que la solución sea un ciclo Hamiltoniano (la solución no tiene sub-ciclos), mientras que la octava (8) y novena (9) restricciones establecen el carácter binario de las variables de decisión [10].

#### D. Solución del modelo

Para la solución del Problema de Ruteo de Vehículos con restricción de capacidad se usó la heurística de ruteo de Clarke Wright, a continuación se describe el procedimiento:

1. Inicialmente cada cliente es visitado por un vehículo, por tanto habrá tantos vehículos como clientes; el costo de esta ruta es igual a  $2\sum C_{ij}$
2. Se calculan los ahorros  $\Delta(i,j) = c_{1i} + c_{j1} - c_{ij}$ ,  $\forall(i,j) \in A$ , y se ordena
3. Se encuentra el primer arco factible  $(i, j)$  en la lista de ahorros donde:
  - $i$  y  $j$  se encuentran en rutas diferentes
  - ambos clientes son, o bien el primero, o bien el último visitado en su respectiva ruta, y
  - la suma de las demandas de los clientes  $i$  y  $j$  no excede la capacidad de carga de los vehículos
4. Se añade el arco  $(i, j)$  a la ruta actual y se eliminan los arcos  $(1, i)$  y  $(j, 1)$
5. Se repite el Paso 4 hasta agotar todos los arcos.

## 5. RESULTADOS

### Ruteo desde la bodega

Se aplicó la heurística de ruteo de Clarke Wright donde se obtuvo la matriz de demanda y tiempo de viajes entre cada cliente.

**Tabla 1. Matriz de demanda y tiempo de viajes**

| i/j |      | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17  | 18  | 19   | 20   | 21   | 22   | 23  | 24  | 25   | 26  |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|------|-----|
| 1   | 2,4  | #    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |     |      |     |
| 2   | 2,3  | 0,04 | #    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |     |      |     |
| 3   | 4,3  | 4,5  | 4,2  | #    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |     |      |     |
| 4   | 3    | 5,2  | 5    | 3,4  | #    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |     |      |     |
| 5   | 6,6  | 7,3  | 7    | 4    | 3,6  | #    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |     |      |     |
| 6   | 5,4  | 7,6  | 7,5  | 10   | 5,4  | 6    | #    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |     |      |     |
| 7   | 2,8  | 3,9  | 4,4  | 7    | 3,9  | 13,4 | 4,4  | #    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |     |      |     |
| 8   | 2,2  | 4,2  | 3,8  | 6,5  | 3,3  | 9,6  | 3,7  | 1,2  | #    |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |     |      |     |
| 9   | 3,5  | 6,2  | 9,6  | 7,8  | 5,3  | 12,8 | 4,2  | 1,2  | 1,6  | #    |      |      |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |     |      |     |
| 10  | 3,8  | 5,2  | 5,6  | 8,2  | 5,3  | 12,4 | 4,1  | 1,5  | 1,7  | 1,2  | #    |      |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |     |      |     |
| 11  | 2,2  | 4,3  | 4,5  | 4,6  | 1,5  | 5,4  | 4,2  | 3,3  | 2,2  | 3,5  | 3,6  | #    |      |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |     |      |     |
| 12  | 5,8  | 6,7  | 6,7  | 10,8 | 7,3  | 13,4 | 8,3  | 3,2  | 3,7  | 2,7  | 2    | 5,4  | #    |      |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |     |      |     |
| 13  | 5,8  | 6,8  | 6,4  | 2    | 4,7  | 3,9  | 13,9 | 9,2  | 8,8  | 9,3  | #    | 7,4  | 11,9 | #    |      |      |      |     |     |      |      |      |      |     |     |      |     |
| 14  | 6,3  | 7,5  | 7,1  | 5,7  | 12,4 | 13,2 | 11,6 | 24   | 19,8 | 23,8 | #    | 10,5 | 19,7 | 7,7  | #    |      |      |     |     |      |      |      |      |     |     |      |     |
| 15  | 5,3  | 4,4  | 4    | 1,9  | 4,6  | 11,7 | 14,8 | 8,6  | 8,2  | 8,7  | #    | 6,8  | 10,8 | 1,9  | 6,2  | #    |      |     |     |      |      |      |      |     |     |      |     |
| 16  | 10,8 | 15,4 | 15,4 | 17,3 | 12,8 | 13,4 | 8,3  | 8,5  | 8,7  | 7,5  | #    | 12   | 8,2  | 22,2 | 19,5 | 22,2 | #    |     |     |      |      |      |      |     |     |      |     |
| 17  | 1,3  | 3,1  | 2,7  | 5,1  | 2,2  | 5,6  | 4,4  | 2,7  | 1,7  | 3,6  | #    | 1,1  | 5,2  | 6,8  | 9,8  | 6,7  | 11   | #   |     |      |      |      |      |     |     |      |     |
| 18  | 0,5  | 1,9  | 1,5  | 4,1  | 2,9  | 6,5  | 5,7  | 3,8  | 2,8  | 4,7  | #    | 2,4  | 6,7  | 5,8  |      | 5,7  | 10,2 | #   | #   |      |      |      |      |     |     |      |     |
| 19  | 4,6  | 6,8  | 6,8  | 9,6  | 5,7  | 13,5 | 7,8  | 2,1  | 2,6  | 1,3  | #    | 4,5  | 1,4  | 11,7 |      | 11,4 | #    | #   | #   | #    |      |      |      |     |     |      |     |
| 20  | 6,6  | 8,5  | 8,5  | 15,4 | 10,8 | 11,5 | 6,3  | 4,2  | 4,5  | 2,4  | #    | 6,2  | 2,5  | 20,3 | 17,5 | 20,2 | #    | #   | #   | #    | #    |      |      |     |     |      |     |
| 21  | 6,1  | 5,2  | 7,5  | 3,9  | 6,6  | 10,4 | 13,4 | 21,1 | 10,1 | 20,1 | #    | 8,7  | 21,5 | 3,4  | 4,8  | 2,5  | 21   | 8,1 | 6,7 | 20,4 | 19,3 | #    |      |     |     |      |     |
| 22  | 5    | 6,5  | 6,6  | 9,3  | 6,7  | 10,5 | 5,5  | 2,8  | 2,8  | 1,8  | #    | 4,6  | 3,2  | 19,4 | 21,2 | 19,3 | 6,6  | 4,2 | 5,7 | 2,1  | 1,6  | 18,1 | #    |     |     |      |     |
| 23  | 0,9  | 1,9  | 2,3  | 4,9  | 3,7  | 7,4  | 6,2  | 2,7  | 2,9  | 4,2  | #    | 2,6  | 6,5  | 6,7  | 14,2 | 6,9  | 10,9 | 1,5 | 1,4 | 4,7  | 6,2  | 7,1  | 5,2  | #   |     |      |     |
| 24  | 3    | 2,1  | 1,6  | 2,5  | 3,2  | 5,5  | 7,9  | 7    | 5,9  | 7,3  | 7,1  | 4,5  | 8,5  | 3,2  | 12,6 | 2,9  | 24,3 | 3,9 | 2,5 | 8,5  | 10,7 | 4,5  | 8,1  | 4,7 | #   |      |     |
| 25  | 4,5  | 6,3  | 5,1  | 2,2  | 2,1  | 1,8  | 8,4  | 6,4  | 5,3  | 15,1 | 14,7 | 3,5  | 16,4 | 3,9  | 11,4 | 4    | 16   | 4   | 4,3 | 15,4 | 14,3 | 11,8 | 13,7 | 6   | 3,9 | #    |     |
| 26  | 5,5  | 7    | 7,1  | 9,8  | 7    | 10,3 | 5,2  | 3,8  | 3,3  | 2,9  | 2,4  | 5,1  | 4,2  | 19,1 | 21   | 19,1 | 6,4  | 4,8 | 6,2 | 3,1  | 2,2  | 17,9 | 1,2  | 5,7 | 8,5 | 12,1 | #   |
| di  |      | 1    | 1,8  | 2    | 1,5  | 1,3  | 0,8  | 3,2  | 3,7  | 3,2  | 2,7  | 2,4  | 2,2  | 1,6  | 1,3  | 1,7  | 1,3  | 2,1 | 1,9 | 3,1  | 3,8  | 2,6  | 5,8  | 6,9 | 3,4 | 3,2  | 2,3 |

A partir de esta matriz se calculó la matriz de ahorro:

**Tabla 2. Matriz de ahorro**

| i/j | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14   | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24 | 25  | 26 |  |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|----|--|
| 1   | #   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |    |  |
| 2   | 4,7 | #   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |    |  |
| 3   | 2,2 | 2,4 | #   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |    |  |
| 4   | 0,2 | 0,3 | 3,9 | #   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |    |  |
| 5   | 1,7 | 1,9 | 6,9 | 6   | #   |     |     |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |    |  |
| 6   | 0,2 | 0,2 |     | 3   | 6   | #   |     |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |    |  |
| 7   | 1,3 | 0,7 | 0,1 | 1,9 |     | 3,8 | #   |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |    |  |
| 8   | 0,4 | 0,7 |     | 1,9 |     | 3,9 | 3,8 | #   |     |     |     |     |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |    |  |
| 9   |     |     |     | 1,2 |     | 4,7 | 5,1 | 4,1 | #   |     |     |     |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |    |  |
| 10  | 1,0 | 0,5 |     | 1,5 |     | 5,1 | 5,1 | 4,3 | 6,1 | #   |     |     |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |    |  |
| 11  | 0,3 |     | 1,9 | 3,7 | 3,4 | 3,4 | 1,7 | 2,2 | 2,2 | 2,4 | #   |     |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |    |  |
| 12  | 1,5 | 1,4 |     | 1,5 |     | 2,9 | 5,4 | 4,3 | 6,6 | 7,6 | 2,6 | #   |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |    |  |
| 13  | 1,4 | 1,7 | 8,1 | 4,1 | 8,5 |     |     |     |     |     | 0,6 |     | #   |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |    |  |
| 14  | 1,2 | 1,5 | 4,9 |     | 0,1 |     |     |     |     |     |     |     | 4,4 | #    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |    |  |
| 15  | 3,3 | 3,6 | 7,7 | 3,7 | 0,2 |     |     |     | 0,1 |     | 0,7 | 0,3 | 9,2 | 5,4  | #   |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |    |  |
| 16  |     |     |     | 1   | 4   | 7,9 | 5,1 | 4,3 | 6,8 |     | 1   | 8,4 |     |      | #   |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |    |  |
| 17  | 0,6 | 0,9 | 0,5 | 2,1 | 2,3 | 2,3 | 1,4 | 1,8 | 1,2 |     | 2,4 | 1,9 | 0,3 |      |     | 1,1 | #   |     |     |     |     |     |     |    |     |    |  |
| 18  | 1,0 | 1,3 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,2 |     |     |     |     | 0,3 |     | 0,5 | 6,8  |     | 1,1 |     | #   |     |     |     |     |     |    |     |    |  |
| 19  | 0,2 | 0,1 |     | 1,9 |     | 2,2 | 5,3 | 4,2 | 6,8 |     | 2,3 | 9   |     | 10,9 |     |     |     |     | #   |     |     |     |     |    |     |    |  |
| 20  | 0,5 | 0,4 |     |     | 1,7 | 5,7 | 5,2 | 4,3 | 7,7 |     | 2,6 | 9,9 |     |      |     |     |     |     |     | #   |     |     |     |    |     |    |  |
| 21  | 3,3 | 0,9 | 6,5 | 2,5 | 2,3 |     |     |     |     |     |     |     | 8,5 | 7,6  | 8,9 |     |     |     |     |     | #   |     |     |    |     |    |  |
| 22  | 0,9 | 0,7 |     | 1,3 | 1,1 | 4,9 | 5   | 4,4 | 6,7 |     | 2,6 | 7,6 |     |      |     | 9,2 | 2,1 |     | 7,5 | 10  | #   |     |     |    |     |    |  |
| 23  | 1,4 | 0,9 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 1   | 0,2 | 0,2 |     | 0,5 | 0,2 |     |      |     | 0,8 | 0,7 |     | 0,8 | 1,3 |     | 0,7 | #   |    |     |    |  |
| 24  | 3,3 | 3,7 | 4,8 | 2,8 | 4,1 | 0,5 |     |     |     |     | 0,7 | 0,3 | 5,6 |      | 5,4 |     | 0,4 | 1   |     |     | 4,6 |     |     | #  |     |    |  |
| 25  | 0,6 | 1,7 | 6,6 | 5,4 | 9,3 | 1,5 | 0,9 | 1,4 |     |     | 3,2 |     | 6,4 |      | 5,8 |     | 1,8 | 0,7 |     |     |     |     |     |    | 3,6 | #  |  |
| 26  | 0,9 | 0,7 |     | 1,5 | 1,8 | 5,7 | 4,5 | 4,4 | 6,1 | 6,9 | 2,6 | 7,1 |     |      |     | 9,9 | 2   |     | 7   | 9,9 |     | 9,3 | 0,7 |    |     | #  |  |

Se procedió a revisar las demandas utilizando las rutas de mayores ahorros y se evalúa la factibilidad de usar o no esta ruta, como por ejemplo:



Para un ahorro de 10,9 Km entre los nodos 14 y 19 necesitaríamos una demanda de 5 Ton, o sea que esta ruta no es factible, y así procedemos con el siguiente valor hasta ir obteniendo rutas factibles a usar.

|      |    |     |     |    |     |    |     |     |    |     |    |     |     |    |     |    |     |     |    |
|------|----|-----|-----|----|-----|----|-----|-----|----|-----|----|-----|-----|----|-----|----|-----|-----|----|
| 10,9 | 14 | 1,9 | 5   | NO | 9,9 | 16 | 1,3 | 3,6 | SI | 9   | 12 | 2,2 | 5,3 | NO | 7,6 | 10 | 2,7 | 4,9 | NO |
|      | 19 | 3,1 |     |    |     | 26 | 2,3 |     |    |     | 19 | 3,1 |     |    |     | 12 | 2,2 |     |    |
| 10   | 20 | 3,8 | 5,1 | NO | 7,9 | 16 | 3,6 | 4,4 | SI | 7,6 | 21 | 2,6 | 3,9 | SI | 7,6 | 12 | 2,2 | 3,5 | SI |
|      | 22 | 1,3 |     |    |     | 6  | 0,8 |     |    |     | 14 | 1,3 |     |    |     | 22 | 1,3 |     |    |
| 9,9  | 20 | 3,8 | 6,1 | NO | 9,2 | 15 | 1,6 | 3,3 | SI | 9,3 | 5  | 1,3 | 4,5 | SI | 6,8 | 9  | 3,2 | 6,3 | NO |
|      | 26 | 2,3 |     |    |     | 13 | 1,7 |     |    |     | 25 | 3,2 |     |    |     | 19 | 3,1 |     |    |
| 9,9  | 20 | 3,8 | 6   | NO | 4,7 | 1  | 1   | 2,8 | SI | 7,7 | 20 | 3,8 | 7   | NO | 6,1 | 9  | 3,2 | 5,9 | NO |
|      | 12 | 2,2 |     |    |     | 2  | 1,8 |     |    |     | 9  | 3,2 |     |    |     | 10 | 2,7 |     |    |

Después de revisar todas las rutas posibles realizamos el diagrama de rutas en el cual podemos ver la distancia recorrida en cada una.

|                 |   |      |     |      |   |     |   |      |     |   |     |     |     |   |     |     |   |     |   |     |    |     |     |    |     |     |    |   |
|-----------------|---|------|-----|------|---|-----|---|------|-----|---|-----|-----|-----|---|-----|-----|---|-----|---|-----|----|-----|-----|----|-----|-----|----|---|
| RECORRIDOS (Km) |   |      |     | 10,7 |   |     |   | 36,4 |     |   | 4,4 |     | 7,6 |   |     | 14  |   |     |   |     |    |     |     |    |     |     |    |   |
| RUTAS           | B | 1    | 2   | B    | 3 | 4   | B | 5    | 25  | B | 6   | 16  | 26  | B | 7   | B   | 8 | B   | 9 | B   | 10 | B   | 11  | 17 | B   | 12  | 22 | B |
| DEMANDA (ton)   |   | 1    | 1,8 |      | 2 | 1,5 |   | 1,3  | 3,2 |   | 0,8 | 1,3 | 2,3 |   | 3,2 | 3,7 |   | 3,2 |   | 2,7 |    | 2,4 | 2,1 |    | 2,2 | 1,3 |    |   |
| RECORRIDOS (Km) |   | 4,74 |     |      |   |     |   | 12,9 |     |   |     |     | 5,6 |   | 7   |     |   |     |   |     |    | 4,6 |     |    |     |     |    |   |

|                 |   |     |     |      |     |     |   |     |   |     |      |    |     |     |   |     |   |    |   |     |   |
|-----------------|---|-----|-----|------|-----|-----|---|-----|---|-----|------|----|-----|-----|---|-----|---|----|---|-----|---|
| RECORRIDOS (Km) |   |     |     | 17,2 |     |     |   | 9,2 |   |     | 10   |    | 1,8 |     |   |     |   |    |   |     |   |
| RUTAS           | B | 13  | 15  | B    | 14  | 21  | B | 18  | B | 19  | B    | 20 | B   | 22  | B | 23  | B | 23 | B | 24  | B |
| DEMANDA (ton)   |   | 1,6 | 1,7 |      | 1,3 | 2,6 |   | 1,9 |   | 3,1 | 3,8  |    | 4,5 | 4,5 |   | 2,4 |   |    |   | 3,4 |   |
| RECORRIDOS (Km) |   | 13  |     |      |     |     |   | 1   |   |     | 13,2 |    | 1,8 |     |   | 6   |   |    |   |     |   |

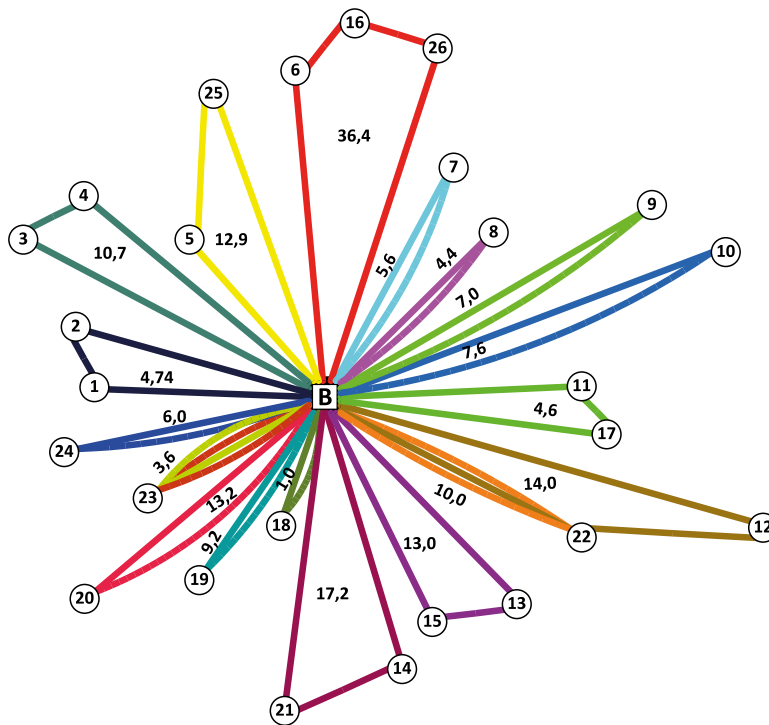


Figura 1. Diagrama de rutas y distancias recorridas

La longitud total recorrida en el proceso es de 181,14 Km, y la suma del costo total de transporte y el costo total de instalación obtenido por este método es \$ 1.195.524 por día.

## 6. CONCLUSIONES

Se determinó que el método de ruteo de Clarke Wright fue más eficiente, debido a que redujo los costos de transporte en un 41 %. Este tipo de economía es muy significativa ya que este sería el ahorro diario.

La comparación en términos de costos para estos dos métodos nos permite concluir que en las mismas condiciones de operación el método de ruteo Clarke Wright es más eficiente que el de Barrido debido a que no deja al azar aspectos de selección o cercanía a la bodega, además plantea un uso mínimo de las matemáticas, lo cual implica mayor confiabilidad a la hora de hacer estimaciones.

En el caso que hubiesen dos o más centros de distribución, el problema sería más complejo, es decir a medida que aumenten los nodos o clientes y los centros de distribución, la solución podría ir perdiendo optimalidad.

Es fundamental mencionar que la baja capacidad del camión (4,5 Ton) y el bajo porcentaje diario a transportarse (solo la demanda diaria) aumentan la distancia de las rutas, y por consiguiente el costo de transporte al incrementar innecesariamente el número de veces que este debe regresar al depósito. Por lo anterior, es recomendable estudiar el uso de camiones de mayor capacidad con miras a lograr la disminución de los costos de transporte.

Por último, en los modelos seleccionados para la solución del caso planteado, no se consideran aspectos como los impactos ambientales, sociales, el uso de infraestructura, la congestión, etc., lo que limita la aplicabilidad de los resultados. Por ello es conveniente el uso de modelos de optimización multiobjetivos o multicriterios que permitan encontrar soluciones más robustas a este tipo de problemas logísticos. Esto se convierte en un importante tópico de investigación que podría ser desarrollado en futuros trabajos.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Suero, H. Hernández y H. Mercado, "Localización de bodegas y asignación de clientes (FLP) en supermercados de Barranquilla", *Revista Epsilon*, vol. 24, pp.71-87, 2015 (En prensa).
- [2] A. G. Alvarenga, "Metaheuristic methods for a class of the facility layout problem", *Journal of intelligent manufacturing*, vol. 421, 2000.
- [3] E. Salazar y N. Ruiz, "ACO model applied to the waste collection by containers", *Ingeniere: Revista Chilena*, vol. 1, pp. 236-243, 2009.
- [4] J.P. Cardozo, *Solución al problema de ruteo de vehículos con capacidad limitada "CVRP" a*

*través de la heurística de barrido y la implementación del algoritmo genético de Chu-Beasley*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2013.

- [5] J.M. Daza, J. Montoya y F. Narducci, "Resolución del problema de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad utilizando un procedimiento metaheurístico de dos fases", *Revista EIA*, vol. 1, pp. 23-28, 2009.
- [6] C.H. Wang, & J.Z. Lu, "A hybrid genetic algorithm that optimizes capacitated vehicle routing problems", *Experts systems with applications*, vol. 36, n°. 2, pp. 2921-2936, 2009.
- [7] Y. Xiao, Xu Yuchun, B. QihongZhao, & C. IkouKaku, "Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem", *Computers & Operations Research*, vol. 39, pp. 1419-1431, 2012.
- [8] P. Augerat, J. Belenguer, E. Benavent, A. Corberin y D. Naddef, "Separating capacity constraints in the CVRP using tabu search", *European Journal of Operational Research*, vol. 106, pp. 546-557, 1998.
- [9] Z. Xu Feng, & W. Qiao Yun, "Analysis on Distribution Efficiency influencing Factors of Supermarket Bases on Interpretive Structural Model", *IEEE*, vol. 3, pp. 1476-1480, 2010.
- [10] V. Cantillo, Modelos logísticos. Transporte multimodal. Barranquilla, Colombia, 2013.

#### **BIBLIOGRAFÍA DE CONSULTA**

- M. Amiri-Arefa y A. Baboli, The center location-dependent relocation problem, *Applied Soft Computing*, pp. 3380-3391, 2013.
- G. Colson & F. Dorigo, A public warehouses selection support system, *European Journal of Operational Research*, vol. 153, n°. 2, pp. 332-349, 2004.
- T. Cura, A parallel local search approach to solving the uncapacitated warehouse location problem, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 59, n°. 4, pp. 1000-1009, 2010.
- T. Demirel, N. Cetin & C. Kahraman, "Multi-criteria warehouse location selection using Choquet Integral", *Expert systems with application*, vol. 37, n°. 5, p. 3943, 2010.
- L. Michael, & P. Van Hentenryck, "A simple tabu search for warehouse location", *European Journal of Operational Research*, vol. 157, n°. 3, pp. 576-591, 2004.
- R. Sharma & V. Berry, Developing new formulations and relaxation of single stage capacitated warehouse location problem", *European Journal of Operational Research*, vol. 177, n°. 2, pp. 24-34, 2007.
- M. Vlachopoulou, G. Silleos & V. Manthou, "Geographic information systems in warehouse site selection decisions", *International journal of production economics*, vol. 71, n°. 1, pp. 205-212, 2001.