

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**



**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS**

**PROYECTO DE TITULACIÓN**

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

**“MAGÍSTER EN LOGÍSTICA Y TRANSPORTE, MENCIÓN  
MODELOS DE OPIMIZACIÓN”**

**TEMA:**

**Diseño de ruteo vehicular con ventanas de tiempo aplicando el  
algoritmo Clarke & Wright para una empresa que comercializa  
insumos y dispositivos médicos**

**AUTOR:**

**ING. RONALD ABELINO GUTIÉRREZ MITE**

Guayaquil - Ecuador

2018

## **DEDICATORIA**

A mi esposa e hijos y a mi madre que son pilares fundamentales en mi vida y me apoyaron en todo momento.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a todos aquellos que de alguna u otra forma aportaron al desarrollo y término de este trabajo, a mi esposa por su apoyo incondicional, a mi madre por todo el apoyo brindado, a mi familia que siempre tuvieron una palabra de aliento, a mis compañeros de grupo y a mi Tutor el Dr. Barcia por su tiempo y dedicación.

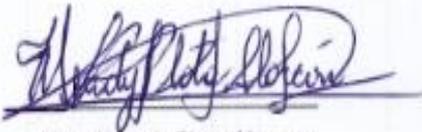
## DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad por los hechos y doctrinas expuestas en este Proyecto de Graduación, me corresponde exclusivamente; el patrimonio intelectual del mismo, corresponde exclusivamente a la **Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas**, de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.



Ronald Gutiérrez

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



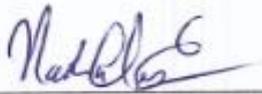
Mgr. Wendy Plata Alarcon

Presidente



Kleber Barcia Villacreses, Ph.D.

Director



Mgr. Nadia Cárdenas Escobar

Vocal del Tribunal



Mgr. Brenda Cobeña Terán  
Evaluador Principal

**AUTOR DEL PROYECTO**



Ronald Gutiérrez

## Contenido

|   |    |
|---|----|
| CAPÍTULO 1.....   | 1  |
| 1. INTRODUCCIÓN .....   | 1  |
| 1.1. OBJETIVO.....  | 2  |
| 1.1.1. Objetivo general.....  | 2  |
| 1.1.2. Objetivos específicos .....  | 2  |
| 1.2. SITUACIÓN ACTUAL DE LA EMPRESA.....                                      | 3  |
| 1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA A RESOLVER.....                                  | 4  |
| 1.4. JUSTIFICACIÓN .....  | 4  |
| 1.5. METODOLOGÍA .....  | 6  |
| 1.6. ESTRUCTURA DEL PROYECTO.....   | 7  |
| CAPÍTULO 2.....   | 9  |
| 2. MARCO TEÓRICO .....  | 9  |
| 2.1. INVESTIGACIONES RELACIONADAS .....                                       | 9  |
| 2.2. MARCO CONCEPTUAL.....  | 10 |
| 2.2.1. El problema del agente viajero (TSP).....                              | 10 |
| 2.2.2. Concepto de VRP.....   | 11 |
| 2.2.3. Problema de ruteo de vehículos capacitado (CVRP).....                  | 12 |
| 2.2.4. Problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW).....     | 12 |
| 2.2.5. Problema de ruteo de vehículos con múltiple deposito (VRP- MDVRP)..... | 17 |
| 2.3. MÉTRICA DE MANHATTAN.....  | 17 |
| 2.4. MÉTRICA EUCLIDIANA .....   | 18 |
| 2.5. MÉTODOS DE SOLUCIÓN.....   | 18 |
| 2.5.1. Métodos exactos .....  | 18 |
| 2.5.2. Métodos aproximados.....   | 19 |
| 2.5.2.1. Algoritmo Clarke and Wright .....                                    | 19 |
| 2.5.2.2. Algoritmo de Barrio .....  | 21 |
| CAPÍTULO 3.....   | 23 |
| 3. DESARROLLO DEL PROCESO .....   | 23 |
| 3.1. GENERALIDADES DE LA EMPRESA .....  | 23 |
| 3.1.1. Su flota vehicular .....   | 24 |
| 3.1.2. Sus clientes .....   | 24 |
| 3.2. SU PROCESO DE DISTRIBUCIÓN .....   | 25 |
| 3.3. PROBLEMÁTICA.....  | 27 |
| 3.4. RECOLECCION DE LA INFORMACIÓN .....                                      | 28 |

|  |  |    |
|--|--|----|
| 3.4.1.   | Costos del modelo.....                   | 31 |
| 3.4.1.1.   | Costos fijos del modelo.....             | 32 |
| 3.4.1.2.   | Costos variables del modelo.....         | 33 |
| 3.4.1.3.   | Resultado de los Costos .....            | 34 |
| CAPÍTULO 4.....  |  | 35 |
| 4.   | RESULTADOS .....                         | 35 |
| 4.1.   | IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO .....          | 35 |
| 4.1.1.   | Datos del modelo .....                   | 35 |
| 4.1.2.   | Variables del Modelo.....                | 35 |
| 4.1.3.   | Supuestos del modelo .....               | 36 |
| 4.1.4.   | Planteamiento del modelo.....            | 36 |
| 4.1.5.   | Función Objetivo .....                   | 37 |
| 4.1.6.   | Análisis de resultados .....             | 40 |
| 4.2.   | COMPARACIÓN CON LA SITUACION ACTUAL..... | 47 |
| CAPÍTULO 5.....  |  | 50 |
| 5.   | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....     | 50 |
| 5.1.   | CONCLUSIONES. ....                       | 50 |
| 5.2.   | RECOMENDACIONES.....                     | 51 |
| <b>Bibliografía</b> .....  |  | 52 |
| Anexo 1 Matriz de Distancia .....  |  | 53 |
| Anexo 2 Matriz de Ahorro.....  |  | 54 |
| Anexo 3 Órdenes de venta puestas durante una semana .....                  |  | 55 |
| Anexo 4 Código del modelo en Wolfram Mathematica .....                     |  | 56 |
| Anexo 5 Comparación de Proceso Actual vs el Diseño de Rutas vehicular..... |  | 63 |

# ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 2 1 HEURÍSTICA DEL ALGORITMO DE AHORRO CLARKE AND WRIGHT..... | 20 |
| FIGURA 3 1 FLUJO DEL PROCESO DE DISTRIBUCIÓN.....                    | 26 |
| FIGURA 3 2 REGISTRO DE HOJA DE RUTA.....                             | 27 |
| FIGURA 4 1 RESULTADOS DE CLARKE AND WRIGHT DÍA LUNES .....           | 41 |
| FIGURA 4 2 RESULTADOS DE CLARKE AND WRIGHT DÍA MARTES.....           | 42 |
| FIGURA 4 3 RESULTADOS DE CLARKE AND WRIGHT DÍA MIÉRCOLES .....       | 43 |
| FIGURA 4 4 RESULTADOS DE CLARKE AND WRIGHT DÍA JUEVES .....          | 44 |
| FIGURA 4 5 RESULTADOS DE CLARKE AND WRIGHT DÍA VIERNES .....         | 45 |
| FIGURA 4 6 COMPARATIVO DE COSTOS Y DISTANCIA RECORRIDA.....          | 48 |
| FIGURA 4 7 COMPARATIVO DE UTILIZACIÓN EN PESO Y VOLUMEN .....        | 49 |

# ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| TABLA 1 BASE DE DATOS DE CLIENTES CON HORARIOS DE ATENCIÓN..... | 29 |
| TABLA 2 BASE DE DATOS DE CLIENTES Y SUS COORDENADAS.....        | 30 |
| TABLA 3 BASE DE DATOS DE MERCADERÍA.....                        | 31 |
| TABLA 4 COSTOS FIJOS DEL MODELO.....                            | 32 |
| TABLA 5 COSTOS VARIABLES DEL MODELO.....                        | 33 |
| TABLA 6 RUTAS GENERADAS POR EL MODELO.....                      | 46 |
| TABLA 7 COMPARACIÓN DE COSTOS Y UTILIZACIÓN DE VEHÍCULOS. ....  | 47 |

## **ABREVIATURAS O SIGLAS**

**VRP:** Problema que aborda el ruteo de vehículo.

**CVRP:** Problema de ruteo de vehículo capacitado

**VRPTW:** Problema de ruteo de vehículos considerando ventanas de tiempo.

**VRP- MDVRP:** Problema de ruteo de vehículo con múltiples depósitos

**CW:** Clarke and Wright

**TSP:** Problema del agente viajero.

**GPS:** Sistema de posicionamiento global

# PRESENTACIÓN

El transporte sin duda alguna se ha vuelto un tema central para la mayoría de las empresas ya que más de la mitad de los costos logísticos le corresponden al transporte en el proceso de distribución de productos a los diferentes clientes, es por ese motivo que se han venido realizando investigaciones en el transcurso de los años con el fin de resolver el problema de ruteo de vehículos y así minimizar los costos, optimizar las rutas y el tiempo de entrega, mejorando el nivel de servicio a los clientes.

El presente proyecto tiene como objetivo determinar las mejores rutas desde la bodega principal hacia los diferentes clientes quienes tienen diferentes horarios de atención, por lo que se determinó que la solución que mejor se adapta al problema es el modelo VRP con ventanas de tiempo aplicando el algoritmo de Clarke & Wright para minimizar los costos, las distancias, mejorar la calidad del servicio y ser más competitivos.

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

La transportación generalmente representa el elemento individual más importante en los costos de logística. Se ha observado que el movimiento de carga absorbe entre uno y dos tercios de los costos totales de la logística (Ballou, 2004).

Los costos de transporte se han convertido en uno de los problemas más importantes a resolver, es por ello que la investigación de operaciones desarrolla modelos matemáticos para la reducción de los mismos, el problema de distribución de productos con su componente más importante el llamado Problema de Ruteo de Vehículos (VRP), es utilizado debido a que es una heurística que carece de modelo único ya que es capaz de adaptarse a las condiciones que influyen en el área a modelizar.

El problema de ruteo de vehículos se basa en determinar las mejores rutas para la entrega de productos a los clientes que se encuentran distribuidos geográficamente (Bodin, Golden, & Ball, 1983).

Es imperante tener la más adecuada planeación y programación de las entregas a los clientes, un sistema de distribución deficiente puede afectar los tiempos de entrega y el nivel de servicio elevando el costo de transporte y afectando la competitividad de la empresa. Por lo tanto es necesario tener una herramienta que permita determinar el ruteo óptimo tanto en tiempos como en términos económicos ya que puede constituir una fuente de ahorro, así como mejorar la calidad del servicio para los clientes.

Es por ello que el tema principal del presente proyecto es diseñar un ruteo de vehículos con ventanas de tiempo aplicando el algoritmo de Clarke & Wright (CW), que permita satisfacer la demanda de los clientes desde su bodega principal.

## **1.1. OBJETIVO**

### **1.1.1. Objetivo general**

El objetivo de este proyecto de titulación es diseñar un modelo de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo para la entrega de productos aplicando el algoritmo Clarke and Wright, cuya función objetivo es minimizar los costos totales de transporte y los tiempos incurridos en el proceso de distribución para una empresa importadora y comercializadora de insumos y dispositivos médicos.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Definir el problema y el plan de mejora complementaria basada en las técnicas matemáticas obteniendo una solución ó las soluciones óptimas para solucionar el problema de ruteo de vehículo.
- Construir el modelo que se ajusta al problema diario de ruteo de vehículos, que minimice los costos que afectan directamente al transporte y que genere resultados que constituyan una mejora con respecto a la forma que actualmente se está haciendo.
- Formular e implementar el modelo de solución considerando el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo según las características propias del proceso y que maximice los niveles de servicio y satisfacción de los clientes.
- Desarrollar métodos que disminuya el tiempo de entrega y kilometraje recorrido por los vehículos.

## **1.2. SITUACIÓN ACTUAL DE LA EMPRESA**

La empresa del presente estudio es una empresa importadora y comercializadora de insumos y equipos médicos que contribuye al mejoramiento de la atención de la salud en el país, ubicada en la ciudad de Guayaquil donde se encuentra su centro de distribución para atender a sus clientes a nivel nacional. La misma actualmente no cuenta con una herramienta que le permita planificar sus rutas de despacho de manera eficiente. La construcción de rutas la realiza de manera empírica considerando las distancias y las variables de tiempo de un cliente a otro, considerando que la mayoría de los clientes son hospitales públicos y privados, clínicas, así como centros médicos, laboratorios y centros de salud donde cada uno tiene diferentes horarios de atención a proveedores.

Para las entregas que se realizan en Guayaquil, cada vehículo sale al despacho con una hoja de ruta (formato en Excel) llenada a mano, donde se describe el cliente, el número del documento de la factura y guía de remisión, cantidad de bultos a despachar, hora de llegada al cliente, hora de salida, y una columna donde se enumera el orden de llegada a cada cliente que es la que considera el chofer para realizar la ruta de entrega. Entre las componentes del problema que la empresa debe considerar para realizar el ruteo de sus vehículos están las ventanas de tiempo, en las cuales pueden atenderse a los diferentes clientes, así como los niveles de tráfico que se presentan en ciertos sectores y en ciertos horarios, para las entregas a las diferentes provincias se trabaja con empresas de transporte que brindan este servicio de recolección de paquetería y valija.

### **1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA A RESOLVER**

Es sumamente importante conocer cuáles son las oportunidades de mejoras que tiene la empresa en el área de logística a lo largo de la cadena de abastecimiento, pues la finalidad de este proyecto es hacer énfasis en el estudio del sistema de ruteo que actualmente tiene la empresa para realizar el despacho de sus productos a sus diferentes clientes y desarrollar un diseño de ruteo de vehículos para reducir los costos de transporte.

Como ya se había mencionado actualmente la empresa no cuenta con una herramienta que le permita planificar sus rutas de despacho de manera eficiente, pues la construcción de rutas la realiza el jefe de logística generando de forma manual el ruteo de los vehículos basándose en su propia experiencia, buscando obtener un ruteo favorable en tiempo y en costos asegurando principalmente que todos sus clientes sean atendidos.

Es por ello que, debido a la ausencia de una herramienta computacional resulta necesario diseñar un modelo de ruteo de vehículos que asegure la minimización de los costos y este orientado a mejorar el nivel de servicio a los clientes.

### **1.4. JUSTIFICACIÓN**

La logística es un proceso que incluye todas las actividades que tienen un impacto en hacer que los bienes y servicios estén disponibles para los clientes cuándo y dónde deseen adquirirlos (Ballou, 2004), pues resulta necesario la planificación de rutas para la entrega de los productos a los clientes identificando lo que necesitan y cuando lo necesitan, esto con la finalidad de disminuir los costos de transporte y mejorar el nivel de servicio.

Actualmente el nivel de servicio de la empresa se encuentra en un 95% lo que conlleva a que 95 de cada 100 pedidos son entregados a tiempo, el otro 5% de los pedidos no son entregados por 2 razones. La primera es que al momento que llega el despachador al lugar de entrega, el cliente no está disponible para recibir la carga ya que tienen horarios específicos para la recepción; y la segunda razón por la que no son entregados los pedidos es por la falta de tiempo, esto sucede cuando se debe esperar a un cliente más de lo acordado esto origina un tiempo muerto que ocasiona el incumplimiento de entrega del próximo cliente.

El ruteo de vehículo puede constituir para la empresa un gran aporte ya que actualmente una gran parte del costo del producto que adquieren los clientes corresponde al costo de transporte, y es ahí donde se tiene la necesidad de contar con una red de transporte óptima que brinde una solución al problema de asignación de rutas desde la bodega principal y que permita satisfacer los requerimientos de los clientes, considerando todas las restricciones provenientes del medio y que generan un impacto en el proceso de entrega de mercancías, esto se logra recurriendo a la optimización combinatoria utilizando el modelo de ruteo de vehículos denominado VRP (Vehicle Routing Problem).

El presente trabajo considera una variante del VRP conocida como problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de tiempo con sus siglas VRPTW la misma que tiene una restricción de tiempo en la que los clientes deben ser atendidos por los vehículos dentro de un rango de tiempo determinado, conocido como ventana de tiempo. Donde se cuenta con una flota de camiones homogéneos (en la que todos tienen una misma capacidad de carga) que parten de una bodega, a un conjunto de clientes que necesitan satisfacer una demanda. Donde el problema consiste en determinar las rutas de los vehículos que salen de la bodega y retornan al mismo lugar, habiendo satisfecho la

demanda de los clientes atendidos. Las rutas deben respetar las ventanas de tiempo definidas por cada cliente.

## **1.5. METODOLOGÍA**

Como primer aspecto del proyecto se define el problema que se necesita resolver, el mismo que se encuentra enfocado en la falta de una herramienta computacional que de soporte al diseño de ruteo de vehículos.

Como segundo aspecto se procede a revisar literatura relacionada sobre el tema, con la finalidad de conocer que es lo que se ha hecho al respecto y analizar cómo se puede utilizar los desarrollos y estudios realizados para potenciar este proyecto de titulación.

Posteriormente se hizo la recolección de la información considerando las siguientes variables: dirección de los clientes, sus horarios de atención, los respectivos volúmenes y la frecuencia de compra, esta información es el punto de partida para hacer un enfoque preciso sobre el tema.

Como tercer aspecto se buscó un modelo que permitiera dar solución a la problemática y se determinó que la construcción de un modelo de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo VRPTW es el que más se acopla al escenario presentado por la empresa del presente estudio, posterior a ello el diseño y la calibración de parámetros fue un paso crucial para la generación de rutas cuya función objetivo era minimizar los costos y obtener una solución que contribuya de forma positiva en la operación.

Como cuarto aspecto se implementa el modelo escogido para saber si se logran los resultados esperados, que son reducir el costo de transporte y mejorar el nivel de servicio que son los puntos clave para validar el modelo.

La elaboración de las conclusiones y recomendaciones son el paso final del trabajo, así como los resultados obtenidos en el proceso de distribución.

## **1.6. ESTRUCTURA DEL PROYECTO.**

El capítulo uno se enfoca en conocer como la transportación se ha convertido en un tema de análisis muy necesario en la empresa del presente estudio ya que si este es planificado a través de una herramienta sistemática podrá generar gran ahorro en el rubro e incrementar el nivel de servicio. Se incluyen los objetivos y la situación actual de la empresa con la finalidad de generar una herramienta eficaz y eficiente para el ruteo de vehículos.

El capítulo dos aborda la literatura relacionada con el tema y principalmente tres casos del problema de ruteo de vehículos, lo que permite conocer cuál es el caso que la empresa enfrenta al momento de realizar su distribución y los métodos con los que se cuenta para dar solución óptima a la problemática.

En el capítulo tres se conoce como es el proceso de distribución que se lleva en la empresa y la forma en que los productos son entregados a sus clientes y su problemática, así también se empieza hacer la recolección de información para dar forma al modelo que se va a implementar.

En el capítulo cuatro se desarrolla la formulación del modelo de programación considerando las ventanas de tiempo con la que cuentan los clientes para ser atendido y encontrar una buena solución.

El capítulo cinco contempla las conclusiones y recomendaciones que permitan un mejor nivel de servicio y una mejora en la reducción de los costos de transporte.

## CAPÍTULO 2

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. INVESTIGACIONES RELACIONADAS

En el día a día el proceso distribución es una actividad fundamental para el desarrollo de una empresa y, mediante la administración de un sistema de transporte eficiente y de bajo costo las organizaciones pueden obtener un aumento en la competitividad, en las economías de escala y una reducción los precios de los productos (Bodin, Golden, & Ball, 1983).

El problema de asignación de rutas (VRP) es el nombre dado a todas las clases de problemas en donde un conjunto de rutas para una serie de vehículos tiene como origen uno o varios depósitos que se encuentran ubicados geográficamente, y deben atender un número de clientes o ciudades (Bodin, Golden, & Ball, 1983).

Una de las características distintivas del VRP es que es la combinación de dos problemas matemáticos conocidos: El BinPacking en el sentido que la sumatoria de la demanda de cada cliente de una ruta no excede la capacidad del camión, y el TSP (Travelling Salesman Problema) el conocido problema del agente viajero cuyo objetivo es encontrar un recorrido completo que conecte todos los nodos de una red visitándolos una vez y volviendo al punto de partida, donde seav  $\{ \}$  un conjunto de vértices, consiste en determinar un conjunto de  $m$  rutas vehiculares con un mínimo costo, que empiezan y terminan en un depósito tal, que cada vértice es visitado una vez por uno solo vehículo (Bodin, Golden, & Ball, 1983).

Para encontrar una solución al VRP, existen modelos heurísticos que dan resultados aproximados en tiempos computacionales razonables, entre ellos se destaca el algoritmo de ahorro propuesto por Clarke and Wright (1964), el método inicia con rutas que solo están formadas por el depósito y un nodo, y a cada paso del algoritmo se unen dos rutas si estas generan un ahorro de tiempo y distancia. Parte de calcular una matriz de distancias  $d_{ij}$ :

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

Donde  $(x_i, y_i)$  y  $(x_j, y_j)$  son ubicaciones geográficas de los clientes  $i$  y  $j$ .

Posteriormente, el valor de ahorro entre  $i$  y  $j$  es calculado:

$$s_{ij} = d_{1i} + d_{1j} - d_{ij}$$

Donde  $d_{1i}$  es la distancia de viaje entre el depósito 1 y el cliente  $i$ . Luego todos los valores de los ahorros son ordenados de manera descendente empezando por el valor desde el principio de la lista, CW incluye conexiones  $(i, j)$  en una ruta en donde ninguna restricción de rutas fuese incumplida con la inclusión de  $i$  a  $j$  en esa ruta (Toth & Daniele, 2002).

## 2.2. MARCO CONCEPTUAL

### 2.2.1. El problema del agente viajero (TSP)

El problema del agente viajero (o TSP por sus siglas en inglés Travelling Salesman Problem) se dispone de un solo vehículo que debe visitar a todos los clientes en una sola ruta a un costo mínimo, en la cual no debe repetir los clientes ya visitados ya que no puede visitar dos veces el mismo nodo y debe regresar al punto de donde partió.

No suele existir un depósito (y si lo hubiera no se distingue de los clientes) ni existe demanda asociada a los clientes (Olivera, 2004).

### 2.2.2. Concepto de VRP

El ruteo de vehículos, o Vehicle Routing Problem (VRP), es un problema que deben enfrentar las empresas que realizan la distribución. El problema de ruteo de vehículos siempre busca satisfacer la demanda de los clientes a mínimo costo, así como encontrar la mejor solución posible respetando las diferentes restricciones.

A grandes rasgos un problema de ruteo de vehículos consiste en, dado un conjunto de clientes y depósitos dispersos geográficamente y una flota de vehículos, determinar un conjunto de rutas de costo mínimo que comiencen y terminen en los depósitos, para que los vehículos visiten a los clientes máximo una vez (Daza, Montoya, & Narducci, 2009).

El problema de ruteo de vehículo se lo puede definir de la siguiente manera:

El VRP se define como un conjunto de  $n$  ciudades  $X$  ( $X_1, X_2, X_3 \dots X_n$ ) ubicadas en distintos puntos de una zona con demandas  $d$  ( $D_1, D_2, D_3 \dots D_n$ ) definidas en cada punto y una flota de  $m$  vehículos  $V$  ( $V_1, V_2, V_3 \dots V_m$ ), se busca visitar a cada una de las  $n$  ciudades de tal manera que la distancia total recorrida al visitar todas sea la menor ( $Z^*$ ) asegurando que la demanda de los clientes sea atendida. El VRP es un problema que tiene relación con problema del agente viajero (TSP) y con el problema de empacado (BPP) (Cruz, Restrepo, & Medina, 2007).

### **2.2.3. Problema de ruteo de vehículos capacitado (CVRP)**

El capacitated vehicle routing problem es un caso particular del VRP donde existe una flota instalada  $V$  donde cada vehículo tiene una capacidad limitada, que deben ser despachados desde una depósito central, visitar una secuencia de clientes una sola vez dentro de una ruta dada y regresar al mismo depósito (Daza, Montoya, & Narducci, 2009).

El modelo CVRP posee los siguientes supuestos:

- La demanda es determinística ya que se conoce la cantidad a entregar a cada cliente.
- Cada vehículo llevará la totalidad de la carga a entregar a los clientes.
- La flota de vehículos es homogénea.
- El punto de partida de los vehículos es uno solo y se lo considera como depósito central.

### **2.2.4. Problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW)**

El Vehicle Routing Problem With Time Windows (VRPTW), es otra variante del problema de ruteo de vehículos, pero impone restricciones, una de ellas es establecer lapsos de tiempo para atender a los vehículos o fijar horarios de atención para recibir los pedidos, estos horarios se los determina como ventana de tiempo que deben cumplir los vehículos para realizar sus entregas.

Las ventanas hacen referencia a la existencia de un límite de tiempo dentro del cual un cliente debe ser atendido, el vehículo sale del depósito en el tiempo

cero, se da el tiempo correspondiente a cada arco y la ventana de tiempo que tiene cada cliente para ser atendido, si el vehículo llega antes debe esperar hasta que le toque el turno de ser atendido.

El objetivo es minimizar el número de rutas, los tiempos de recorrido y la flota de vehículos y sus costos relacionados, en este caso existen dos variantes: con ventanas de tiempo blandas, las cuales pueden ser violadas a un cierto costo y con restricciones de ventanas de tiempo duras, las que no pueden ser violadas (Toth & Daniele, 2002).

## Planteamiento de modelo método exacto.

### Índices:

$i$  : Cliente que se está atendiendo

$j$  : Cliente próximo a ser atendido

$r$  : Rutas

### Escalar:

$Cap$  : Capacidad de vehículo  $1.50 m^3$

### Parámetros:

$d_{ij}$ : Distancias del cliente  $i$  al cliente  $j$ .

$dm_i$ : Demanda del cliente  $i$  en  $m^3$

$S_i$ : Tiempo de llegada al cliente  $i$ .

$TA_i$ : Tiempo de atención del cliente  $i$ .

$TWI_i$ : Tiempo de atención inicial del cliente  $i$ .

$TWF_i$ : Tiempo de atención final del cliente  $i$ .

**Variables:**

$x_{ijr}$ : Asignación de la Ruta  $r$  para el cliente  $i$  al cliente  $j$ .

Función Objetivo:

$$\text{Min } Z = \sum_{r=1}^m \sum_{i=1, j=1}^n d_{ij} * x_{ijr}$$

Restricciones:

- 1 La restricción 1 indica que, para cada ruta, esta debe partir en el depósito

$$\sum_{j=1}^n x_{1jr} = 1; \quad \forall r$$

- 2 La restricción 2 indica que, para cada ruta, esta debe terminar en el depósito.

$$\sum_{i=1}^n x_{i1r} = 1; \quad \forall r$$

- 3 La restricción 3 indica que, para cada cliente este debe tener una llegada a otro cliente o al depósito.

$$\sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^m x_{ijr} = 1; \quad \forall i - 1$$

- 4 La restricción 4 indica que, para cada cliente este debe tener una salida a otro cliente o al depósito.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^m x_{ijr} = 1; \quad \forall j - 1$$

- 5 La restricción 5 indica que, para cada cliente en una ruta, si este tiene una conexión de salida en una ruta, este a su vez debe tener una conexión de llegada.

$$\sum_{i=1}^n x_{ijr} = \sum_{j=1}^n x_{jir} ; \quad \forall j, r$$

- 6 La restricción 6 indica que la demanda no puede superar la capacidad del vehículo.

$$\sum_{j=1}^n (x_{ijr} * demanda_i) \leq 1.5 \quad \forall i, r$$

- 7 La restricción 7 indica que la demanda debe ser mayor a cero.

$$\sum_{j=1}^n (x_{ijr} * demanda_i) \leq 0 \quad \forall i, r$$

- 8 La restricción 8 indica que, para cada cliente, el tiempo en el que se llega a un cliente ( $S_i$ ) debe ser mayor al tiempo de atención de inicio ( $TWI_i$ ).

$$\sum_{j=2}^n S_i * x_{ijr} - TWI_i \geq 0; \quad \forall i$$

- 9 La restricción 9 indica que, para cada cliente, el tiempo en el que se llega a un cliente ( $S_i$ ) más el tiempo de atención al mismo, debe ser mayor al tiempo de atención de final ( $TWF_i$ ).

$$TWF_i - \sum_{r=1}^m \sum_{j=2}^n ((S_i + TA_i) * x_{ijr}) \geq 0; \quad \forall i$$

- 10 La restricción 10 indica que la variable  $x_{ijr}$  debe ser una variable binaria.

$$x_{ijr} \in \{0,1\}; \quad \forall i, j, r$$

### 2.2.5. Problema de ruteo de vehículos con múltiple depósito (VRP- MDVRP)

El problema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos consiste en asignar rutas a vehículos para visitar clientes que se encuentran dispersos en un área geográfica y en el cual cada vehículo se encuentra ubicado en uno de muchos depósitos desde el cual este debe iniciar su recorrido y al cual debe retornar una vez terminada la ruta asignada al depósito inicial. La restricción de múltiples depósitos aumenta la complejidad del problema simple de ruteo de vehículos que ha sido extensamente estudiado en el campo de la optimización combinatoria y para el que se han generado todo tipo de métodos de solución (Herazo, 2012).

### 2.3. MÉTRICA DE MANHATTAN

La métrica de Manhattan es una forma de geometría que calcula la distancia que existe entre dos puntos  $d_{ij}$  en un plano cartesiano, considerando la suma de las diferencias absolutas de sus coordenadas  $x$  y  $y$ .

$$d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|$$

Una característica de esta métrica es que considera que la menor distancia entre dos puntos es la línea recta, cosa que es verdad, ya que en el ruteo vehicular no se puede pasar encima de las cuadras o por encima de los ríos debido a que los vehículos deben pasar por las carreteras (Parra & Cardenas, 2018).

## **2.4. MÉTRICA EUCLIDIANA**

La métrica de euclidiana es una forma de geometría que calcula la distancia que existe entre dos puntos en un plano cartesiano, considerada como la raíz de la suma de los cuadrados de la resta de los ejes de los dos puntos.

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

Estas métricas regularmente son aplicadas en el día a día para el transporte terrestre, en equipos electrónicos con respectos al hardware de dichos equipos (en la serie de circuitos de las placas madres) (Parra & Cardenas, 2018).

## **2.5. MÉTODOS DE SOLUCIÓN**

Se han propuesto dos métodos para la solución de los VRP como son:

### **2.5.1. Métodos exactos**

Los métodos exactos usan ecuaciones matemáticas o algoritmos que han sido propuestos para encontrar una solución óptima al problema, como la programación lineal, o la programación entera Mixta que utiliza los algoritmos de ramificación como lo es el Branch & Bound, programación no lineal, etc.

Los métodos exactos son eficientes para resolver problemas pequeños por el uso de tiempos computacionales que generalmente son muy largos, ya que dependiendo de la complejidad del problema la resolución puede llegar a tomar años en resolverse cuando la dimensión del problema es grande (Olivera, 2004).

## 2.5.2. Métodos aproximados

De acuerdo a la complejidad del VRP diferentes métodos aproximados se han propuestos, aunque no garantizan una solución óptima, sino buscan obtener una solución apegada al óptimo del problema, estos métodos utilizan algoritmos heurísticos y metaheurísticos. La principal ventaja de los métodos aproximados es un menor tiempo computacional. Factores como la calidad de la solución, tiempo utilizado, memoria computacional varían dependiendo del algoritmo que se aplique, por lo que pensar que un solo algoritmo puede solucionar todos los problemas existentes no es lo ideal.

Para resolver el problema de VRP existen varios algoritmos aproximados como son el Clarke and Wright y el de barrido que se revisarán a continuación:

### 2.5.2.1. Algoritmo Clarke and Wright

El algoritmo de Clarke and Wright es la heurística más utilizada para la resolución del problema de VRP, también es llamada algoritmo de ahorro ya que mediante una matriz de ahorro se generan rutas y se escogen las de mayores ahorros dentro de la matriz.

Si en una solución dos rutas diferentes  $(1, \dots, i, 1)$  y  $(1, j, \dots, 1)$  pueden ser combinadas formando una nueva ruta  $(1, \dots, i, j, \dots, 1)$ , el ahorro en distancia obtenida por dicha unión es :

$$S_{ij} = C_{i1} + C_{1j} - C_{ij}$$

Se parte de una solución inicial y se realizan las uniones que den mayores ahorros siempre que no violen las restricciones del problema.

A continuación, se van a detallar los pasos a seguir para la aplicación del algoritmo de ahorro:

Paso 1: Con las coordenadas de cada cliente se procede a elaborar la matriz de distancia.

Paso 2: Se calcula la tabla de ahorros  $S_{ij}$  para cada par de clientes  $i, j = 1, 2, \dots, n$ .

Paso 3: Para cada cliente construir la ruta  $(1, i, 1)$

Paso 4: Ordenar los ahorros de mayor a menor, iniciando por el mayor de los ahorros.

Paso 5: Unir los nodos correspondientes de tal forma que  $S_{ij} = \max S_{ij}$ , donde el máximo se toma entre los ahorros que no han sido considerados aun, se creará la ruta  $r_{i^*j^*}$ , si  $i^*$  es el último cliente de  $r_{i^*}$  y  $j^*$  es el primer cliente de  $r_{j^*}$ . Eliminar  $s_{i^*j^*}$  de futuras consideraciones. Posterior se repite el paso 5 hasta que no haya más combinaciones de ahorros a considerar (Olivera, 2004).

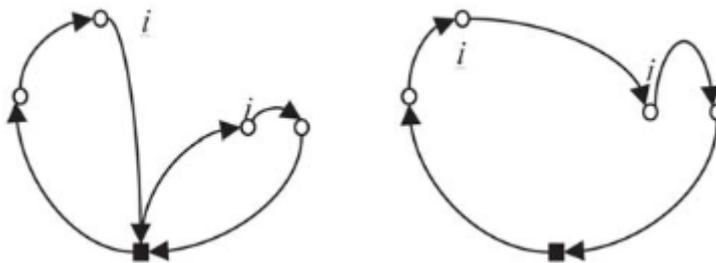


FIGURA 21 Heurística del algoritmo de ahorro Clarke and Wright..

Fuente: Rocha L, González C y Orejuela J (2011)

## 2.5.2.2. Algoritmo de Barrido

El algoritmo de barrido tal como su nombre lo indica, realiza un barrido a través de un plano cartesiano donde el depósito central es considerado el centro del plano y los puntos son agrupados por clústeres, este método se resuelve en dos fases. Primero se crean los grupos de clientes llamados clústeres considerando las restricciones de capacidad de los vehículos, y segundo para cada clúster se genera una ruta que visite a todos los clientes.

En la heurística de barrido los clústeres se forman girando una semirrecta con origen en el depósito central, luego se van incorporando los clientes por dicha semirrecta hasta que se cumpla la restricción de capacidad de los vehículos. Este algoritmo puede aplicarse para encontrar soluciones a problemas geográficos, es decir, en los que cada nodo corresponde a un punto en el plano.

A continuación, se van a detallar los pasos a seguir para la aplicación del algoritmo de ahorro:

Paso 1: Se ordenan los clientes de manera ascendente según el valor del ángulo  $\theta$ , si dos clientes poseen igual valor de  $\theta$  se escoge primero el de menor valor de la distancia  $p$ . Luego se debe seleccionar un cliente  $w$  para comenzar y hacer el ruteo, en este caso la ruta  $k = 1$  sin superar la capacidad de la ruta  $C_k = \{w\}$ .

Paso 2: Si todos los clientes pertenecen a algún clúster, ir al paso 3. Caso contrario se selecciona el siguiente cliente  $W_i$ . Si  $W_i$  puede ser agregado a  $C_k$  sin sobrepasar las restricciones de capacidad, hacer  $C_k$ , pero si las sobrepasa se crea un nuevo clúster para el cual hacer  $k = k + 1$  y crear un nuevo clúster  $C_k = \{w\}$  y se repite el paso dos hasta que no queden clientes sin clúster.

Paso 3: Para cada clúster  $C_k$  resolver un TSP (Travelling Salesman Problem) con sus clientes y obtener una solución que puede ser óptima hasta no comprobar lo contrario (Olivera, 2004).

## **CAPÍTULO 3**

### **3. DESARROLLO DEL PROCESO**

#### **3.1. GENERALIDADES DE LA EMPRESA**

La empresa del presente estudio tiene 84 años en el mercado y se dedica a la importación, comercialización y distribución de insumos y dispositivos médicos su orientación fundamental es contribuir al mejoramiento de la atención y los servicios de salud en el país, siendo líder a nivel nacional en la provisión de películas radiográficas, insumos de Cardiología, esterilización y cuidados intensivos. Se encuentra ubicada en la ciudad de Guayaquil en el Km 5 de la vía Daule donde cuenta con sus oficinas principales y su centro de distribución estratégicamente ubicado para la comercialización de sus productos dentro y fuera de la ciudad, sus clientes principales son hospitales públicos y privados, clínicas, laboratorios y centros de imágenes y rayos x.

En cuanto a la infraestructura del centro de distribución, sus bodegas cuentan con un sistema de almacenamiento con racks y sistema de climatización para un adecuado almacenaje de sus insumos, en cuanto a las actividades y procesos internos, la empresa ha estado en constante innovación con la finalidad de adaptarse a los cambios y de minimizar tiempos y recursos enfocados al servicio al cliente, pero actualmente no cuenta con una herramienta sistemática que le permita planificar sus rutas de despacho de manera eficiente, puesto que el que toma la decisión en base a su experiencia para la construcción de rutas es el jefe de logística quien decide que vehículo va a servir a cada cliente considerando las distancias y las variables de tiempo de cada cliente, pero este método se encuentra muy distante de generar soluciones óptimas, generando gastos innecesarios para la organización.

### **3.1.1. Su flota vehicular**

La empresa cuenta con 3 camionetas equipadas con carrocería especializada para la transportación, los mismos que se encuentran seleccionados de acuerdo al peso y al volumen de los insumos y dispositivos médicos que comercializa, tomando en cuenta que los productos que distribuye son considerados carga seca.

Las camionetas por su tamaño y longitud tienen fácil acceso a la circulación en las vías y en la zona del centro de la ciudad, donde la ordenanza que regula el tránsito en las zonas de alto tráfico, prohíbe la circulación de vehículos y camiones de mayor tamaño y longitud.

Las restricciones de los vehículos de la empresa son:

- La capacidad en peso es de 500 kilos.
- La capacidad en volumen es de  $1.5 m^3$

### **3.1.2. Sus clientes**

Son setenta los clientes que conforman su base de datos y se encuentran ubicados en el casco comercial de la ciudad entre ellos se puede mencionar clientes públicos y privados como hospitales, clínicas, centros de imágenes y centro de rayos X.

Los clientes tienen restricciones las mismas que se encuentran asociadas al horario de atención, y en el presente caso de estudio se conocerán como ventanas de tiempo. Al tener vehículos con capacidad limitada se enfocará a que cada cliente debe ser visitado una sola vez, sin embargo, en algunos casos se reconoce que la demanda del cliente deberá ser satisfecha por tiempos y vehículos diferentes.

### **3.2. SU PROCESO DE DISTRIBUCIÓN**

Las actividades se inician cuando el cliente solicita las órdenes de pedido al área comercial de acuerdo a su necesidad, el área comercial ingresa el pedido al sistema, la misma que es revisada por el área de crédito y cobranza quien confirma si la transacción es de contado o crédito y luego de la verificación que se haya realizado el depósito si la venta es de contado o si es a crédito confirman que tengan activa una línea de crédito, envían la aprobación para que sea facturada por el área respectiva. Luego de facturado el personal de bodega realiza el alistamiento o recolección de los productos y elabora la respectiva guía de remisión para dejar todo en la zona de consolidación donde la mercadería queda revisada y lista para cargar los vehículos tal como lo describe la figura 3.1.

Las actividades se inician todas las mañanas a las 7:00, lo primero que se realiza en el andén de despacho es la inspección y verificación a los vehículos por parte del supervisor de bodega para constatar el estado y la limpieza del mismo, una vez teniendo la aprobación del estado del vehículo se procede a cargar las camionetas para realizar las entregas a los diferentes clientes.

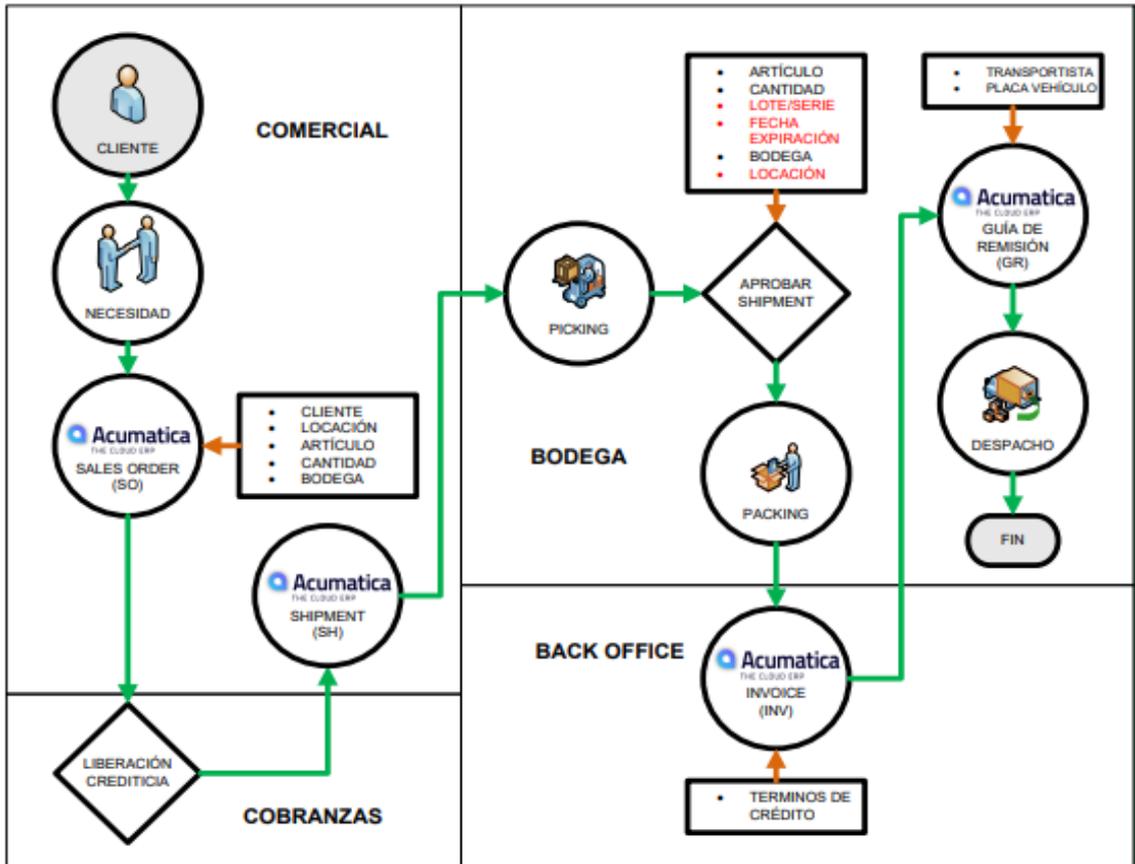


FIGURA 3 1 Flujo del proceso de distribución.

Fuente: Empresa de estudio

Cada vehículo sale al despacho con una hoja de ruta en formato Excel tal como lo describe la figura 3.2 la misma se llena a mano donde se describe el cliente, el número del documento tales como factura y guía de remisión, cantidad de bultos a despachar, hora de llegada al cliente como hora de salida, y una columna donde se enumera el orden de llegada a cada cliente que es la que debe considerar el chofer para realizar la ruta de entrega.

| REGISTRO HOJA DE RUTA                                 |         |             |                     |                    |                |                      |                            |                           |     |                 |                      | No.                    | REGOYL0004    |
|---|---------|-------------|---------------------|--------------------|----------------|----------------------|----------------------------|---------------------------|-----|-----------------|----------------------|------------------------|---------------|
|   |         |             |                     |                    |                |                      |                            |                           |     |                 |                      | Fecha de emisión       | 01/07/2016    |
|   |         |             |                     |                    |                |                      |                            |                           |     |                 |                      | Fecha de actualización | 01/07/2016    |
|   |         |             |                     |                    |                |                      |                            |                           |     |                 |                      | Versión                | 1             |
| Chofer: _____   |         |             |                     |                    |                |                      |                            |                           |     |                 |                      | Fecha: _____           |               |
| Bodeguero: _____                                      |         |             |                     |                    |                |                      |                            |                           |     |                 |                      | Hora: _____            |               |
| Vehículo: _____ Placa: _____                          |         |             |                     |                    |                |                      |                            |                           |     |                 |                      |                        |               |
| Entrega de Mercadería & Documentación (Por Despachar) |         |             |                     |                    |                |                      |                            |                           |     |                 |                      |                        |               |
| No.   | Cliente | No. Factura | No. Nota de Entrega | No. Nota de Retiro | Pack List - SH | No. Guía de Remisión | Total Unidades Despachadas | Cantidad de Cajas Factura | KM. | Hora de Llegada | Hora de Atención del | Hora de Salida         | Observaciones |
| 1   |         |             |                     |                    |                |                      |                            |                           |     |                 |                      |                        |               |
| 2   |         |             |                     |                    |                |                      |                            |                           |     |                 |                      |                        |               |
| 3   |         |             |                     |                    |                |                      |                            |                           |     |                 |                      |                        |               |
| 4   |         |             |                     |                    |                |                      |                            |                           |     |                 |                      |                        |               |
| 5   |         |             |                     |                    |                |                      |                            |                           |     |                 |                      |                        |               |
| 6   |         |             |                     |                    |                |                      |                            |                           |     |                 |                      |                        |               |
| 7   |         |             |                     |                    |                |                      |                            |                           |     |                 |                      |                        |               |
| 8   |         |             |                     |                    |                |                      |                            |                           |     |                 |                      |                        |               |
| 9   |         |             |                     |                    |                |                      |                            |                           |     |                 |                      |                        |               |
| 10  |         |             |                     |                    |                |                      |                            |                           |     |                 |                      |                        |               |

FIGURA 2 2 Registro de hoja de ruta.

Fuente: Empresa de estudio

### 3.3. PROBLEMÁTICA

En el proceso actual se llega a cumplir con la entrega diaria de clientes, sin embargo, se ha evidenciado que existe puntos de deficiencia con respecto a las rutas ya sea porque existen cruces durante el recorrido, no se administran las ventanas de tiempo de manera eficiente, se generan más rutas de las necesarias.

Esto ocasiona que exista incremento de los costos de la actividad de transporte debido al mantenimiento de las unidades, costo del combustible y cambio de las llantas a corto plazo, generando una reducción de la capacidad de la flota para la atención de los potenciales clientes. Otro rubro que también genera impacto es el de las horas extras del personal encargado del despacho.

Entre las componentes del problema que la empresa debe considerar para realizar el ruteo de sus vehículos están las ventanas de tiempo en las cuales pueden atenderse a los diferentes clientes, así como los niveles de tráfico que se presentan en ciertos sectores y en ciertos horarios.

El vehículo puede llegar antes del inicio de la ventana de tiempo del cliente, y en ese caso deberá esperar para realizar la entrega, pero ningún cliente puede ser servido luego del final de su ventana de tiempo.

Para resolverlo se implementa la Heurística Clarke & Wright donde a partir de un punto de origen, en este caso la bodega, se encuentra la ruta que minimiza la distancias a los diferentes clientes considerando sus diferentes tiempos de recepción contemplando que su punto de origen y llegada es el depósito principal.

### **3.4. RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN**

Inicialmente se descarga del sistema la base de datos de los clientes ubicados en la ciudad de Guayaquil y posteriormente se hace contacto telefónico a cada uno de ellos, indicándoles que el motivo de la llamada era con la finalidad de mejorar el servicio y parte de esta mejora era conocer cuál es el horario de atención en la recepción de mercadería, también en este acercamiento se aprovecha conocer que días de la semana atienden, y se elabora una matriz llamada base de datos de clientes con horarios de atención, tal como lo muestra la tabla 1.

TABLA 1 Base de datos de clientes con horarios de atención

Fuente: Creado por el autor

| Cliente | Día       | Hora Inicio | Hora Fin |
|---------|-----------|-------------|----------|
| 1       | Lunes     | 8:30:00     | 16:00:00 |
| 1       | Miércoles | 8:30:00     | 16:00:00 |
| 2       | Lunes     | 8:30:00     | 16:00:00 |
| 2       | Miércoles | 8:30:00     | 16:00:00 |
| 3       | Lunes     | 9:00:00     | 16:00:00 |
| 3       | Miércoles | 9:00:00     | 16:00:00 |
| 4       | Lunes     | 8:00:00     | 17:00:00 |
| 4       | Miércoles | 8:00:00     | 17:00:00 |
| 5       | Lunes     | 8:00:00     | 17:00:00 |
| 5       | Miércoles | 8:00:00     | 17:00:00 |
| 6       | Lunes     | 8:00:00     | 18:00:00 |
| 6       | Miércoles | 8:00:00     | 18:00:00 |
| 7       | Lunes     | 8:30:00     | 16:00:00 |
| 7       | Miércoles | 8:30:00     | 16:00:00 |
| 8       | Lunes     | 8:30:00     | 16:00:00 |
| 8       | Miércoles | 8:30:00     | 16:00:00 |
| 9       | Lunes     | 8:30:00     | 16:00:00 |
| 9       | Miércoles | 8:30:00     | 16:00:00 |
| 9       | Lunes     | 9:00:00     | 15:00:00 |
| 9       | Miércoles | 9:00:00     | 15:00:00 |
| 10      | Lunes     | 8:30:00     | 15:00:00 |
| 10      | Miércoles | 8:30:00     | 15:00:00 |
| 11      | Lunes     | 8:30:00     | 15:00:00 |
| 11      | Miércoles | 8:30:00     | 15:00:00 |
| 12      | Lunes     | 13:30:00    | 16:30:00 |
| 12      | Miércoles | 13:30:00    | 16:30:00 |
| 13      | Lunes     | 10:00:00    | 16:00:00 |
| 13      | Miércoles | 10:00:00    | 16:00:00 |
| 14      | Lunes     | 9:00:00     | 16:00:00 |
| 14      | Miércoles | 9:00:00     | 16:00:00 |
| 15      | Lunes     | 8:30:00     | 17:00:00 |
| 15      | Miércoles | 8:30:00     | 17:00:00 |
| 16      | Lunes     | 8:30:00     | 16:00:00 |

Debido a que la empresa del presente estudio no cuenta con un sistema de posicionamiento global (GPS), con la base de datos que se había elaborado se procedió a tomar de la aplicación Google Maps las coordenadas geográficas en este caso la latitud y la longitud de cada cliente y así calcular la distancia entre cada uno de ellos.

En este caso se agrupan los clientes y se calcula la distancia entre cada uno de ellos y el depósito con la utilización de la métrica de Manhattan ya que esta calcula la menor distancia entre dos puntos. Tal como lo muestra la tabla 2.

**TABLA 2 Base de datos de clientes y sus coordenadas**

Fuente: Creado por el autor.

| Cientes | Address  | Coordenadas           |
|---------|--|-----------------------|
| 1       | CAÑAR 607 Y CORONEL  | -2.214600, -79.889465 |
| 2       | LETAMENDI 602 Y NOGUCHI  | -2.206315, -79.888155 |
| 3       | AV. ABEL CASTILLO S/N Y AV. JUAN TANGA MARENGO PB Edificio: VITALIS 1 Oficina: 4 | -2.157568, -79.891823 |
| 4       | AV.DEL PERIODISTA-CONSULTORIO CL.KENNEDY   | -2.172657, -79.898896 |
| 5       | BOLIVIA 1000 Y SEIS DE MARZO - VILLAVICENCIO                                     | -2.212512, -79.891130 |
| 6       | 13 AVA. 1426 Y GOMEZ RENDON - MALDONADO  | -2.195497, -79.921817 |
| 7       | ESCOBEDO 409 Y TOMAS MARTINEZ  | -2.185689, -79.881933 |
| 8       | CDLA. NUEVA KENNEDY OESTE AV. SAN JORGE 805                                      | -2.172539, -79.898567 |
| 9       | AV. ALEJANDRO ANDRADE 27-29 Y JUAN ROLANDO COELLO                                | -2.168691, -79.893792 |
| 10      | ALCEDO Y PEDRO PABLO GOMEZ FRENTE A LA MATERNIDAD                                | -2.196919, -79.888640 |
| 11      | CROTOS SOLAR 1 Y AV. RODOLFO BAQUERIZO NAZUR                                     | -2.133881, -79.903584 |
| 12      | VIA A SAMBORONDON KM 2.5 S/N   | -2.138303, -79.864350 |
| 13      | PADRE AGUIRRE 401 Y GENERAL CORDOVA  | -2.186354, -79.879959 |
| 14      | 6 DE MARZO 1415 Y AYACUCHO   | -2.197916, -79.888613 |
| 15      | PANAMA 616 Y CALLE ROCA  | -2.189106, -79.879360 |
| 16      | MIGUEL H.ALCIVAR Y FLAMINGO M26 S-15.CDLA ALBATROS                               | -2.170545, -79.894463 |
| 17      | LORENZO DE GARAICOA 3209 Y ARGENTINA   | -2.207391, -79.889155 |
| 18      | PADRE AGUIRRE 401 Y GENERAL CORDOVA  | -2.186305, -79.880019 |
| 19      | AV. SAN JORGE S/N Y CALLE NOVENA   | -2.172657, -79.898896 |
| 20      | PADRE AGUIRRE 401 Y GENERAL CORDOVA  | -2.186354, -79.879959 |
| 21      | PORTETE 5002 Y 24VA - 25VA   | -2.200222, -79.921690 |
| 22      | 38AVA. 2428 Y CALLE A - CALLE B  | -2.211203, -79.936670 |
| 23      | PADRE SOLANO 1311 Y GARCIA MORENO, PISO 2 OF. 1                                  | -2.186179, -79.890475 |
| 24      | CORONEL 2301 Y CAÑAR   | -2.214600, -79.889465 |
| 25      | AV.ABEL CASTILLO S/N Y AV. JUAN TANCA MARENGO                                    | -2.157614, -79.891606 |
| 26      | GENERAL GOMEZ No.726 Y LUIS URDANETA   | -2.188803, -79.880680 |
| 27      | DOMINGO COMIN 1103 Y CALLE F - CALLE G   | -2.225525, -79.889792 |
| 28      | AV. JOSE MARIA EGAS SL 12 Y RODOLFO BAQUERIZO                                    | -2.139150, -79.898990 |
| 29      | ELIZALDE 114 ENTRE MALECON Y PICHINCHA   | -2.193066, -79.880277 |
| 30      | PICHINCHA 605 E/ 10 DE AGOSTO Y C.BALLEN   | -2.195628, -79.881376 |
| 31      | PORTETE 3815 Y 12 AVA. - 13 AVA.   | -2.201747, -79.915679 |
| 32      | COOP.REINA DEL QUINCHE MZ.503 VILLA 1-8  | -2.270499, -79.889724 |
| 33      | 29 AVA SAN Y CALI APAGOS - ORIENTE   | -2.217118, -79.909486 |

Para abordar el problema de planificación de rutas se recurrió a la búsqueda de modelos que permitan dar solución al problema y se eligió al VRPTW por su dinamismo en escenarios como el que se presenta en este proyecto, mediante la heurística de Clarke and Wright.

El Software utilizado es el lenguaje de programación avanzada conocido como Wolfram Mathematica que tiene varios atributos como una biblioteca de funciones matemáticas, matrices, brinda la posibilidad de manipular datos y visualizaciones geográficas.

TABLA 3 Base de datos de mercadería

Fuente: Creado por el autor.

| Description  | Warehouse | und/cajas | LARGO | ALTO | FONDO | LARGO m | ALTO m3 | FONDO m | TOTAL M3/CAJ |
|--|-----------|-----------|-------|------|-------|---------|---------|---------|--------------|
| E-Z CAT SULFATO DE BARIO PARA TOMOGRAFIA E-Z EM        | GUAYAQUIL | 24        | 28    | 15   | 56    | 0.28    | 0.15    | 0.56    | 0.0235       |
| E-Z HD SULFATO DE BARIO VASO                           | GUAYAQUIL | 24        | 28    | 16   | 41    | 0.28    | 0.16    | 0.41    | 0.0184       |
| POLIBAR S/B SULFATO DE BARIO PARA ENEMA E-Z EM         | GUAYAQUIL | 24        | 42    | 18   | 43    | 0.42    | 0.18    | 0.43    | 0.0325       |
| E-Z HD SULFATO DE BARIO VASO + E-Z GAS                 | GUAYAQUIL | 24        | 42    | 18   | 43    | 0.42    | 0.18    | 0.43    | 0.0325       |
| POLIBAR C/B SULFATO DE BARIO PARA ENEMA                | GUAYAQUIL | 24        | 28    | 16   | 41    | 0.28    | 0.16    | 0.41    | 0.0184       |
| PELICULA 8X10 DRYSTAR 5300                             | GUAYAQUIL | 5         | 16.2  | 22.7 | 27.2  | 0.162   | 0.227   | 0.272   | 0.0100       |
| PELICULA 10X12 DRYSTAR                                 | GUAYAQUIL | 5         | 15.7  | 22.8 | 27.2  | 0.157   | 0.228   | 0.272   | 0.0097       |
| PELICULA 11X14 DRYSTAR 5300                            | GUAYAQUIL | 5         | 15.5  | 30   | 37.5  | 0.155   | 0.3     | 0.375   | 0.0174       |
| PELICULA 14X17 DRYSTAR 5300                            | GUAYAQUIL | 5         | 15.5  | 38.9 | 45    | 0.155   | 0.389   | 0.45    | 0.0271       |
| PELICULA 18X24 HDRC PLUS                               | GUAYAQUIL | 5         | 16.8  | 21.5 | 26.7  | 0.168   | 0.215   | 0.267   | 0.0096       |
| PELICULA 8X10 MAMOGRAFIA DRYSTAR                       | GUAYAQUIL | 5         | 15.7  | 22.7 | 27.2  | 0.157   | 0.227   | 0.272   | 0.0097       |
| PELICULA 10X12 MAMOGRAFIA DRYSTAR                      | GUAYAQUIL | 5         | 15.7  | 28   | 32    | 0.157   | 0.28    | 0.32    | 0.0141       |
| PELICULA 18X24 LUZ VERDE AGFA 100 HOJAS                | GUAYAQUIL | 5         | 26.6  | 21   | 17.3  | 0.266   | 0.21    | 0.173   | 0.0097       |
| PELICULA 30X40 LUZ VERDE AGFA 100 HOJAS                | GUAYAQUIL | 5         | 16.5  | 33.5 | 42.9  | 0.165   | 0.335   | 0.429   | 0.0237       |
| PELICULA 14X14 LUZ VERDE AGFA 100 HOJAS                | GUAYAQUIL | 5         | 16.8  | 38.9 | 38.7  | 0.168   | 0.389   | 0.387   | 0.0253       |
| OPTIRAY 320, 20ML VI                                   | GUAYAQUIL | 20        | 27    | 11.5 | 27    | 0.27    | 0.115   | 0.27    | 0.0084       |
| OPTIRAY 320, 100ML SYR                                 | GUAYAQUIL | 12        | 26.4  | 28   | 36.2  | 0.264   | 0.28    | 0.362   | 0.0268       |
| OPTIRAY 320, 75ML SYR                                  | GUAYAQUIL | 20        | 37    | 26   | 28    | 0.37    | 0.26    | 0.28    | 0.0269       |
| OPTIRAY 300, 50ML BTL                                  | GUAYAQUIL | 25        | 29    | 11   | 29    | 0.29    | 0.11    | 0.29    | 0.0093       |
| OPTIRAY 300, 100ML BTL                                 | GUAYAQUIL | 12        | 29    | 14   | 24    | 0.29    | 0.14    | 0.24    | 0.0097       |
| OPTIRAY 350, 50ML BTL                                  | GUAYAQUIL | 25        | 29    | 11   | 29    | 0.29    | 0.11    | 0.29    | 0.0093       |
| OPTIRAY 350, 100ML BTL                                 | GUAYAQUIL | 25        | 29    | 14   | 23    | 0.29    | 0.14    | 0.23    | 0.0093       |
| OPTIRAY 350, 125ML SYR                                 | GUAYAQUIL | 20        | 37    | 26   | 28    | 0.37    | 0.26    | 0.28    | 0.0269       |
| CONNECTOR TUBING BX 50                                 | GUAYAQUIL | 50        | 44    | 23   | 23    | 0.44    | 0.23    | 0.23    | 0.0233       |
| JERINGA OPTIVANTAGE FRONT-LOADING HANDI-FILL DE 200 ML | GUAYAQUIL | 50        | 53    | 37   | 39    | 0.53    | 0.37    | 0.39    | 0.0765       |
| DOS JERINGAS VACIAS 60ML PARA INYECTOR OPTISTAR, KIT   | GUAYAQUIL | 50        | 44    | 23   | 23    | 0.44    | 0.23    | 0.23    | 0.0233       |
| CONECTOR EN Y CON VALVULA DOBLE 60"                    | GUAYAQUIL | 50        | 44    | 23   | 23    | 0.44    | 0.23    | 0.23    | 0.0233       |
| JERINGA-CONECT EN Y C/VALV CHECK P.OPTIVANTAGE         | GUAYAQUIL | 50        | 53    | 37   | 39    | 0.53    | 0.37    | 0.39    | 0.0765       |
| JERINGA VACIA 150ML P. INYECTOR ANGIOMAT ILLUMENA      | GUAYAQUIL | 50        | 53    | 37   | 39    | 0.53    | 0.37    | 0.39    | 0.0765       |
| PROLYSTICA DUST COVER PAIR (ONE EACH)                  | GUAYAQUIL | 1         | 21.00 | 26   | 33    | 0.21    | 0.26    | 0.33    | 0.0180       |
| VERIFY BOWIE DICK TEST PACK, CAJA 20 UNIDADES          | GUAYAQUIL | 1         | 14.00 | 26   | 33    | 0.14    | 0.26    | 0.33    | 0.0120       |
| ACTIVADOR HP P/INDICADOR BIOLÓGICO VERIFY              | GUAYAQUIL | 1         | 10.00 | 3    | 16    | 0.1     | 0.03    | 0.16    | 0.0005       |
| INDICADOR BIOLÓGICO VH2O2, CI.50 UND.                  | GUAYAQUIL | 1         | 7.00  | 22   | 20    | 0.07    | 0.22    | 0.2     | 0.0031       |
| VERIFY V24I CHALLENGE PACK                             | GUAYAQUIL | 1         | 17.00 | 18   | 12    | 0.17    | 0.18    | 0.12    | 0.0037       |
| VERIFY ALL CLEAN TEST INDICATOR HOLDER                 | GUAYAQUIL | 1         | 11.00 | 13   | 8     | 0.11    | 0.13    | 0.08    | 0.0011       |
| VERIFY ALL CLEAN TEST INDICATOR / CAJA DE 100          | GUAYAQUIL | 1         | 4.00  | 5    | 11    | 0.04    | 0.05    | 0.11    | 0.0002       |
| VERIFY RESI-TEST INDICADOR x 100 UND                   | GUAYAQUIL | 1         | 21.00 | 27   | 10    | 0.21    | 0.27    | 0.1     | 0.0057       |
| ROLLO PAPEL TYVEK 10cm x 70m                           | GUAYAQUIL | 6         | 34.00 | 20   | 37    | 0.34    | 0.2     | 0.37    | 0.0252       |
| ROLLO PAPEL TYVEK 15cm x 70m                           | GUAYAQUIL | 4         | 35.00 | 20   | 38    | 0.35    | 0.2     | 0.38    | 0.0266       |
| ROLLO PAPEL TYVEK 20cm x 70m                           | GUAYAQUIL | 4         | 45.00 | 20   | 37    | 0.45    | 0.2     | 0.37    | 0.0333       |
| ROLLO PAPEL TYVEK 25cm x 70m                           | GUAYAQUIL | 2         | 18.00 | 20   | 37    | 0.18    | 0.2     | 0.37    | 0.0133       |
| ROLLO PAPEL TYVEK 30cm x 70m                           | GUAYAQUIL | 2         | 34.00 | 20   | 36    | 0.34    | 0.2     | 0.36    | 0.0245       |
| ROLLO PAPEL TYVEK 35cm x 70m                           | GUAYAQUIL | 2         | 38.00 | 20   | 37    | 0.38    | 0.2     | 0.37    | 0.0281       |
| ROLLO PAPEL TYVEK 40cm x70m                            | GUAYAQUIL | 2         | 40.00 | 20   | 37    | 0.4     | 0.2     | 0.37    | 0.0296       |

La tabla 3 muestra el grupo de los materiales que tienen la mayor rotación del total del inventario, los cuales serán usados para las pruebas en el modelo.

### 3.4.1. Costos del modelo

Es importante indicar que el modelo tarifario de transporte que utiliza la empresa se basa en la siguiente ecuación:

$$\text{Costo de distribución} = \text{Costo fijo} + (\text{Costo Variable} * \text{Distancia})$$

### 3.4.1.1. Costos fijos del modelo

Las referencias que abarcan los costos fijos son los siguientes:

- El costo del vehículo considerando la vida útil de 5 años.
- Costo de la matrícula que lo determina la Agencia nacional de tránsito cuyo porcentaje es aproximadamente el 2.8% sobre el valor del vehículo
- El costo del seguro cuyo porcentaje aproximado es el 4% sobre el valor del vehículo según el avalúo de la aseguradora.
- Costo de mantenimiento y limpieza del vehículo.

Tal como se muestra en la tabla 3.

**TABLA 4** Costos fijos del modelo

Fuente: Creado por el autor.

| Rubro                     | Und.                     | Camioneta        |
|---------------------------|--------------------------|------------------|
| <b>FIJO</b>               |                          |                  |
| <b>Chasis + Furgón</b>    | <b>USD(compra)</b>       | <b>\$ 40.000</b> |
| (a) Chasis                | al año(vida útil 5 años) | \$ 8.000         |
| (b) Matrícula             | al año(2,8% compra)      | \$ 1.120         |
| (c) Seguro                | al año(4% compra)        | \$ 1.600         |
| <b>Baterías</b>           | <b>USD(compra)</b>       | <b>\$ 150</b>    |
| (d) Baterías              | al año (vida útil 1 año) | \$ 150           |
| (e) Sueldo Chofer         | al año                   | \$ 7.020         |
| (f) Ayudante              | al año                   | \$ 6.022         |
| (g) Lavado                | al año                   | \$ 120           |
| (h) Mant. Predictivo      | al año (4% compra)       | \$ 1.600         |
| <b>Costo total anual</b>  | <b>USD</b>               | <b>\$ 25.632</b> |
| <b>Costo total diario</b> | <b>USD (L-V)</b>         | <b>\$ 98</b>     |

### 3.4.1.2. Costos variables del modelo

Entre los costos variables se tienen los siguientes:

- El consumo de combustible donde se va a considerar el rendimiento por galón recorrido el mismo es de 35 km y el precio del diésel se encuentra en \$1.04 por galón. La fórmula del consumo de combustible es:  
Consumo de combustible = Precio de combustible/ rendimiento del combustible = \$ / Km.
- El consumo de llantas donde se va a tomar en cuenta el rendimiento de cada vehículo por el kilometraje que recorre diariamente, su fórmula es :  
Consumo de llantas = Precio de llantas \* Numero de llantas / Rendimiento de llantas = \$ / Km
- El consumo de Aceites y filtros los mismos que son necesarios para el correcto funcionamiento del vehículo, la fórmula es la siguiente:  
Consumo de aceite= Precio \* consumo = \$/galón \* galón / km = \$ / Km

TABLA 5 Costos Variables del modelo

Fuente: Creado por el autor.

| Rubro                            | Und.          | Camioneta       |
|----------------------------------|---------------|-----------------|
| <b>VARIABLE</b>                  |               |                 |
| Diesel                           | USD/galón     | \$ 1,04         |
| Rendimiento                      | km/galón      | 30              |
| <b>(i) Costo Combustible</b>     | <b>USD/Km</b> | <b>\$ 0,035</b> |
| Llantas (4 und)                  | USD/llanta    | \$ 800          |
| Rendimiento                      | km/llanta     | 45000           |
| <b>(j) Costo Llantas</b>         | <b>USD/Km</b> | <b>\$ 0,107</b> |
| Cambio Aceite y Filtro           | USD/cambio    | 100             |
| Rendimiento                      | km/cambio     | 5000            |
| <b>(k) Costo Aceite y Filtro</b> | <b>USD/Km</b> | <b>0,020</b>    |
| Resto de Mantenim.               | 1% compra     | 400             |
| Rendimiento                      | Cada 50000 km | 50000           |
| <b>(l) Costo Resto Manten,</b>   | <b>USD/Km</b> | <b>0,008</b>    |
| <b>Total Costo Variable</b>      | <b>USD/km</b> | <b>\$ 0,169</b> |

### **3.4.1.3. Resultado de los Costos**

Para los costos fijos se considera 260 días laborables debido a que en la empresa solo labora de lunes a viernes, la fórmula es la siguiente:

$$\text{Costos fijos} = \text{Costos fijos} / \text{días laborables al año}$$

Para los costos variables se va a considerar los kilómetros recorridos, la fórmula es la siguiente:

$$\text{Costos variables} = \$ / \text{Km}$$

El costo de distribución para el vehículo es el siguiente como se muestra a continuación:

$$\text{Costo de distribución} = 98 + 0.17 * \text{Distancia recorrida}$$

## CAPÍTULO 4

### 4. RESULTADOS

En este capítulo se procede a explicar el resultado generado por medio de la heurística planteada para el problema del VRPTW.

#### 4.1. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

##### 4.1.1. Datos del modelo

Entre los principales datos del modelo a usar se tiene:

- Capacidad en peso: La máxima cantidad de peso de los productos que cada vehículo puede llevar. La capacidad en peso es de 500 kilos por vehículo.
- Capacidad en volumen: La máxima cantidad de  $m^3$  de los productos que cada vehículo puede llevar. La capacidad en volumen de los vehículos es de  $1.5 m^3$
- Ventanas de tiempo: El intervalo de tiempo de cada cliente en el que se lo puede visitar. La misma que se hace referencia en la tabla 1 “Base de datos de clientes con horarios de atención” del capítulo 3.
- Matriz de distancias: Matriz que contiene la distancias entre todos los clientes y el depósito. Ver Anexo 1
- Velocidad promedio: La velocidad promedio de cada vehículo en el presente caso de estudio es de 7 Km./ hora.

##### 4.1.2. Variables del Modelo

Entre las principales variables del modelo a usar se tiene:

- Matriz de ahorros: La matriz de ahorros se genera para todos los clientes que existan para todos los días, posteriormente se reducirá la matriz de tal manera que solo considere los clientes de un día,

acelerando los procesos computacionales al calcular solo datos que se van a usar. Ver Anexo 2

- Tiempo por cliente: El tiempo en el que se atendió al cliente.
- Conjunto de rutas: El conjunto de rutas que se van generando a medida que se recorre la matriz de ahorros se almacenan en este arreglo.

### **4.1.3. Supuestos del modelo**

El algoritmo de Clarke and Wright considera los siguientes supuestos para su correcto funcionamiento y que de un buen resultado en el modelo:

- Todos los clientes inicialmente están conectados al depósito
- El tiempo de inicio de la ruta es el tiempo del primer cliente más el tiempo de traslado a dicho cliente
- Los ahorros serán visitados de mayor a menor.
- Solo se pueden conectar los clientes de un ahorro si dichos clientes se encuentran conectados al depósito en las rutas que se unen

### **4.1.4. Planteamiento del modelo**

Tal como se muestra en el anexo 4 está el desarrollo del modelo diseñado a través del programa Wolfram Mathematica que genera inicialmente la distancia que hay entre los clientes y el depósito, posteriormente genera la matriz de ahorros entre cada uno de los clientes considerando las distancias obtenidas anteriormente y la fórmula de ahorro enunciada en capítulos anteriores.

Una vez generado estos datos se procede a ordenar la matriz de ahorros de manera ascendente para luego recorrer cada uno de los ahorros de la matriz de ahorro.

Durante el recorrido dentro de la matriz se intenta unir las rutas en las que se encuentren el par de clientes, verificando que cumplan la restricción de peso, volumen y ventanas de tiempo de los clientes, en el caso de que se pueda

cumplir se procederá a unir las rutas, caso contrario se procederá al siguiente ahorro, y así hasta considerar todos los ahorros.

#### 4.1.5. Función Objetivo

La función objetivo está propuesta para minimizar la distancia recorrida por todas las rutas, se consideran que existen  $m$  rutas disponibles y  $n$  clientes tal que,  $m \geq n$ . Aquí se suman todas las distancias ( $d_{ij}$ ) entre los clientes y depósito  $i$  y  $j$  en la que existan conexiones ( $x_{ijr}$ ) en cada ruta  $r$ .

##### Índices:

$i$  : Cliente que se está atendiendo

$j$  : Cliente próximo a ser atendido

$r$  : Rutas

##### Escalar:

$Cap$  : Capacidad de vehículo  $1.50 m^3$

##### Parámetros:

$d_{ij}$ : Distancias del cliente  $i$  al cliente  $j$ .

$dm_i$ : Demanda del cliente  $i$  en  $m^3$

$S_i$ : Tiempo de llegada al cliente  $i$ .

$TA_i$ : Tiempo de atención del cliente  $i$ .

$TWI_i$ : Tiempo de atención inicial del cliente  $i$ .

$TWF_i$ : Tiempo de atención final del cliente  $i$ .

##### Variables:

$x_{ijr}$ : Asignación de la Ruta  $r$  para el cliente  $i$  al cliente  $j$ .

## Planteamiento de modelo.

El modelo tiene la siguiente estructura lógica:

$$\text{Min}Z = \sum_{r=1}^m \sum_{i=1, j=1}^n d_{ij} * x_{ijr}$$

- 1 La restricción 1 indica que, para cada ruta, esta debe partir en el depósito

$$\sum_{j=1}^n x_{1jr} = 1; \quad \forall j - 1 \quad \forall r$$

- 2 La restricción 2 indica que, para cada ruta, esta debe terminar en el depósito.

$$\sum_{i=1}^n x_{i1r} = 1; \quad \forall i - 1 \quad \forall r$$

- 3 La restricción 3 indica que, para cada cliente i este debe tener una salidade un cliente j o del depósito.

$$\sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^m x_{ijr} = 1; \quad \forall i - 1$$

- 4 La restricción 4 indica que, para cada cliente j este debe tener una llegada de un cliente i o del depósito.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^m x_{ijr} = 1; \quad \forall j - 1$$

- 5 La restricción 5 indica que, para cada cliente en una ruta, si este tiene una conexión de salida en una ruta, este a su vez debe tener una conexión de llegada.

$$\sum_{i=1}^n x_{ijr} = \sum_{j=1}^n x_{jir} ; \quad \forall j, \forall r$$

- 6 La restricción 6 indica que la demanda no puede superar la capacidad del vehículo

$$\sum_{j=1}^n (x_{ijr} * dm_i) \leq Cap \quad \forall i - 1, \forall r$$

- 7 La restricción 7 indica que la demanda debe ser mayor a cero

$$\sum_{j=1}^n (x_{ijr} * dm_i) \leq 0 \quad \forall i - 1, \forall r$$

- 8 La restricción 8 indica que, para cada cliente, el tiempo en el que se llega a un cliente ( $S_i$ ) debe ser mayor al tiempo de atención de inicio ( $TWI_i$ ).

$$\sum_{r=1}^m \sum_{j=2}^n S_i * x_{ijr} \geq TWI_i \quad \forall i$$

- 9 La restricción 9 indica que, para cada cliente, el tiempo en el que se llega a un cliente ( $S_i$ ) más el tiempo de atención al mismo, debe ser menor al tiempo de atención de final ( $TWF_i$ ).

$$\sum_{r=1}^m \sum_{j=2}^n ((S_i + TA_i) * x_{ijr}) \leq TWF_i ; \quad \forall i$$

10 La restricción 10 indica que la variable  $x_{ijr}$  debe ser una variable binaria.

$$x_{ijr} \in \{0,1\}; \quad \forall i, j, r$$

#### **4.1.6. Análisis de resultados**

En las siguientes figuras se puede observar los resultados del Clarke and Wright por cada día laboral de la empresa en una semana con sus respectivas distancias.

Clarke and Wright: Día Lunes distancia: 45.5767

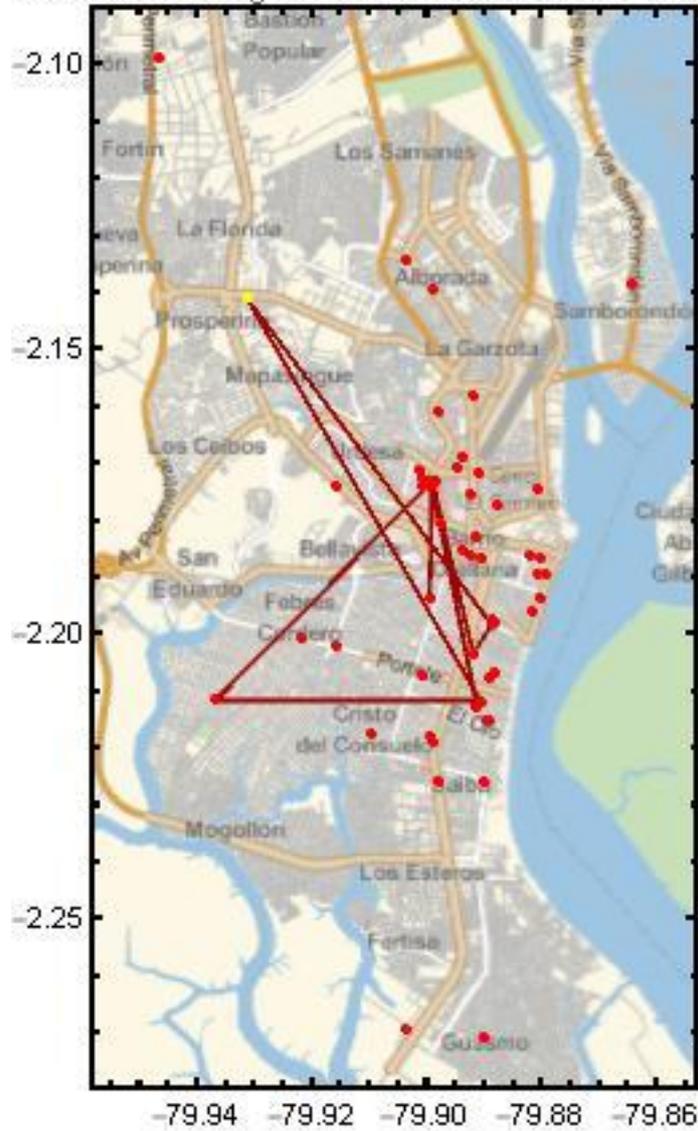


FIGURA 3 1 Resultados de Clarke and Wright día Lunes

Fuente: Empresa de estudio

Clarke and Wright: Día Martes distancia: 66.4013

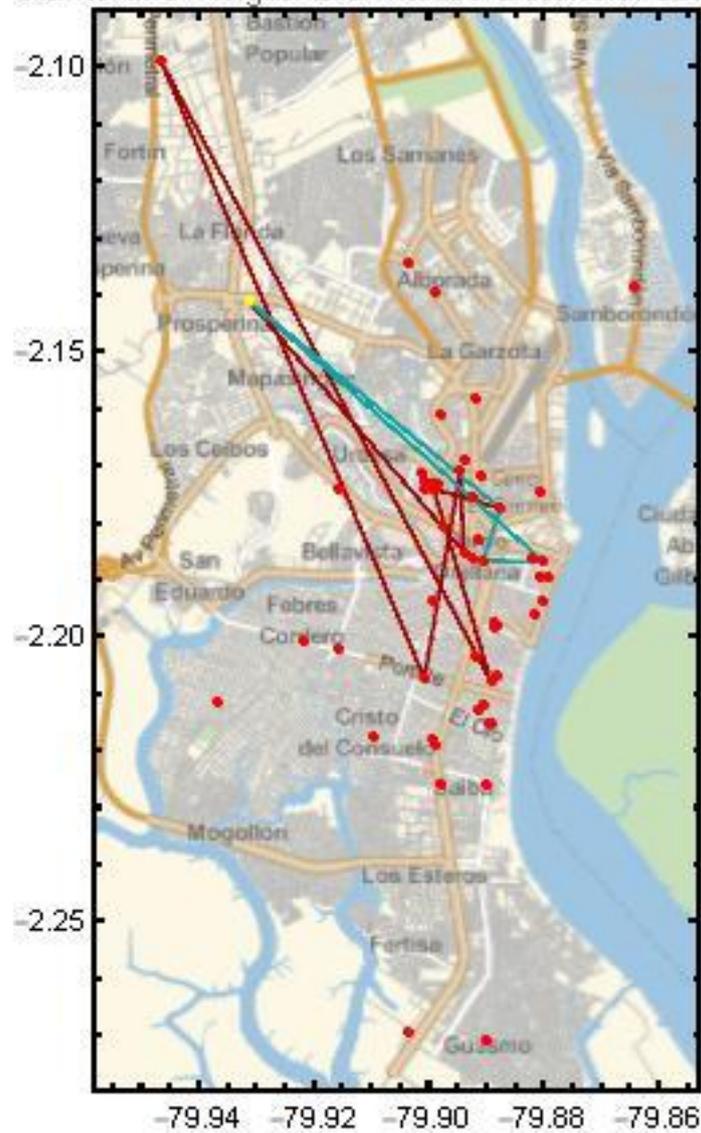


FIGURA 4 2 Resultados de Clarke and Wright día Martes

Fuente: Empresa de estudio

Clarke and Wright: Día Miércoles distancia: 58.6144

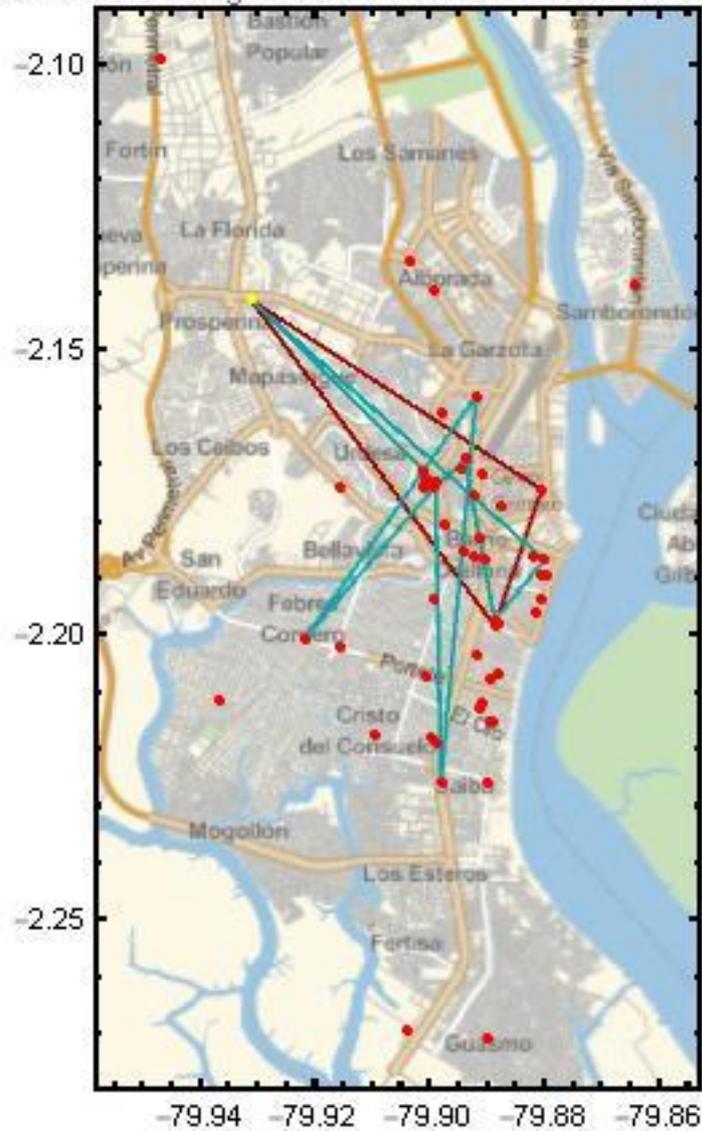


FIGURA 4 3 Resultados de Clarke and Wright día Miércoles

Fuente: Empresa de estudio

Clarke and Wright: Día Jueves distancia: 55.9377

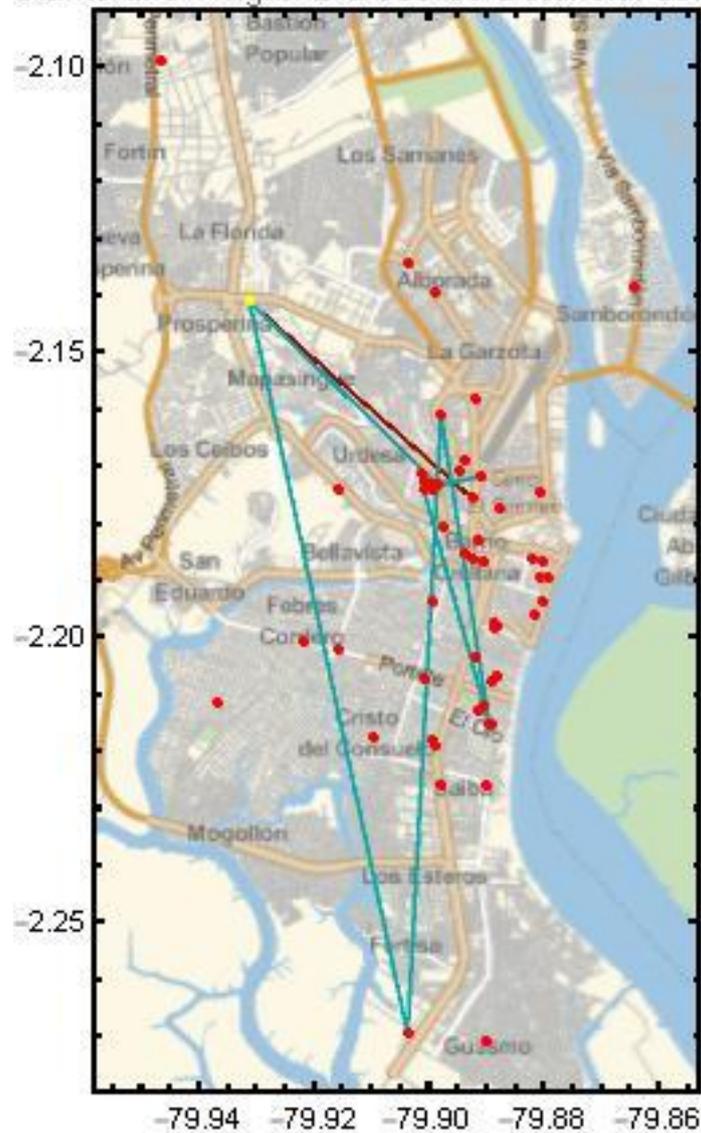


FIGURA 4 4 Resultados de Clarke and Wright día Jueves

Fuente: Empresa de estudio

Clarke and Wright: Día Viernes distancia: 49.0436

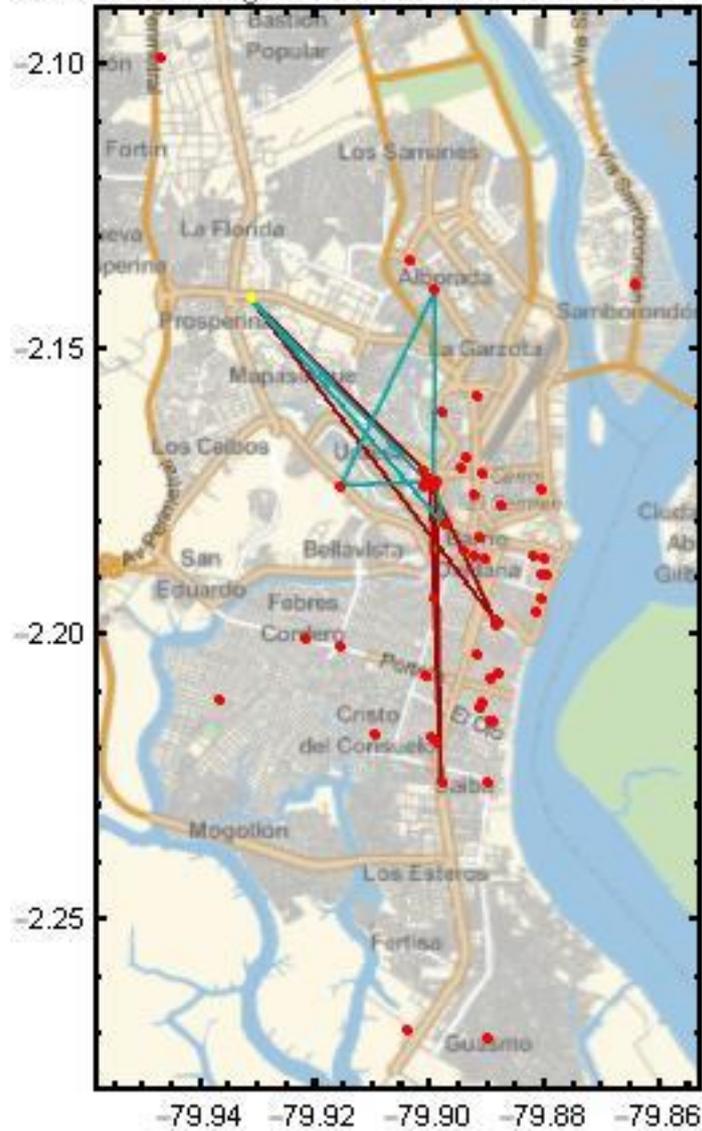


FIGURA 4 5 Resultados de Clarke and Wright día Viernes

Fuente: Empresa de estudio

En la tabla 6 se muestra la información generada por el modelo, y se pudo observar que por medio de la heurística de Clarke and Wright se generó buenos resultados en tiempos de ejecución, se evidencia en la columna “Rutas” los diferentes clientes que son atendidos y la distancia en Kilómetros que recorre el vehículo, así como se aprovechó la capacidad de utilización en peso y volumen de los vehículos, como lo muestra la tabla hay días en que las rutas se pueden llevar a cabo con un solo vehículo cumpliendo con las diferentes restricciones, siendo una de las restricciones más notables el tiempo de atención de los clientes donde las columnas “Tiempo inicial de la ruta” y “Tiempo final de la ruta” sirven para calcular el tiempo que le toma al vehículo realizar las entregas a los clientes y es donde se confirma que un vehículo cuando termina una ruta, puede continuar con la siguiente ruta el mismo día.

**TABLA 6 Rutas generadas por el modelo.**

*Fuente: Creado por el autor*

| Día       | Ruta Número | Ruta  | Distancia en Km | Demanda en Km | Demanda en M3 | Tiempo Inicial | Tiempo Final |
|-----------|-------------|---|-----------------|---------------|---------------|----------------|--------------|
| Lunes     | 1           | {73, 4, 19, 12, 15, 13, 14, 30, 28, 29, 73} | 45,58           | 293           | 1,221         | 8:00           | 11:30        |
| Martes    | 1           | {73, 16, 57, 55, 56, 51, 52, 32, 73}        | 50,25           | 233           | 1,453         | 9:30           | 12:44        |
| Martes    | 2           | {73, 53, 54, 33, 73}                        | 16,15           | 100           | 1,047         | 14:30          | 15:36        |
| Miércoles | 1           | {73, 1, 4, 73}                              | 17,45           | 65            | 0,326         | 8:30           | 9:24         |
| Miércoles | 2           | {73, 6, 61, 34, 3, 2, 64, 63, 5, 73}        | 41,17           | 262           | 0,885         | 12:30          | 15:28        |
| Jueves    | 1           | {73, 9, 73}                                 | 11,53           | 29            | 0,644         | 7:30           | 8:21         |
| Jueves    | 2           | {73, 65, 40, 39, 41, 37, 38, 42, 73}        | 44,41           | 224           | 1,391         | 9:00           | 11:53        |
| Viernes   | 1           | {73, 58, 63, 60, 61, 73}                    | 27,45           | 137           | 0,247         | 9:00           | 11:05        |
| Viernes   | 2           | {73, 36, 59, 62, 35, 3, 73}                 | 21,59           | 164           | 1,000         | 9:30           | 11:14        |
|           |             | <b>TOTAL</b>                                |                 | <b>1507</b>   | <b>8,216</b>  |                |              |

Con respecto a las rutas que se generaron en un día, existen muchos clientes que se encuentran relativamente cerca, lo que resulta en que un vehículo solo atienda un solo punto, o también el caso en el que un cliente se encuentra aislado del resto de los clientes por estar geográficamente distante, en este caso se requeriría un sistema de manejo de clientes por día, que realice recorridos en puntos cercanos y así poder eliminar estos clientes aislados.

## 4.2. COMPARACIÓN CON LA SITUACION ACTUAL

Se realizó la comparación de los costos entre las rutas que se realizaban de manera empírica y las rutas que generó el programa matemático, esos datos se pueden observar en el anexo 5 donde se muestran las filas sombreadas con amarillo que es la información que generó el modelo y las filas sombreadas con celeste que es la información que se llevaba de forma empírica y se observó que una de las diferencias más notables es que el modelo generó la ruta con la utilización de un solo vehículo por día mientras que la ruta empírica se realizaba con 2 vehículos despachando en un vehículo los clientes del sector norte y en otro vehículo los clientes del sector sur de la ciudad .

En resumen, los resultados que se dieron son los que se muestran en la tabla 7.

**TABLA 7** Comparación de costos y utilización de vehículos.

*Fuente: Creado por el autor.*

|                                       | <b>Actual</b> | <b>Óptimo</b> |
|---------------------------------------|---------------|---------------|
| Costo Semanal (L - V)                 | \$ 1,043.52   | \$ 634.85     |
| Distancia Semanal en Km               | 373           | 275           |
| Capacidad de utilización por vehículo | 45.4%         | 79.6%         |
| Número de vehículos utilizados        | 2             | 1             |
| Número de viajes por vehículo         | 1             | 2             |

En la figura 4 6 se muestran la distancia recorrida en kilómetros y los costos que se generan en los dos escenarios tanto en la propuesta como en el escenario actual, donde se evidencia una reducción de los costos de un 34% con las rutas generadas por el modelo matemático ya que en la semana solo utiliza un vehículo para realizar el despacho a los clientes.

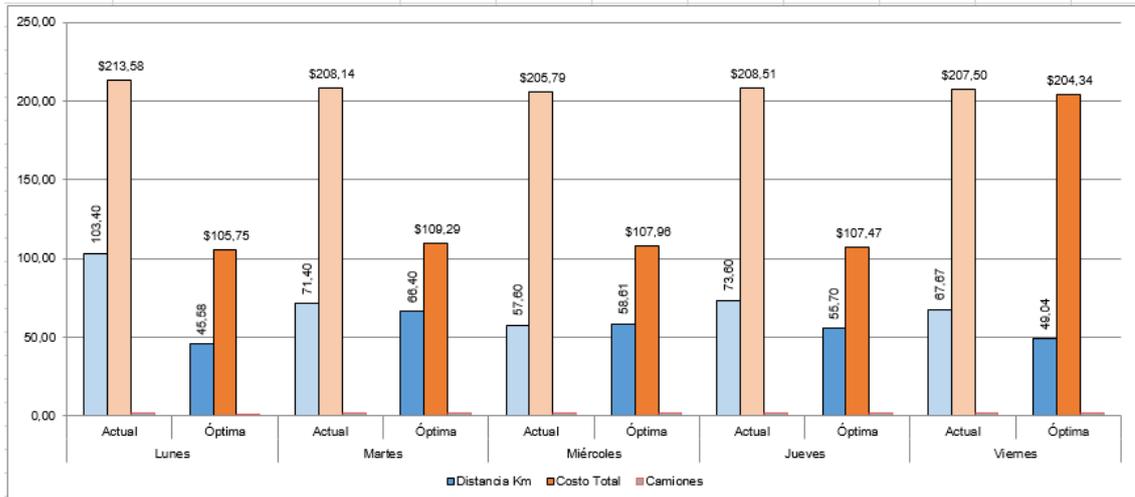


FIGURA 4 6Comparativo de costos y distancia recorrida

Fuente: Empresa de estudio

En la figura 4 7 se evidencia que el porcentaje de peso de la mercadería cargada y de utilización del espacio en los vehículos ha mejorado notablemente con los resultados obtenidos por la propuesta, frente al proceso de ruteo que se está ejecutando actualmente, obteniendo un incremento del 30% en la utilización de la flota y el espacio físico de los vehículos aumentando la capacidad de atención a futuros clientes.

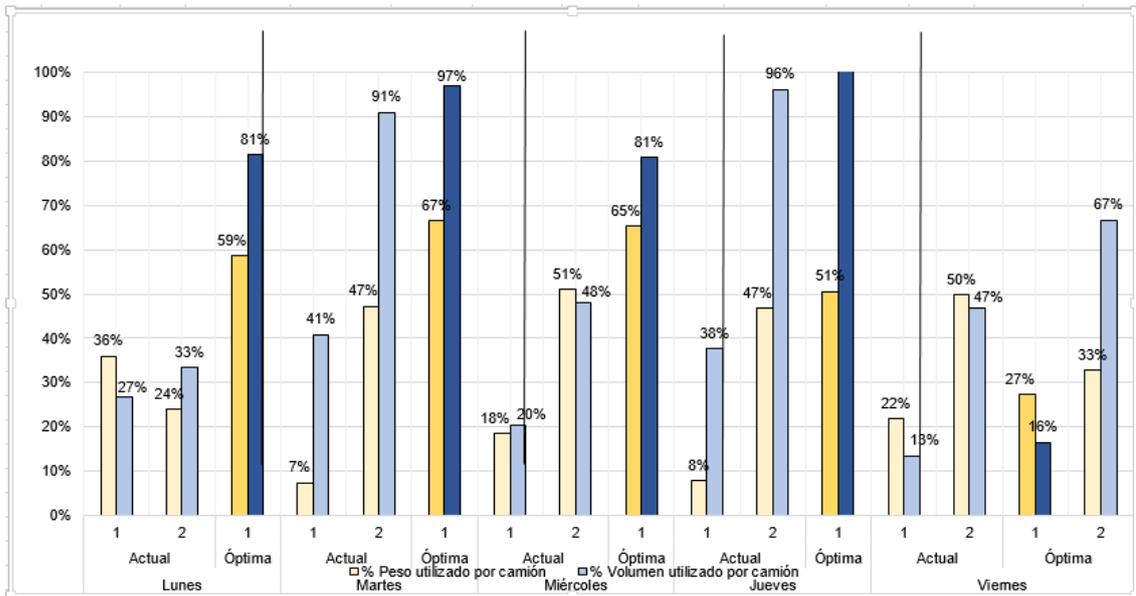


FIGURA 4 7 Comparativo de utilización en Peso y Volumen

Fuente: Empresa de estudio

## **CAPÍTULO 5**

### **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1. CONCLUSIONES.**

Se definió el problema considerando la forma actual en la que se están asignando los despachos, una forma manual y empírica que genera altos costos y demoras en las entregas, determinando que se necesita asignar rutas de acuerdo a los horarios de atención de los clientes.

Se contruyó el modelo mediante el VRPTW utilizando la programación matemática, por la complejidad matemática de este tipo de problemas se recurrió al uso del lenguaje de programación funcional conocido como Wolfram Mathematicas y el apoyo tecnológico de Google Maps con el que se pudo tomar las coordenadas de los clientes y con ello hacer el cálculo de las distancias con la finalidad de obtener resultados factibles y soluciones de calidad que otorgo el programa.

Se implemento el modelo evidenciando que producto de esta optimización por el uso de la heurística los costos de transporte disminuyeron un 45%, la utilización de los vehículos aumento del 45% al 79% y se redujo notablemente el 5 % de las entregas no realizadas, obtiene un ahorro no solo económico sino de recursos propios de la operación que permitirán satisfacer las necesidades de los clientes mejorando la calidad en el servicio.

## **5.2. RECOMENDACIONES.**

Muchas empresas en el país se manejan de forma empírica, pero con este proyecto se demuestra que se pueden obtener mejores resultados cuando se aplican las herramientas adecuadas para dar solución a los problemas de transporte.

Como se había indicado anteriormente se debería organizar la gestión de los pedidos de los clientes, para que los clientes sean agrupados por días o sean agrupados por sectores, para que la generación de las rutas se optimice debido a que el algoritmo no puede identificarlo de esta manera.

Para mejorar los resultados obtenidos se recomienda realizar una meta heurística para optimizar las rutas y disminuir los costos

## Bibliografía

Ballou, R. H. (2004). *Logística Administración de la cadena de Suministros*. Mexico: Pearson Educacion.

Bermeo Muñoz, E., & Calderon Sotero, J. (2009). Diseño de un Modelo de optimización de rutas de transporte. *Red de revista científica de America Latina y el Caribe, España Portugal*.

Bodin, L., Golden, B. A., & Ball, M. (1983). *Routing and Scheduling*. Computers and Operations Research.

Cruz, E., Restrepo, J., & Medina, P. (2007). A logistic Problem of Vehicle Routing Solved with Excel Solver . *Scientia et Technica*, 369.

Daza, J., Montoya, J., & Narducci, F. (2009). Resolución del problema de enrutamiento de Vehículos con limitaciones de capacidad utilizando un procedimiento Metaheurístico de dos fases. *Revista EIA Escuela de Ingeniería de Antioquia*.

Herazo, N. (28 de 03 de 2012). *Modelación Matemática del problema de ruteo de vehículo con restricciones de múltiples depositos, flota heterogénea de vehículos y ventanas de tiempo*. Obtenido de : <http://repositorio.cuc.edu.co/xmlui/bitstream/handle/11323/90/1129495709.pdf?sequence=1>

Olivera, A. (2004). Heurística para problemas de ruteo de vehículos. Montevideo, Uruguay. Obtenido de <http://www.fing.edu.uy/inco/pedeciba/bibliote/reptec/TR0408.pdf>.

Parra, W., & Cardenas, R. (18 de 05 de 2018). Estudio de la Métrica de Manhattan. Segmentos, rectas, rayos, Circunferencias en la Geometría del Taxista. Bogota, Colombia. Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/Geometr%C3%ADa\\_del\\_taxista](https://es.wikipedia.org/wiki/Geometr%C3%ADa_del_taxista)

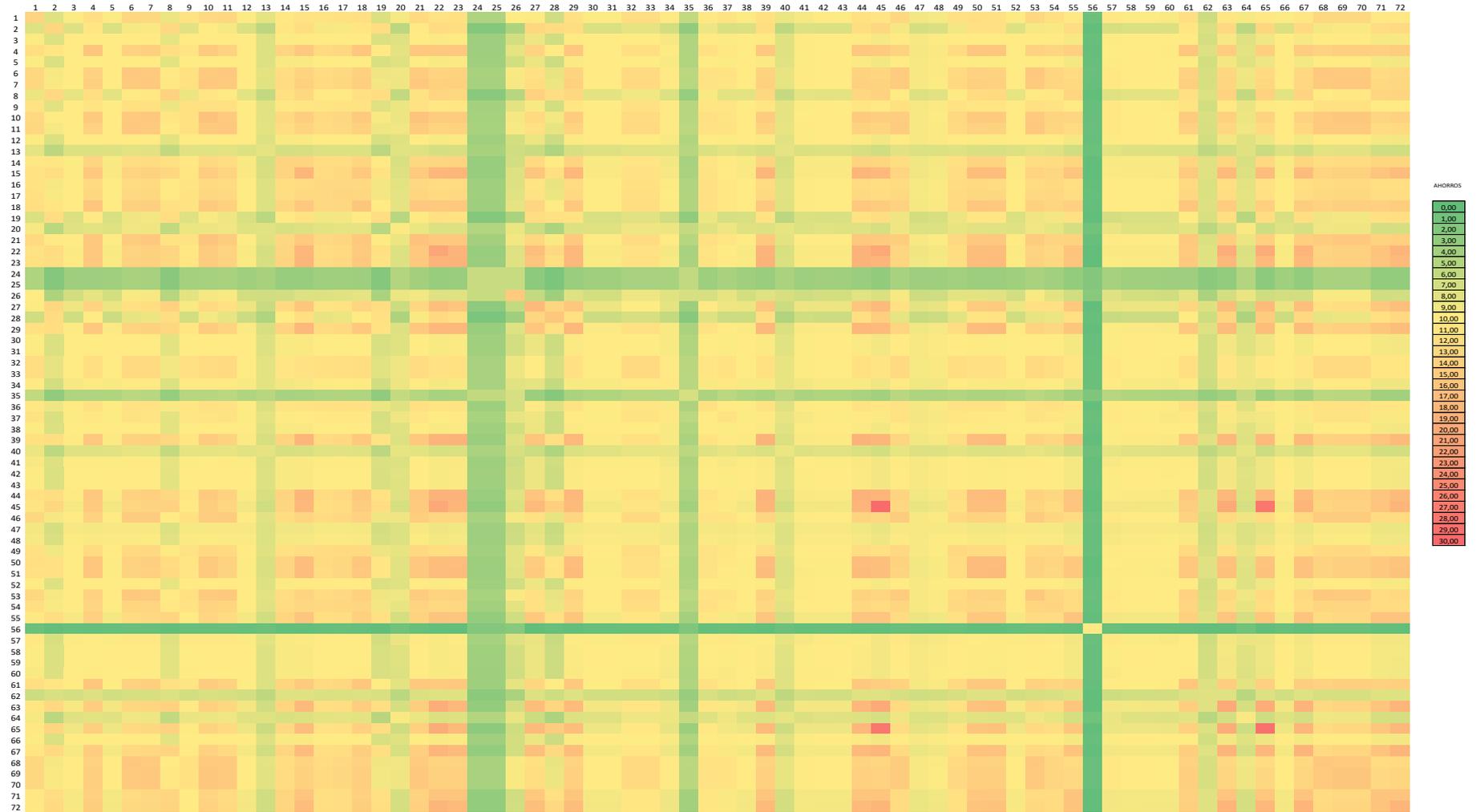
Tantikorn, P., & Ruengsak, K. (2012). An improved Clarke and Wright savings algorithm for the capacited vehicle routing problem. *ScienceAsia*, 12.

Toth, P., & Daniele, V. (2002). *The Vehicle routing Problem*. SIAM Society for Industrial and Applied Mathematics. .

## Anexo 1 Matriz de Distancia en Kilómetros



## Anexo 2 Matriz de Ahorro en Kilómetros



## Anexo 3 Órdenes de venta puestas durante una semana.

| Día       | Ciente   | Producto  | Cantidad | Peso | Volumen M3/caja | volumen total | Tiempo de Atencion |
|-----------|--|---|----------|------|-----------------|---------------|--------------------|
| Lunes     | CEDILLO CALDERON HOLGER LUIS                         | PELICULA 14X17" DRYSTAR 5300                      | 12       | 34   | 0,027133        | 0,325593      | 27                 |
| Lunes     | CEDILLO CALDERON HOLGER LUIS                         | OPTIRAY 350, 125ML SYR                            | 3        | 39   | 0,026936        | 0,080808      | 18                 |
| Lunes     | DISPENSARIO MEDICO NUESTRA SEÑORA DE LA CARIDAD DEL  | E-Z HD SULFATO DE BARIO VASO + E-Z GAS            | 2        | 36   | 0,032508        | 0,065016      | 29                 |
| Lunes     | CLINICA ANTONIO GIL GILBERT COMPAÑIA LIMITADA        | POLIBAR C/B SULFATO DE BARIO PARA ENEMA           | 7        | 40   | 0,018368        | 0,128576      | 15                 |
| Lunes     | MEDILINK S.A.  | PELICULA 8X10 DRYSTAR 5300                        | 5        | 26   | 0,010003        | 0,050013      | 28                 |
| Lunes     | IDIAG CEIMM  | PELICULA 10X12" DRYSTAR                           | 8        | 28   | 0,009737        | 0,077892      | 28                 |
| Lunes     | AYON HO JORGE ROBERTO                                | OPTIRAY 320, 20ML VI                              | 5        | 34   | 0,008384        | 0,041918      | 15                 |
| Lunes     | VELOZ GUZMAN MARIO ALBERTO                           | OPTIRAY 320, 100ML SYR                            | 2        | 37   | 0,026759        | 0,053518      | 19                 |
| Lunes     | SANCHEZ VILLALTA LUIS SEGUNDO                        | OPTIRAY 350, 125ML SYR                            | 7        | 34   | 0,026936        | 0,188552      | 10                 |
| Lunes     | CALERO ZEA GALO FERNANDO                             | CONNECTOR TUBING BX 50                            | 9        | 29   | 0,023276        | 0,209484      | 16                 |
| Martes    | RENDON SOLORZANO MARIO ARTURO                        | JERINGA OPTIVANTAGE FRONT-LOADING HANDI-FILL DE   | 3        | 29   | 0,076479        | 0,229437      | 22                 |
| Martes    | MACROSALUD S.A.                                      | DOS JERINGAS VACIAS 60ML PARA INYECTOR OPTISTAF   | 8        | 29   | 0,023276        | 0,186208      | 26                 |
| Martes    | VIDASSAN S.A.  | PELICULA 30X40 LUZ VERDE AGFA 100 HOJAS           | 7        | 30   | 0,023713        | 0,165991      | 22                 |
| Martes    | CLINICA SANTAMARIA CLISANTA S.A.                     | PELICULA 14X14 LUZ VERDE AGFA 100 HOJAS           | 3        | 36   | 0,025291        | 0,075874      | 30                 |
| Martes    | MEDIGLOBAL S.A.                                      | OPTIRAY 350, 125ML SYR                            | 9        | 35   | 0,026936        | 0,242424      | 28                 |
| Martes    | DELITAC S.A.   | CONNECTOR TUBING BX 50                            | 5        | 36   | 0,023276        | 0,116380      | 16                 |
| Martes    | EQUIMEDA S.A.  | JERINGA OPTIVANTAGE FRONT-LOADING HANDI-FILL DE   | 10       | 34   | 0,076479        | 0,764790      | 27                 |
| Martes    | VICARIA EPISCOPAL DE PASTORAL SOCIAL                 | POLIBAR S/B SULFATO DE BARIO PARA ENEMA E-Z EM    | 12       | 38   | 0,032508        | 0,390096      | 30                 |
| Martes    | HOSPITAL UNIVERSITARIO DE GUAYAQUIL                  | E-Z HD SULFATO DE BARIO VASO + E-Z GAS            | 9        | 39   | 0,032508        | 0,292572      | 25                 |
| Martes    | CLINICA POLTZER S.A.                                 | POLIBAR C/B SULFATO DE BARIO PARA ENEMA           | 2        | 27   | 0,018368        | 0,036736      | 27                 |
| Miércoles | CHAGERBEN MACHUCA BETHZABE CLEMENCIA                 | CINTA IMPRESIÓN V-PRO/CENTURY, CAJA DE 2 UNIDADES | 6        | 30   | 0,018876        | 0,113256      | 20                 |
| Miércoles | SANTIBASA S.A.                                       | VAPROX ESTERILIZANTE (cartucho x 3 unidades)      | 8        | 34   | 0,005797        | 0,046376      | 28                 |
| Miércoles | ASTROS SERVICIOS DE SALUD S.A. ASTROMED              | VERIFY SIXCESS 270F 4 MINUTE INDICATOR SHORT (1 f | 12       | 26   | 0,011934        | 0,143208      | 15                 |
| Miércoles | CENTRO DE SERVICIOS MEDICOS SAN FRANCISCO CEMEFRAN   | PELICULA 30X40 LUZ VERDE AGFA 100 HOJAS           | 10       | 40   | 0,023713        | 0,237130      | 28                 |
| Miércoles | SOCIEDAD DE LUCHA CONTRA EL CANCER DEL ECUADOR       | PELICULA 14X14 LUZ VERDE AGFA 100 HOJAS           | 11       | 33   | 0,025291        | 0,278203      | 25                 |
| Miércoles | DENTAIMAGEN S.A.                                     | OPTIRAY 320, 20ML VI                              | 5        | 27   | 0,008384        | 0,041918      | 22                 |
| Miércoles | SERVICIOS MEDICOS DRLAM C. LTDA.                     | PELICULA 14X17" DRYSTAR 5300                      | 3        | 29   | 0,027133        | 0,081398      | 16                 |
| Miércoles | CLINICA ANTONIO GIL GILBERT COMPAÑIA LIMITADA        | PELICULA 18X24 HDRC PLUS                          | 5        | 32   | 0,009644        | 0,048220      | 28                 |
| Miércoles | PREDIAL EDCLASA S.A.                                 | PELICULA 8X10 MAMOGRAFIA DRYSTAR                  | 2        | 38   | 0,009694        | 0,019388      | 26                 |
| Miércoles | CINEANGIO SERVICIOS MEDICOS S.A.                     | PELICULA 14X14 LUZ VERDE AGFA 100 HOJAS           | 8        | 38   | 0,025291        | 0,202330      | 18                 |
| Jueves    | HOSPITAL NAVAL GUAYAQUIL                             | OPTIRAY 320, 20ML VI                              | 11       | 30   | 0,008384        | 0,092219      | 26                 |
| Jueves    | HOSPITAL DE LA POLICIA NACIONAL GUAYAQUIL #2         | OPTIRAY 320, 100ML SYR                            | 12       | 29   | 0,026759        | 0,321108      | 23                 |
| Jueves    | HOSPITAL DE LA POLICIA NACIONAL GUAYAQUIL #2         | OPTIRAY 320, 75ML SYR                             | 12       | 34   | 0,026936        | 0,323232      | 27                 |
| Jueves    | INTERRAYOS S.A.                                      | E-Z CAT SULFATO DE BARIO PARA TOMOGRAFIA E-Z EM   | 4        | 32   | 0,023520        | 0,094080      | 20                 |
| Jueves    | ANGIOTEC S.A.  | E-Z HD SULFATO DE BARIO VASO                      | 6        | 30   | 0,018368        | 0,110208      | 15                 |
| Jueves    | ANGIOTEC S.A.  | POLIBAR S/B SULFATO DE BARIO PARA ENEMA E-Z EM    | 12       | 35   | 0,032508        | 0,390096      | 22                 |
| Jueves    | SERVICIOS DENTALES SERVIDENT S.A.                    | E-Z HD SULFATO DE BARIO VASO + E-Z GAS            | 11       | 27   | 0,032508        | 0,357588      | 23                 |
| Jueves    | CENTRO DE INVESTIGACIONES, TERAPIAS Y DIAGNOSTICO    | POLIBAR C/B SULFATO DE BARIO PARA ENEMA           | 6        | 39   | 0,018368        | 0,110208      | 15                 |
| Jueves    | INSTITUTO NACIONAL DE CARDIOLOGIA ALFREDO PALACIO IN | ROLLO PAPEL TYVEK 50cm x 70m                      | 3        | 34   | 0,046200        | 0,138600      | 29                 |
| Jueves    | PEREZ OBREGON TOMAS ENRIQUE Y OTROS                  | ROLLO PAPEL TYVEK 7,5cm x 70m                     | 4        | 32   | 0,024480        | 0,097920      | 17                 |
| Viernes   | SERVICIOS MEDICOS DRLAM C. LTDA.                     | PAPEL PARA IMPRESORA V-PRO, CAJA DE 3 ROLLOS      | 12       | 31   | 0,040320        | 0,483840      | 19                 |
| Viernes   | MEDIAK   | PAPEL TERMICO P/IMP. EAGLE 3000/SYNERGY (CJ.5UND. | 10       | 32   | 0,007800        | 0,078000      | 22                 |
| Viernes   | REMAKEN, RESONANCIA MAGNETICA KENNEDY S.A.           | CINTA INDICADORA, CAJA DE 6 ROLLOS VERIFY VH202   | 10       | 37   | 0,003840        | 0,038400      | 29                 |
| Viernes   | CHAGERBEN MACHUCA BETHZABE CLEMENCIA                 | VERIFY SELF-CONTAINED DUAL SPECIES BI, 2 CAJAS 50 | 6        | 29   | 0,008192        | 0,049152      | 24                 |
| Viernes   | ROSEMEDEC S.A.                                       | VERIFY STEAM TEST PACK, CAJA 20 TESTS Y 20 CONTR  | 12       | 26   | 0,007452        | 0,089424      | 22                 |
| Viernes   | SANTIBASA S.A.                                       | VERIFY VIAL ACTIVATOR SET                         | 7        | 33   | 0,001080        | 0,007560      | 29                 |
| Viernes   | INDUSTRIAL INMOBILIARIA TEOTON S.A.                  | INCUBADORA 28 WELL                                | 4        | 38   | 0,002720        | 0,010880      | 16                 |
| Viernes   | INDUSTRIAL INMOBILIARIA TEOTON S.A.                  | E-Z CAT SULFATO DE BARIO PARA TOMOGRAFIA E-Z EM   | 6        | 32   | 0,023520        | 0,141120      | 24                 |
| Viernes   | FUND.DE ASISTENCIA SOCIAL ENLACE ALBORADA FUNDASEN   | E-Z HD SULFATO DE BARIO VASO                      | 9        | 39   | 0,018368        | 0,165312      | 15                 |
| Viernes   | UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL                             | PELICULA 8X10 MAMOGRAFIA AGFA 100 HOJAS           | 10       | 36   | 0,018368        | 0,183680      | 24                 |

## Anexo 4 Código del modelo en WolframMathematica

Clarke-semana1.nb - Wolfram Mathematica 11.3 Student Edition - uso personal solamente

Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda

WOLFRAM MATHEMATICA EDICIÓN PARA ESTUDIANTES

Demostraciones | MathWorld | C

+

**(\*Parte de carga de datos\*)**

```
In[ ]:= data = Import[NotebookDirectory[] <> "\\Base de Clientes.xlsx"];  
|importa |directorio de cuaderno
```

```
clientes = data[[1, 2 ;;, {1, 3}]];
```

```
clientes = Table[Prepend[clientes[[c]], c], {c, Length[clientes]}];  
|tabla |añade al principio |longitud
```

```
clientes[[All, 3]] = Table[ToExpression[StringSplit[clientes[[c, 3]], ","], {c, Length[clientes]}];  
|todo |tabla |convierte en ex... |subdivide cadenas de caracteres |longitud
```

```
numeroClientes = Length[clientes];  
|longitud
```

```
capacidadEnPeso = 500;
```

```
capacidadEnVolumen = 1.5;
```

```
velocidadPromedio = 7;
```

```
ventanas = data[[2, 2 ;;]];
```

```
ventanas[[All, 3 ;; 4]] = Round[Table[{Total[{60, 1, 1/60} * ventanas[[i, 3, 1, 4 ;;]]], Total[{60, 1, 1/60} * ventanas[[i, 4, 1, 4 ;;]]]}, {i, Length[ventanas]}];  
|todo |enter... |tabla |total |total |longitud
```

```
ventanas = SplitBy[ventanas, #[[1]] &];  
|subdivide por
```

```
ventanas =
```

```
Table[
```

```
|tabla
```

```
{ventanas[[i, 1, 1]],
```

```
Interval @@ Table[Switch[ventanas[[i, j, 2]], "Lunes", 0, "Martes", 1, "Miércoles", 2, "Jueves", 3, "Viernes", 4, "Sabado", 5, "Domingo", 6] * (24 * 60) +  
|intervalo |tabla |evalúa dependiendo de
```

```
{ventanas[[i, j, 3]], ventanas[[i, j, 4]]}, {j, Length[ventanas[[i]]]}], {i, Length[ventanas]}];  
|longitud |longitud
```

```
ventanas[[All, 1]] = Table[SelectFirst[clientes, (#[[2]] == ventanas[[p, 1]]) &][[1]], {p, Length[ventanas]}];  
|todo |tabla |selecciona el primero |longitud
```

```

pedido = data[[4, 2 ;;]];
pedido[[All, 2]] = Table[SelectFirst[clientes, (#[[2]] == pedido[[p, 2]]) &][[1]], {p, Length[pedido]}];
pedido = SplitBy[pedido, #[[1]] &];

Do[
  pedidoAux = {};
  elements = DeleteDuplicates[pedido[[i, All, 2]]];

  Do[
    aux = Select[pedido[[i]], (#[[2]] == elements[[j]]) &];

    aux = Join[aux[[1, ;; -4]], {Total[aux[[All, -3]]], Total[aux[[All, -2]]], Total[aux[[All, -1]]]}];

    AppendTo[pedidoAux, aux];

    , {j, Length[elements]};

  pedido[[i]] = pedidoAux;
  , {i, Length[pedido]};

matrizDistancias = Table[UnitConvert[GeoDistance[clientes[[c1, 3]], clientes[[c2, 3]]], "Kilometers"][[1]], {c1, Length[clientes]}, {c2, Length[clientes]};

matrizAhorros =
SortBy[Flatten[Table[{c1, c2, matrizDistancias[[Length[clientes], c1]] + matrizDistancias[[Length[clientes], c2]] - matrizDistancias[[c1, c2]]],
  {c1, Length[clientes] - 1}, {c2, c1 + 1, Length[clientes] - 1}, 1], #[[3]] &][[All, 1 ;; 2]];

```

## (\*Funciones del programa\*)

```
MostrarMapa[conjuntoRutas_, coordenadas_, titulo_] :=  
Show @@  
  {muestra  
  Flatten[  
    {Table[GeoGraphics[{Darker[Hue[1/i]], Thickness[0.007], GeoPath[Table[GeoPosition[coordenadas[[conjuntoRutas[[i, j]]]], {j, Length[conjuntoRutas[[i]]}], "Geodesic"}],  
      {tabla | mapa geográfico | más os... | tonalidad | grosor | trayecto... | tabla | posición geográfica | longitud  
      Frame → True, FrameStyle → Directive[Black, Thick]], {i, Length[conjuntoRutas]}],  
      {marco | verd... | estilo de marco | directiva | negro | grueso | longitud  
      GeoGraphics[{Red, Table[Point[GeoPosition[coordenadas[[i]]]], {i, Length[coordenadas]}], Frame → True, FrameStyle → Directive[Black, Thick], PlotLabel → titulo},  
      {mapa geográfico | rojo | tabla | punto | posición geográfica | longitud | marco | verd... | estilo de marco | directiva | negro | grueso | etiqueta de representación  
      GeoGraphics[{Yellow, Point[GeoPosition[coordenadas[[Length[coordenadas]]]]}], Frame → True, FrameStyle → Directive[Black, Thick]}]}]  
  {mapa geográfico | amarillo | punto | posición geográfica | longitud | marco | verd... | estilo de marco | directiva | negro | grueso
```

## (\*Calculo del tiempo en una ruta\*)

```
CalculoTiempo[ruta_, orden_, dia_] := Module[{tiempoTraslado, ventanaCliente, tiempo = 0, tiempoInicial, tAtencion},  
  {módulo  
  Do[  
    {repite  
    tiempoTraslado = matrizDistancias[ruta[[c - 1]], ruta[[c]]] / velocidadPromedio;  
    ventanaCliente = SelectFirst[ventanas, (#[[1]] == ruta[[c]]) &][[2]];  
    {selecciona el primero  
    tAtencion = SelectFirst[orden, (#[[2]] == ruta[[c]]) &][[8]];  
    {selecciona el primero  
    If[tiempo == 0, tiempoInicial = tiempo = IntervalIntersection[ventanaCliente, Interval[{dia, ∞}]]][[1, 1]];  
    {si | intersección de intervalos | intervalo  
    tiempo += tiempoTraslado + tAtencion  
    , {c, 2, Length[ruta] - 1}}];  
    {longitud  
  Return[ToString[IntegerPart[#/60]] <> ":" <> If[(Mod[# , 60] < 10), "0" <> ToString[Mod[# , 60]], ToString[Mod[# , 60]]] & /@ Round[{tiempoInicial, tiempo}]]  
  {retorna | convierte... | parte entera | si | operación módulo | convierte... | operación mód... | convierte... | operación módulo | entero más próximo
```

### (\*Factibilidad de la ruta\*)

```
VerificacionDeRuta[ruta_, orden_, dia_] :=  
Module[{diaNum, ventanaCliente, cargaEnPeso = 0, cargaEnVolumen = 0, tiempo = 0, tInicio, tFin, peso, volumen, tAtencion, sol = True, tiempoTraslado},  
|módulo |verdadero  
diaNum = Switch[dia, "Lunes", 0, "Martes", 1, "Miércoles", 2, "Jueves", 3, "Viernes", 4, "Sabado", 5, "Domingo", 6] * (24 * 60);  
|evalúa dependiendo de  
Do[  
|repite  
{peso, volumen, tAtencion} = SelectFirst[orden, (#[[2]] == ruta[[c]]) &][[5, 7, 8]];  
|selecciona el primero  
tiempoTraslado = matrizDistancias[[ruta[[c - 1]], ruta[[c]]] / velocidadPromedio;  
ventanaCliente = SelectFirst[ventanas, (#[[1]] == ruta[[c]]) &][[2]];  
|selecciona el primero  
If[tiempo == 0, tiempo = IntervalIntersection[ventanaCliente, Interval[{diaNum, ∞}][[1, 1]]];  
|si |intersección de intervalos |intervalo  
If[((cargaEnPeso + peso) ≤ (capacidadEnPeso)) ∧ ((cargaEnVolumen + volumen) ≤ (capacidadEnVolumen)) ∧  
|si  
(IntervalMemberQ[ventanaCliente, Interval[{tiempo + tiempoTraslado, tiempo + tiempoTraslado + tAtencion}]]),  
|¿ contenido en intervalo? |intervalo  
cargaEnPeso += peso;  
cargaEnVolumen += volumen;  
tiempo += tiempoTraslado + tAtencion,  
sol = False;  
|falso  
Break[]];  
|finaliza iteración  
, {c, 2, Length[ruta] - 1}];  
|longitud  
Return[sol]  
|retorna
```

### (\*Parte del algoritmo clarke and wright\*)

```

ruteoSemanal = {};
Do[
|repite
Module[{conjuntoRutas, ruta, rutaNueva, matrizAhorrosDia, dia},
|módulo
(*Selección de la matriz de ahorro del día*)
matrizAhorrosDia = Select[matrizAhorros, MemberQ[orden[[All, 2]], #[[1]]] ^ MemberQ[orden[[All, 2]], #[[2]]] &];
|selecciona |¿contenido en? |todo |¿contenido en? |todo
(*Generación de las rutas*)
conjuntoRutas = Table[{numeroClientes, i, numeroClientes}, {i, orden[[All, 2]]}];
|tabla |todo
(*Nombre del día*)
dia = orden[[1, 1]];

(*Buscar las rutas de los dos clientes en el ruta actual (cliente)*)
Do[ruta = Table[SelectFirst[conjuntoRutas, MemberQ[#, c] &], {c, cliente}];
|repite |tabla |selecciona el primero |¿contenido en?
(*Si es la misma ruta ir al siguiente*)
If[ruta[[1]] == ruta[[2]], ruta = {{}, {}}];
|si
(*Ajustar las rutas de tal manera que se puedan unir los clientes (cliente[[1]] y cliente[[2]])*)
ruta[[1]] = Which[FirstPosition[ruta[[1]], cliente[[1]][[1]] == 2, Reverse[ruta[[1]]], FirstPosition[ruta[[1]], cliente[[1]][[1]] == Length[ruta[[1]]] - 1, ruta[[1]], True, Continue[]];
|cuál |primera posición |invierte orden |primera posición |longitud |verd... |continúa iteración
ruta[[2]] = Which[FirstPosition[ruta[[2]], cliente[[2]][[1]] == 2, ruta[[2]], FirstPosition[ruta[[2]], cliente[[2]][[1]] == Length[ruta[[2]]] - 1, Reverse[ruta[[2]]], True, Continue[]];
|cuál |primera posición |primera posición |longitud |invierte orden |verd... |continúa iteración
(*Combinar las rutas de ambos clientes*)
rutaNueva = Join[ruta[[1, ;; -2]], ruta[[2, 2 ;;]]];
|junta
(*Verificar la ruta si cumple con los pesos, volumen y tiempo*)
If[VerificacionDeRuta[rutaNueva, orden, dia],
|si
AppendTo[conjuntoRutas, rutaNueva];
|añade al final
(*Borrar las rutas viejas*)
conjuntoRutas = DeleteCases[conjuntoRutas, Alternatives@@ Join[ruta, Reverse[#] & /@ ruta]];
|elimina casos |alternativas |junta |invierte orden

```

## (\*Prints del resultado\*)

```
Print["Distancia por Clarke and Wright: ", Sum[Total[CalculoDistancias /@ ruteoSemanal[[dia]], {dia, Length[pedido]}]];
Do[Print[MostrarMapa[ruteoSemanal[[dia]], clientes[[All, -1]], "Clarke and Wright: Día " <> pedido[[dia, 1, 1]] <> " distancia: " <> ToString[Total[CalculoDistancias /@ ruteoSemanal[[dia]]]],
{dia, Length[pedido]}]
```

## (\*Exportar el resultado a un excel\*)

```
excel1 = {{ "Dia", "Ruta Numero", "Ruta", "Distancia", "Peso en la Ruta", "Volumen en la Ruta", "Tiempo Inicial", "Tiempo Final" }};
excel1 =
Join[excel1,
  Flatten[
    Table[Join[{Switch[dia, 1, "Lunes", 2, "Martes", 3, "Miércoles", 4, "Jueves", 5, "Viernes", 6, "Sabado", 7, "Domingo"], ruta, ruteoSemanal[[dia, ruta]], CalculoDistancias[ruteoSemanal[[dia, ruta]]],
      Sum[SelectFirst[pedido[[dia]], #[[2]] == ruteoSemanal[[dia, ruta, k]] &][[5]], {k, 2, Length[ruteoSemanal[[dia, ruta]] - 1}],
      Sum[SelectFirst[pedido[[dia]], #[[2]] == ruteoSemanal[[dia, ruta, k]] &][[7]], {k, 2, Length[ruteoSemanal[[dia, ruta]] - 1}], CalculoTiempo[ruteoSemanal[[dia, ruta]], pedido[[dia], dia]],
    {dia, Length[pedido]}, {ruta, Length[ruteoSemanal[[dia]]}], 1]}],
  Table[matrizDistancias[[Length[clientes], c1]] + matrizDistancias[[Length[clientes], c2]] - matrizDistancias[[c1, c2]], {c1, Length[clientes] - 1}, {c2, Length[clientes] - 1}];
  Table[Join[{i}, tabla[[i]], {i, Length[tabla]}];
  Join[{Join[{" "}, Range[Length[tabla]]]}, tabla];
  Table[Join[{i}, matrizDistancias[[i]], {i, Length[matrizDistancias]}];
  Join[{Join[{" "}, Range[Length[tablad]]]}, tablad];
```

 Clarke-semana1.nb - Wolfram Mathematica 11.3 Student Edition - uso personal solamente

Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda

WOLFRAM MATHEMATICA | EDICIÓN PARA ESTUDIANTES

Demostración

## (\*Funcion de guardar\*)

```
Export[NotebookDirectory[] <> "ResultadoSemana1.xlsx",
```

```
  |exporta |directorio de cuaderno
```

```
  {"Valores" → excel1, "Matriz de Ahorros" → tabla, "Matriz de distancias" → tablad}]
```

```
Out[*]= {{Dia, Ruta Numero, Ruta, Distancia, Peso en la Ruta, Volumen en la Ruta, Tiempo Inicial, Tiempo Final},
  {Lunes, 1, {73, 4, 19, 12, 15, 13, 14, 30, 28, 29, 73}, 45.5767, 293., 1.22137, 8:00, 11:26},
  {Martes, 1, {73, 16, 57, 55, 56, 51, 52, 32, 73}, 50.2477, 233., 1.45335, 9:30, 12:39},
  {Martes, 2, {73, 53, 54, 33, 73}, 16.1536, 100., 1.04716, 14:30, 15:35},
  {Miércoles, 1, {73, 1, 4, 73}, 17.4454, 65., 0.326424, 8:30, 9:23},
  {Miércoles, 2, {73, 6, 61, 34, 3, 2, 64, 63, 5, 73}, 41.169, 262., 0.885003, 12:30, 15:24},
  {Jueves, 1, {73, 9, 73}, 11.5278, 29., 0.64434, 7:30, 8:20},
  {Jueves, 2, {73, 65, 41, 40, 39, 38, 37, 42, 73}, 44.1688, 224., 1.39092, 9:00, 11:48},
  {Viernes, 1, {73, 61, 60, 63, 59, 36, 58, 62, 35, 3, 73}, 39.0951, 301., 1.24737, 9:00, 12:45}}
```

```
Out[*]= C:\Users\Ronald Gutierrez\Desktop\Codigo Clarke\ResultadoSemana1.xlsx
```

## Anexo 5 Comparación de Proceso Actual vs el Diseño de Rutas vehicular

| Día       | Ruta Numero | Ruta  | Distancia en Km | Peso de la carga en Kg | Volumen de la carga en M3 | Tiempo Inicial de la Ruta | Tiempo Final de la Ruta | CD     | Propuesta |
|-----------|-------------|---|-----------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|--------|-----------|
| Lunes     | 1           | {73, 4, 19, 12, 15, 13, 14, 30, 28, 29, 73} | 45,58           | 293                    | 1,22                      | 8:00                      | 11:26                   | 105,75 | Óptima    |
| Martes    | 1           | {73, 16, 57, 55, 56, 51, 52, 32, 73}        | 50,25           | 233                    | 1,45                      | 9:30                      | 12:39                   | 106,54 | Óptima    |
| Martes    | 2           | {73, 53, 54, 33, 73}                        | 16,15           | 100                    | 1,05                      | 14:30                     | 15:35                   | 2,75   | Óptima    |
| Miércoles | 1           | {73, 1, 4, 73}                              | 17,45           | 65                     | 0,33                      | 8:30                      | 9:23                    | 100,97 | Óptima    |
| Miércoles | 2           | {73, 6, 61, 34, 3, 2, 64, 63, 5, 73}        | 41,17           | 262                    | 0,89                      | 12:30                     | 15:24                   | 7,00   | Óptima    |
| Jueves    | 1           | {73, 9, 73}                                 | 11,53           | 29                     | 0,64                      | 7:30                      | 8:20                    | 99,96  | Óptima    |
| Jueves    | 2           | {73, 65, 40, 39, 41, 37, 38, 42, 73}        | 44,41           | 224                    | 1,39                      | 9:00                      | 11:48                   | 7,55   | Óptima    |
| Viernes   | 1           | {73, 58, 63, 60, 61, 73}                    | 27,45           | 137                    | 0,25                      | 9:00                      | 11:05                   | 102,67 | Óptima    |
| Viernes   | 2           | {73, 36, 59, 62, 35, 3, 73}                 | 21,59           | 164                    | 1,00                      | 9:30                      | 11:14                   | 101,67 | Óptima    |
| Lunes     | 1           | {73, 19, 28, 15, 29, 4, 14, 73}             | 33,90           | 180                    | 0,40                      | 7:30                      | 15:00                   | 103,76 | Actual    |
| Lunes     | 2           | {73, 13, 12, 30, 73}                        | 69,50           | 120                    | 0,50                      | 7:30                      | 14:00                   | 109,82 | Actual    |
| Martes    | 1           | {73, 56, 33, 32, 57, 52, 73}                | 41,80           | 37                     | 0,61                      | 7:30                      | 16:00                   | 105,11 | Actual    |
| Martes    | 2           | {73, 51, 55, 16, 53, 54, 73}                | 29,60           | 236                    | 1,36                      | 7:30                      | 15:00                   | 103,03 | Actual    |
| Miércoles | 2           | {73, 1, 34, 3, 5, 64, 73}                   | 26,95           | 92                     | 0,30                      | 7:30                      | 14:00                   | 102,58 | Actual    |
| Miércoles | 3           | {73, 6, 4, 61, 63, 2, 73}                   | 30,65           | 255                    | 0,72                      | 7:30                      | 15:00                   | 103,21 | Actual    |
| Jueves    | 1           | {73, 39, 65, 73}                            | 45,00           | 39                     | 0,56                      | 7:30                      | 14:00                   | 105,65 | Actual    |
| Jueves    | 2           | {73, 9, 41, 40, 38, 37, 42, 73}             | 28,60           | 234                    | 1,44                      | 7:30                      | 15:00                   | 102,86 | Actual    |
| Viernes   | 1           | {73, 61, 63, 73}                            | 27,70           | 109                    | 0,20                      | 7:30                      | 12:00                   | 102,71 | Actual    |
| Viernes   | 2           | {73, 36, 35, 60, 59, 62, 58, 373}           | 39,97           | 249                    | 0,70                      | 7:30                      | 14:00                   | 104,80 | Actual    |