



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**  
**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS**  
**DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICAS**

“Diseño de una heurística para la planificación de rutas con flota heterogénea basada en la metodología GRASP en una empresa de distribución de productos de consumo masivo”

**PROYECTO INTEGRADOR**

**Previo a la obtención del Título de:**  
**INGENIERA EN LOGÍSTICA Y TRANSPORTE**

**PRESENTADO POR:**

Cristina Emely Briones Fuentes

**GUAYAQUIL-ECUADOR**

**2016**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FACULTAD DE CIENCIAS  
NATURALES Y MATEMÁTICAS**

**INGENIERÍA EN LOGÍSTICA Y TRANSPORTE**

**INFORME DEL PROFESOR DE LA MATERIA INTEGRADORA**

Habiendo sido nombrado PROFESOR DE LA MATERIA INTEGRADORA de la  
señorita,

**CRISTINA EMELY  
BRIONES FUENTES**

Con el tema del proyecto integrador “Diseño de una heurística para la planificación de rutas con flota heterogénea basada en la metodología GRASP en una empresa de distribución de productos de consumo masivo”, previa a la obtención del título de INGENIERO EN LOGÍSTICA Y TRANSPORTE me permito informar que he leído el contenido y he revisado el formato del proyecto integrador, luego de lo cual indico que estoy de acuerdo en que el mismo se lo ha desarrollado conforme a los lineamientos de la Unidad de Titulación Especial de la ESPOL.

Guayaquil,

**GUILLERMO ALEJANDRO BAQUERIZO PALMA  
PROFESOR DE LA MATERIA INTEGRADORA**

## AGRADECIMIENTOS

A mi familia por su constante apoyo y tolerancia.

A mis profesores por brindar su ayuda en la realización de éste proyecto.

A mis amigos por ser parte de mi vida.

A Dios... por vivir.

## DEDICATORIA

Porque sé que hubieses querido ver mi progreso.

Porque sé que te hubiera gustado compartir todo este tiempo juntas.

Porque sé que hubieses estado feliz.

Y porque sé que me hubiese gustado que vivieras.

Te echo de menos Abuela.

## DECLARACIÓN EXPRESA.

“La responsabilidad del contenido de este proyecto de graduación, me corresponde exclusivamente y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

Reglamento de Graduación de la ESPOL.

---

*Cristina Emely Briones Fuentes*

## Índice

Índice de figuras .....	VIII
Índice de tablas .....	IX
Índice de gráficos .....	X
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	XII
ABREVIATURAS.....	XIII
RESUMEN .....	XV
ABSTRACT .....	XVI
Capítulo 1. Planteamiento del problema .....	17
<b>1.1 Situación actual del negocio</b> .....	17
<b>1.2 Problemática</b> .....	19
<b>1.3 Hipótesis</b> .....	28
<b>1.4 Justificación del problema</b> .....	28
<b>1.5 Objetivos</b> .....	29
Capítulo 2. Marco teórico. ....	30
<b>2.1 Estado del arte</b> .....	30
<b>2.2 Marco Teórico</b> .....	34
<b>2.2.1 El problema del ruteo vehicular</b> .....	34
<b>2.2.2 VRP con flota heterogénea</b> .....	37
<b>2.2.3 Métodos heurísticos y metaheurísticos</b> .....	42
<b>2.2.4 GRASP</b> .....	48
<b>2.2.5 Algoritmo de Ahorros</b> .....	49
Capítulo 3. Metodología de Trabajo .....	52
Capítulo 4. Modelización del proyecto.....	57
<b>4.1 Introducción</b> .....	57
<b>4.2 Desarrollo del algoritmo</b> .....	57

<b>4.3</b>	<b>Solución inicial</b> .....	60
<b>4.4</b>	<b>Lista de Candidatos Restringida y Búsqueda Local</b> .....	63
<b>4.5</b>	<b>Resolución del caso de estudio</b> .....	69
Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones .....		84
<b>5.1</b>	<b>Conclusiones</b> .....	84
<b>5.2</b>	<b>Recomendaciones</b> .....	86
Bibliografía .....		88
Anexo 1 Entrevista .....		90

## Índice de figuras

Figura 2.1 Modelos originarios del VRP- .....	35
Figura 2.2 Taxonomía VRP Heterogéneo- .....	38
Figura 2.3 Taxonomía según métodos de solución - .....	38
Figura 3.1 Flujograma de actividades.....	53
Figura 3.2 Diagrama de Gantt de cronograma de trabajo .....	54
Figura 3.3 Áreas Involucradas en el proceso de Planificación de Carga.....	55
Figura 4.1 Diagrama de flujo de ingreso de datos y cálculo de función de ahorros .....	58
Figura 4.2 Proceso de Generación de Rutas con Clarke & Wright. 61	
Figura 4.3 Diagrama de flujo de fase constructiva.....	64
Figura 4.4 Ejemplo de Intercambio 2-opt.....	66
Figura 4.5 Posible recolocación del elemento $i$ y entre $j$ y $j+1$ hacia adelante y atrás .....	67
Figura 4.6 Diagrama de flujo de fase de mejora.....	68
Figura 4.7 Densidad de Clientes en El Oro .....	70
Figura 4.8 Ruta inicial para el C&W.....	74
Figura 4.9 Ruta 1 en fase constructiva .....	75
Figura 4.10 Ruta 2 en fase constructiva .....	76
Figura 4.11 Ruta 1 en fase de mejora .....	78
Figura 4.12 Ruta 2 en fase de mejora .....	79
Figura 4.13 Instancia 2 en fase de mejora .....	83

## Índice de tablas

Tabla 1.1 Cantidad de clientes por ciudad o cantón de la región de atención. ....	18
Tabla 1.2 Cantidad de clientes región.....	19
Tabla 4.1 Información de capacidades de Vehículos (muestra) de la flota de la empresa de estudio .....	62
Tabla 4.2 Lote de planificación con información de clientes .....	69
Tabla 4.3 Información de clientes de El Oro. ....	71
Tabla 4.4 Calendario de Visitas a Clientes Propuesto .....	72
Tabla 4.5 Costos por ruta de El Oro y capacidad de carga asignada	73
Tabla 4.6 Resultados aplicados en fase constructiva .....	75
Tabla 4.7 Resultados aplicados en fase mejora Or-opt .....	77
Tabla 4.9 Lote de planificación 2 con información de clientes .....	82
Tabla 4.10 Resultado fase constructiva en segunda instancia .....	82
Tabla 4.11 Resultado fase de mejora en segunda instancia.....	82

## Índice de gráficos

Gráfico 1.1 Promedio de Capacidad Vehicular utilizada .....	20
Gráfico 1.2 Costo por kilo transportado Azuay hasta septiembre 2015.....	21
Gráfico 1.3 Costo por kilo transportado El Oro hasta septiembre 2015.....	22
Gráfico 1.4 Costo por kilo transportado Loja hasta septiembre 2015 .....	22
Gráfico 1.5 Costo por kilo transportado Los Ríos hasta septiembre 2015.....	23
Gráfico 1.6 Costo por kilo transportado Manabí hasta septiembre 2015.....	23
Gráfico 1.7 Costo por kilo transportado Santa Elena hasta septiembre 2015 .....	24
Gráfico 1.8 Costo por kilo transportado Guayas hasta septiembre 2015.....	24
Gráfico 1.9 Zonas con mayor impacto sobre el objetivo del costo de transporte por kilo hasta septiembre de 2015. ....	25
Gráfico 1.10 Densidad de clientes en zonas con GAP mayor o igual a la mediana. ....	26
Gráfico 1.11 Frecuencia de visitas de entrega por días laborables. ....	26
Gráfico 1.12 Capacidad de utilización del vehículo en toneladas y metros según objetivo. ....	27
Gráfico 4.1 Frecuencia de atención semanal a clientes de El Oro durante el primer semestre del 2015. ....	72
Gráfico 4.2 Resultado mejorado de capacidad vehicular sobre instancia.....	80

Gráfico 4.3 Resultado de costo por tonelada dentro del objetivo 80

## **GLOSARIO DE TÉRMINOS.**

HEURÍSTICA – Es un algoritmo que representa a una relajación de un problema exacto el cual puede dar soluciones factibles o cercanas al óptimo.

METAHEURÍSTICA – Es un algoritmo de mejora que utiliza los resultados de una heurística para según el tipo de método a usar, generar un mejor beneficio.

Ventanas de Tiempo – Es el rango de tiempo que los clientes disponen para la empresa, para poder realizar la entrega de la mercadería. Pueden ser duras o flexibles.

## **ABREVIATURAS.**

TSP – Travelling Salesman Problem: Problema del Agente Viajero

VRP – Vehicle Routing Problem: Problema de Ruteo Vehicular

CVRP – Capacited Vehicle Routing Problem: Problema de Ruteo Vehicular Capacitado

GRASP – Greedy Randomized Adapted Search Procedures: Procedimientos de Búsqueda aleatorios basados en búsqueda adaptativa

TSPPD- Pickup and Delivery Travelling Salesman Problem: Problema del Agente Viajero con recogida y entrega

VRPFC – Fixed Cost Vehicle Routing Problem: Problema de Ruteo Vehicular con costos fijos

VRPFH – Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem: Problema de Ruteo Vehicular con flota heterogénea

VRPTW - Vehicle Routing Problem with Time Windows: Problema de Ruteo Vehicular con Ventanas de Tiempo

SVRP – Stochastic Vehicle Routing Problem: Problema de Ruteo Vehicular con demanda estocástica

SDVRP – Divisible Demand Vehicle Routing Problem: Problema de Ruteo Vehicular con carga divisible

MDVRP – Mixed Depot Vehicle Routing Problem: Problema de Ruteo Vehicular con varios depósitos

FSM – Fleet Size and Mix: Problema de Ruteo Vehicular con flota heterogénea con flota ilimitada

HVRPD – Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery:  
Problema de Ruteo Vehicular con flota heterogénea con recogida y entrega

HVRPFD - Heterogeneous Vehicle Routing Problem: Problema de Ruteo Vehicular con flota heterogénea con flota limitada y costos fijos y variables

FSMD - Fleet Size and Mix: Problema de Ruteo Vehicular con flota heterogénea con flota ilimitada y costos variables

FSMF - Fleet Size and Mix: Problema de Ruteo Vehicular con flota heterogénea con flota ilimitada y costos fijos

FSMFD - Fleet Size and Mix: Problema de Ruteo Vehicular con flota heterogénea con flota ilimitada con costos fijos y variables

NP-HARD – NP-Duros su denominación recae cuando el problema tiene tiempos de ejecución de orden exponencial.

GA – Genetic Algorithm: Algoritmo Genético

SA – Simulated Annealing: Recocido Simulado

TS- Tabú Search: Búsqueda Tabú

CS – Combinated Savings Method: Algoritmo de Ahorros Combinado

## **RESUMEN**

En la cadena de suministro de una empresa, cada eslabón tiene su relevancia al momento de realizar su proceso y el rol de la distribución no es una actividad aislada, lo cual dentro del contexto de la planificación de la carga vehicular el objetivo se debe alinear a minimizar el uso de recursos y optimizar los costos. Un correcto análisis previo al despacho de mercadería puede generar los objetivos requeridos, evitar pérdidas monetarias y hacer un proceso cada vez más eficiente.

En el presente proyecto se simulan algunas instancias de distribución para hallar soluciones factibles del proceso, considerando un punto de despacho para entregas a nivel nacional con flota heterogénea. El objetivo es generar un conjunto de rutas con vehículos asignados de diferentes capacidades que minimicen la suma de costos y distancias. Para esto se desarrolla un algoritmo metaheurístico GRASP para la resolución del problema del VRP con flota heterogénea en tiempos computacionales razonables.

## **ABSTRACT**

In supply chain of a company, each link has its relevance making its process and the role of distribution is not an excluded activity, so within the context of the vehicular cargo planning the goal have to set to minimize the use of resources and cost optimization. A proper prior distribution analysis could generate our goal required, avoid losing money and to make a process more efficient.

In this project some planning distribution instances are simulated to find feasible solutions about process, considering one dispatch point to customers with heterogeneous fleet. The goal is generate a set of routes with vehicles of different capacities assigned minimizing costs and distances. It is developed a GRASP metaheuristic algorithm to solve the VRP with Heterogeneous fleet within short computing times.

## **Capítulo 1. Planteamiento del problema**

### **1.1 Situación actual del negocio**

La empresa de estudio elabora productos de consumo masivo, como galletas, dulces, chocolates; los cuales distribuye a nivel nacional desde su Centro de Distribución ubicado en la ciudad de Guayaquil. Cuenta con más de 50 años en el país y se ha ganado la confianza del mercado ecuatoriano por la calidad que sus productos ofrecen.

Su cartera de clientes es muy amplia, dividida en varios canales de atención, como son el canal Moderno y el Tradicional y de este último se subdivide en otra jerarquía de clientes dentro de los cuales se encuentra el canal Retail, que normalmente conlleva atención directa o en rutas pero no pasa por ninguna bodega intermedia para su despacho. De esta jerarquía de clientes la suma da aproximadamente 200 dispersos por la zona sur y central del país. Su sector de distribución cubre parte de la región costa y parte de la sierra, en las provincias de Guayas, Santa Elena, Manabí, Los Ríos, Loja, Azuay, El Oro.

Tiene un máximo de días de entrega de hasta 48 horas dependiendo de la ubicación del cliente, por lo general en Guayaquil su entrega es en 24 horas, sino puede demorar 48 o inclusive hasta 72 horas si es foráneo.

La demanda de producto de los clientes se infiere que es estocástica. Sin embargo para algunos de ellos se conoce levemente el volumen de pedido en razón de tipo de vehículos por el área de logística.

La distribución de sus productos la realizan “al granel” con camiones de flota contratada desde 2.5 toneladas hasta tráileres de 30 toneladas de capacidad; y el costo de transportar su mercancía a nivel nacional depende del tonelaje total que representa la carga asignada al vehículo y a la ruta final de entrega.

La cantidad de clientes actuales que la empresa atiende del sector indicado por ciudad o cantón se detallan a continuación:

<b>Ciudad</b>	<b>Total</b>	<b>Ciudad</b>	<b>Total</b>
Arenillas	1	La Troncal	1
Azogues	1	Loja	11
Babahoyo	5	Machala	5
Biblian	1	Manta	5
Bolívar	2	Milagro	3
Buena Fe	2	Montalvo	1
Cañar	3	Naranjal	2
Catamayo	2	Naranjito	2
Chone	1	Pasaje	2
Coronel Maridueña	1	Pedro Carbo	1
Cuenca	12	Piñas	1
Daule	2	Playas	2
Duran	1	Portoviejo	7
El Empalme	3	Puerto López	1
El Guabo	5	Quevedo	5
El Triunfo	2	Santa Lucia	1
Guayaquil	29	Santa Rosa	2
Huaquillas	5	Ventanas	1
La libertad	2	Vinces	3

Tabla 1.1 Cantidad de clientes por ciudad o cantón de la región de atención.

Estos clientes son definidos por las siguientes regiones:

<b>Provincia</b>	<b>Clientes</b>
Azuay	16
Cañar	2
El Oro	21
Guayas	46
Loja	13
Los Ríos	20
Manabí	16
Santa Elena	2
<b>Total general</b>	<b>136</b>

Tabla 1.2 Cantidad de clientes región.

## **1.2 Problemática**

Existe una gran variedad de productos que se despachan en una sola carga para uno o varios clientes en caso de que sea una ruta de entrega, lo que implica que la combinación de cada uno de estos productos por sus características como volumen, peso, orientación, etc., en el furgón del camión, genere un porcentaje de ocupación vehicular, es decir, la métrica de utilización de la capacidad del camión, que puede oscilar desde un 1% hasta un 100%, según la carga. Esto a su vez se refleja en el costo del transporte asignado.

Una de las actividades básicas de las personas encargadas en realizar la planificación de la carga para una distribución es validar todas estas características mencionadas para considerar si es relevante realizar el despacho sin que afecte a las diferentes áreas que están involucradas en la cadena de suministro, evitando perder ventas y tratando de generar el menor costo para dicho traslado.

Para el caso particular, de la instancia de estudio, este análisis de características se lo realiza solamente por el porcentaje de capacidad utilizada. Además dependiendo del cliente y la situación se generan tiempos de proceso que pueden verse incrementados según la rapidez que conlleve tomar las decisiones logísticas. Pero el punto que afecta de mayor manera es que no se tomen en cuenta los costos de transportación al generar una distribución y que no se puedan considerar diversas opciones para tratar de disminuir los recursos a usar.

También existe la posibilidad de que el no considerar diversos aspectos, que puedan influir en el costo real de transporte, impacte desde un simple re trabajo hasta una afectación monetaria tanto al proveedor de transporte como a la empresa misma.

Respecto a la tendencia de la capacidad utilizada de los camiones para diferentes rutas de distribución durante una semana se comporta de la siguiente manera:

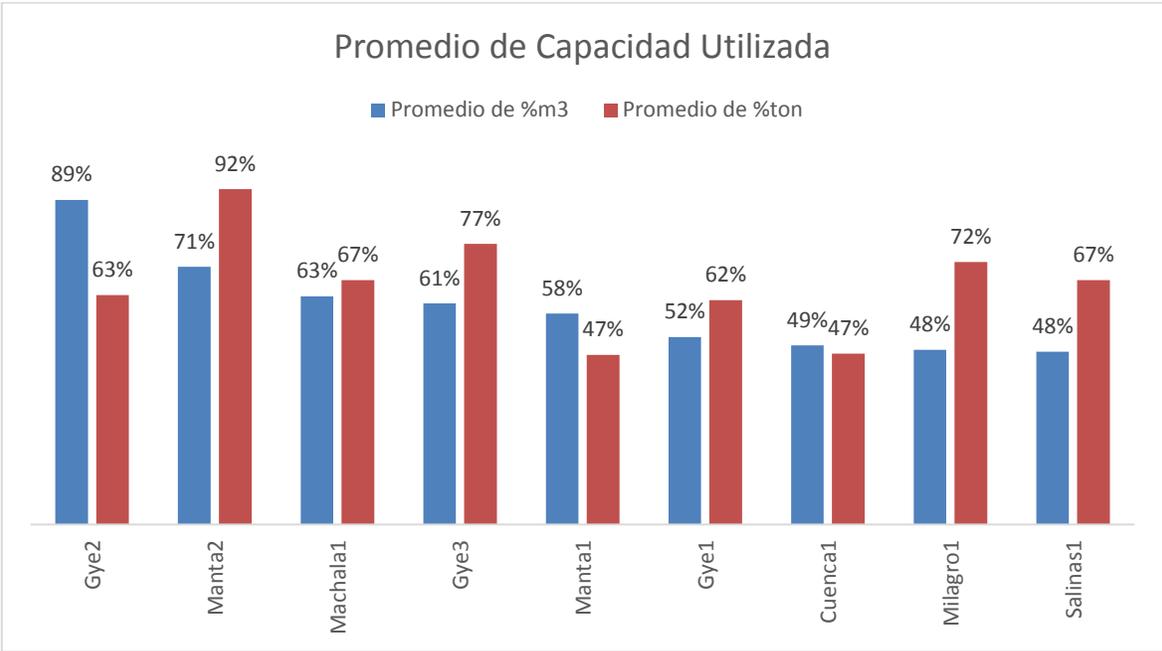


Gráfico 1.1 Promedio de Capacidad Vehicular utilizada

En promedio de ocupación vehicular según la muestra indicada, varía por ruta y por tipo de capacidad, el resultado está dentro de un rango de 47% a 92% en capacidad en toneladas y en un rango de 48% a 89% en capacidad de metros cúbicos.

Así también la cantidad de vehículos a usar se lo determina según la disponibilidad y en ocasiones tomando en cuenta restricciones de entrega a clientes. Lo que implica que se puedan tomar opciones no factibles para una distribución como por ejemplo enviar una carga dividida en 4 vehículos de capacidad baja en vez de utilizar uno solo de capacidad mayor.

Es un problema que se evidencia en temporadas regulares y altas.

Respecto al costo por kilo transportado, la empresa tiene definido un objetivo a nivel nacional de lograr un 2.5% en el costo de transporte por las ventas realizadas. Según el objetivo indicado, si se realiza un desglose del costo variable de distribución para cada una de las regiones para las cuales distribuye sus productos se evidencia que ninguna de ellas logra de manera mensual ubicarse dentro de este valor requerido:

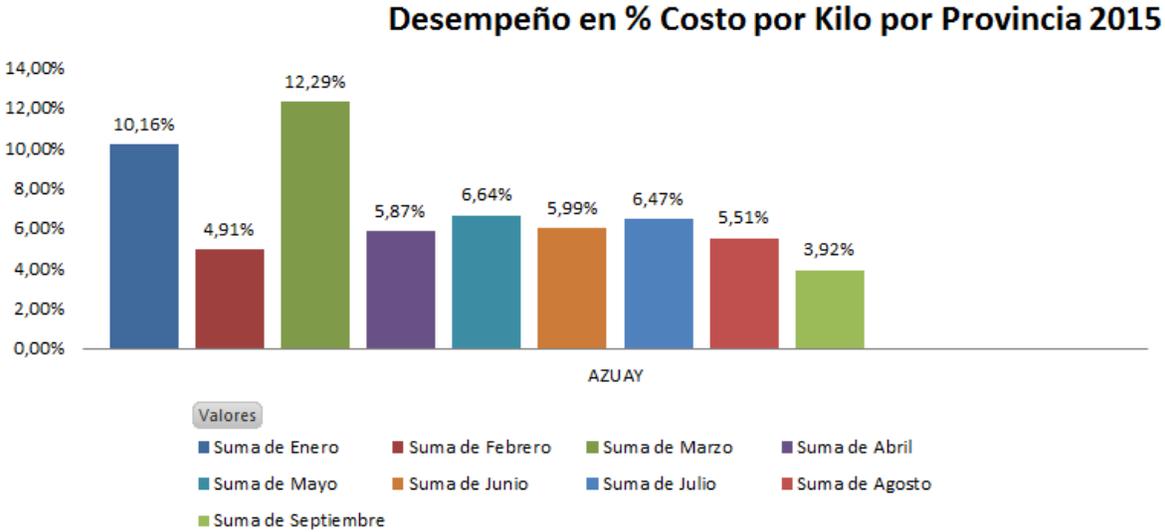


Gráfico 1.2 Costo por kilo transportado Azuay hasta septiembre 2015

### Desempeño en % Costo por Kilo por Provincia 2015

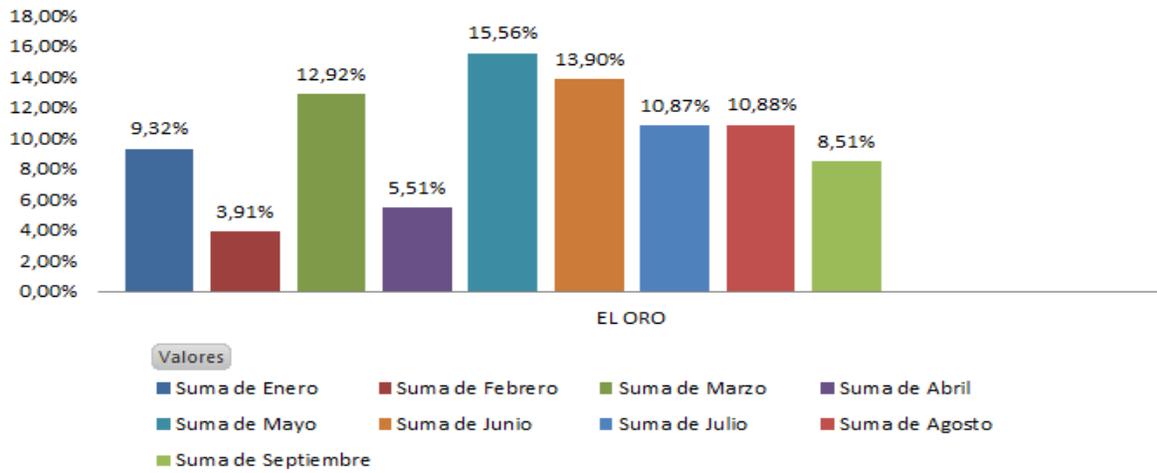


Gráfico 1.3 Costo por kilo transportado El Oro hasta septiembre 2015

### Desempeño en % Costo por Kilo por Provincia 2015

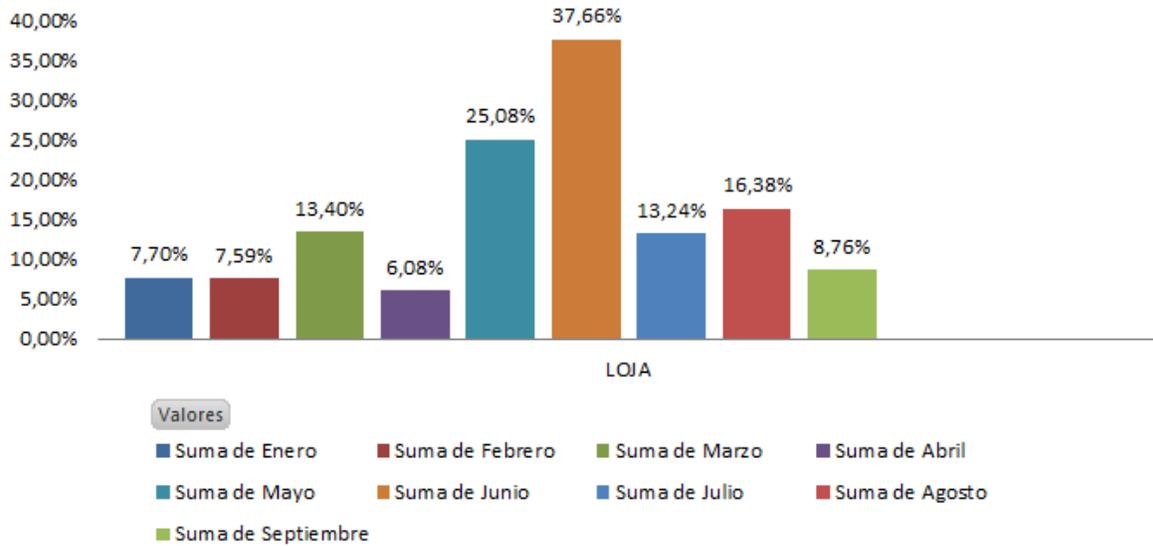


Gráfico 1.4 Costo por kilo transportado Loja hasta septiembre 2015

### Desempeño en % Costo por Kilo por Provincia 2015

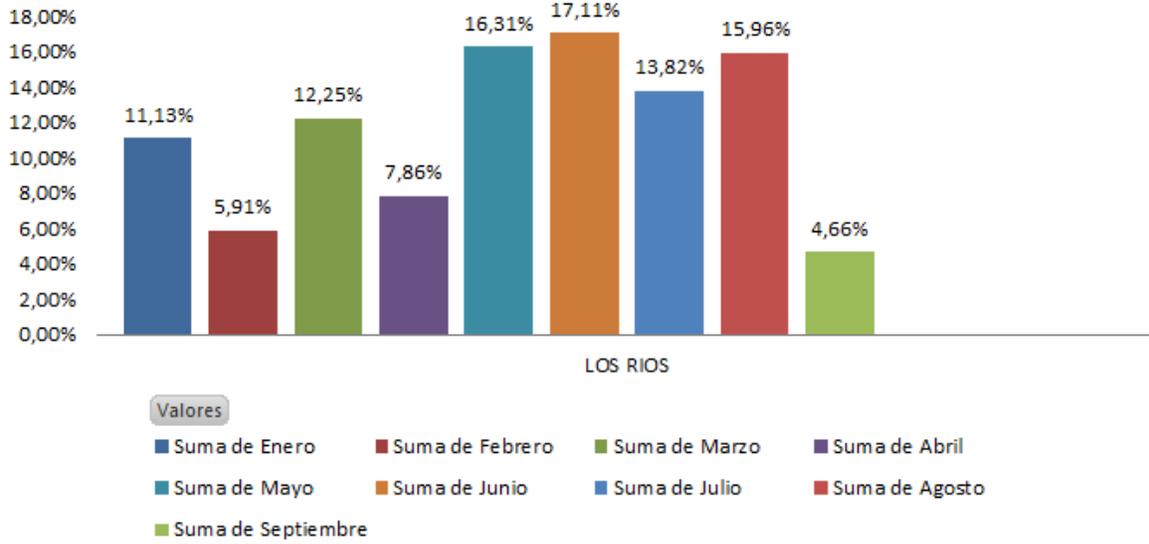


Gráfico 1.5 Costo por kilo transportado Los Ríos hasta septiembre 2015

### Desempeño en % Costo por Kilo por Provincia 2015

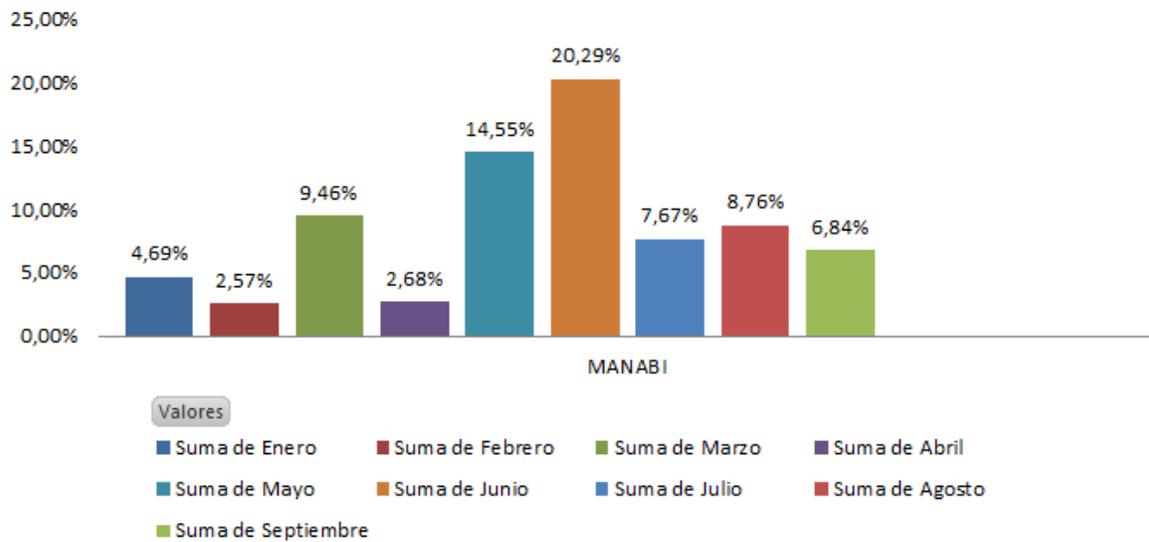


Gráfico 1.6 Costo por kilo transportado Manabí hasta septiembre 2015

### Desempeño en % Costo por Kilo por Provincia 2015

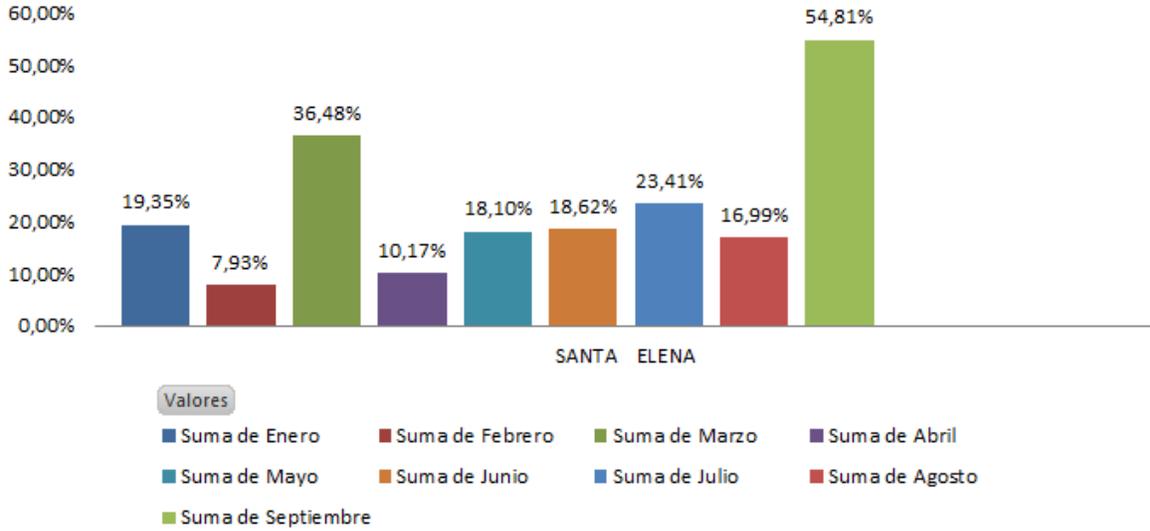


Gráfico 1.7 Costo por kilo transportado Santa Elena hasta septiembre 2015

### Desempeño en % Costo por Kilo por Provincia 2015

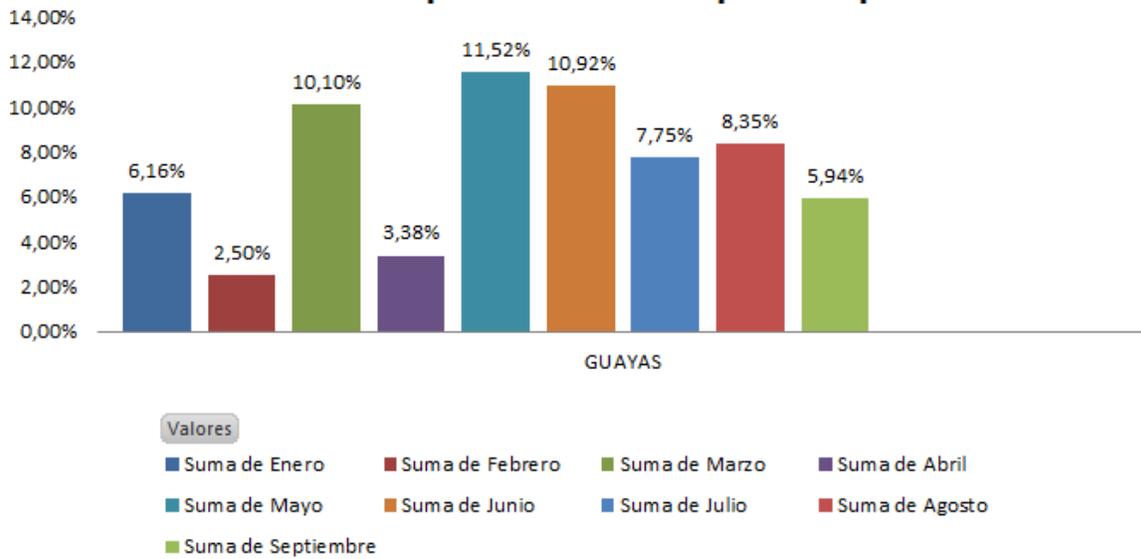


Gráfico 1.8 Costo por kilo transportado Guayas hasta septiembre 2015

En las gráficas anteriores se muestra el comportamiento del costo por kilo transportado por cada una de las provincias en los nueve meses, que normalmente se evidencia un gran aumento en el resultado sobre el objetivo establecido. Hasta septiembre de 2015 las zonas más impactantes en costo por kilo transportado de las mostradas, considerando un objetivo en dólares de \$67, son las siguientes:



Gráfico 1.9 Zonas con mayor impacto sobre el objetivo del costo de transporte por kilo hasta septiembre de 2015.

De esta gráfica se tomará como ejemplo las zonas que se entrega con mayor frecuencia semanal y representa mayor cantidad de clientes. Tomando en cuenta las provincias que tienen un GAP o diferencia respecto al objetivo muy alto, se desglosa la densidad de clientes por cada una de ellas:



Gráfico 1.10 Densidad de clientes en zonas con GAP mayor o igual a la mediana.

Sobre estas provincias las que representan mayor número de clientes son El Oro y Los Ríos, de las cuales la provincia que tiene mayor frecuencia de entregas es la provincia de El Oro, que en la siguiente gráfica se muestra la cantidad de días laborables que se visitó a la zona, sobre un promedio de 22 días:

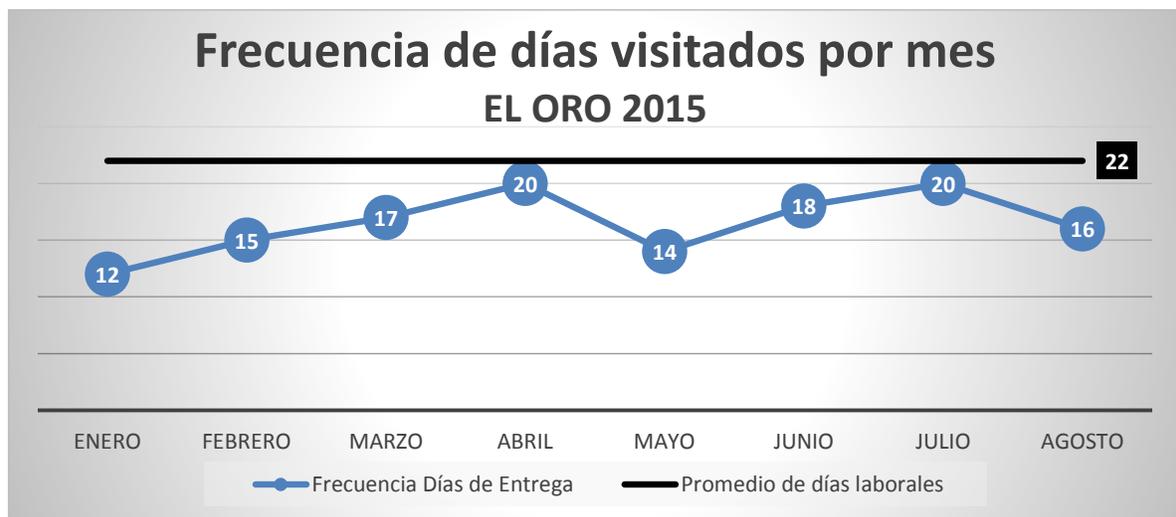


Gráfico 1.11 Frecuencia de visitas de entrega por días laborables.

Sin embargo con esto, la medida en logística utilizada para ver la eficacia de la utilización del vehículo en las entregas no está cumpliendo el objetivo que propone la empresa de 85% según volumen o peso:

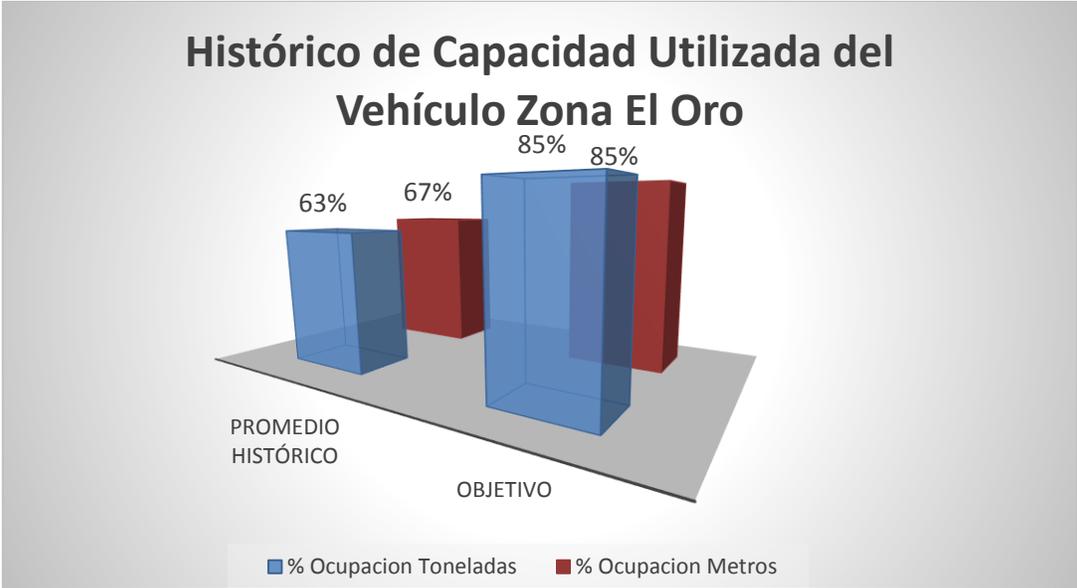


Gráfico 1.12 Capacidad de utilización del vehículo en toneladas y metros según objetivo.

Adicional a esto, actualmente no se valida la cantidad de kilómetros recorridos por ruta por lo que en algunos casos podría afectar al tiempo de llegada al otro cliente, teniendo en cuenta de que el factor del tiempo no se incluye en su totalidad debido a que para el escenario actual no hay información de las ventanas de tiempo de la mayoría de clientes por día de entrega y para los que se posee dicha información, no son ventanas de tiempo rígidas con lo que al momento no se genera mayor problema en costos pero si en servicio al cliente.

Por lo que al considerar más criterios dentro de la planificación de distribución, se podría lograr una reducción o inclusive una estabilización del costo por kilo transportado para cada zona. Para lo cual una herramienta de apoyo analítico en la operación puede ayudar mucho en la consecución de los resultados.

### **1.3 Hipótesis**

Este trabajo pretende demostrar que a través de la heurística a desarrollar para la planificación de la distribución puede dar soluciones factibles para analizar que ruta y que cantidad de vehículos se deberían de usar para no impactar al costo de transporte.

### **1.4 Justificación del problema**

El punto de optimizar costos lleva a una empresa, a tener mayores ganancias con mejores resultados y la direcciona a la eficiencia operacional, generando valor agregado a la operación. Para empresas, las cuales su especialidad es la distribución de materiales, es de vital importancia la disminución del costo variable, por ejemplo, en el pago de fletes por despachos realizados hacia sus clientes. A su vez, existe gran relevancia a la hora de definir un plan de entregas correcto para que no tenga afectación alguna en el costo de distribución de la empresa ni impacto al proveedor.

## **1.5 Objetivos**

Para el actual estudio se tienen los siguientes objetivos detallados a continuación:

### **1.5.1 Objetivo General**

Presentar una propuesta para el análisis de la planificación de distribución con un escenario de flota heterogénea, que permita a la empresa optimizar recursos en el reparto de productos desde su centro de distribución a clientes externos.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

- a) Definir grupo de clientes para análisis y aplicación de metodología.
- b) Formular un modelo matemático para el problema de ruteo vehicular con flota heterogénea considerando un solo depósito.
- c) Diseñar un algoritmo heurístico y su respectivo proceso de mejora para el VRP con flota heterogénea.
- d) Aplicar instancias para validar resultados.

## Capítulo 2. Marco teórico.

### 2.1 Estado del arte

Durante las últimas décadas el estudio del VRP ha abarcado un gran enfoque sobre su desarrollo junto con nuevas y distintas variedades por su complejidad, por lo que a su vez se han diseñado técnicas de relajación como algoritmos heurísticos para obtener soluciones cercanas al óptimo de gran calidad sin que se genere un exceso en el tiempo de resolución. Según Eksioglu, Volkan y Reisman en una publicación en 2009 menciona que la cantidad de artículos relacionados con el VRP en journals que datan desde 1954 y durante el periodo de 2000 al 2006 se publicaron 447 investigaciones enfocadas en tratar el problema de ruteo vehicular en sus diferentes aplicaciones. En este capítulo se detallan y analizan las diversas teorías y métodos existentes para resolver el problema de ruteo vehicular que incluye la variante de la flota heterogénea.

- 1) Solving Capacitated Vehicle Routing Problem by Using Heuristic Approaches: A Case Study, realizado por Mohibul, Ghosh y Mahfujur; en el año 2015 en Bangladesh. Realizan una implementación de un CVRP para una importadora de refrescos para una empresa multinacional de su país aplicando los heurísticos de Clarke & Wright, Holmes & Parker y Fisher & Jaikumar y presenta sus respectivas soluciones y diferencias entre cada uno. (Md. Mohibul Islam, 2015)
- 2) Ruteo de Barcos para el Suministro de Alimentos en la Industria Salmonera realizado por Juan Ignacio Villasante en 2014 de la Universidad de Chile. El trabajo se enfoca en diseñar un método de planificación de rutas con asignación de demanda ajustado al problema del ruteo vehicular con flota heterogénea y su respectiva heurística GRASP; al escenario se añaden dos tipos diferentes de costo que ingresan como restricciones en la función objetivo las cuales representan el costo del contrato que mantiene la empresa con su naviera y el costo operativo de cada barco midiendo la eficiencia de esta última. (Vadillo, 2014)

- 3) Un algoritmo Metaheurística para el problema de localización y ruteo con flota heterogénea desarrollado por Rodrigo Linfati, John Willmer Escobar y Gustavo Gatica de las universidades del Bio-Bio en Chile, Pontificia Universidad Javeriana en Colombia y Andrés Bello en Chile respectivamente en el año de 2014. El estudio se basa en el diseño de un algoritmo llamado LRPH que hace referencia al modelo de localización de clientes y ruteo vehicular con flota heterogénea. Para su resolución se modelizó un híbrido de técnicas clústeres con métodos exactos y para la fase de mejora propone una búsqueda tabú granular. (Rodrigo Linfati, 2014)
- 4) Diseño de meta heurísticas para problemas de rutas con flota heterogénea: GRASP 1999 realizado por Joaquín Pacheco y Cristina Delgado del Departamento de Economía de la Universidad de Burgos, España. Es un trabajo en el cual propone Metaheurística de tipo greedy para la resolución del problema de ruteo vehicular con flota heterogénea y con ventanas de tiempo y que en el cual se realiza una comparación con las diferentes soluciones desarrolladas por los autores a fin de que se evidencie los beneficios de utilizar cada una. Es un estudio base para nuestro trabajo ya que explica detalladamente como se puede desarrollar esta heurística incluyendo las dos restricciones importantes indicadas previamente. (Joaquín A. Pacheco, 1999)
- 5) Routing a Heterogeneous Fleet of Vehicles realizado en el 2007 por Roberto Baldacci, Maria Battarra y Daniele Vigo en la Universidad de Bologna, Italia. Muestra las diferentes variantes del VRP junto con unas heurísticas de resolución propuestas comparando resultados con situaciones de referencia. Además hace un breve detalle sobre la historia del VRP desde que fue propuesto por Dantzing y Ramser hasta en ese entonces su extensión de variantes con Tavakkoli Moghaddam en 2006. (Roberto Baldacci, 2007)

- 6) Optimización de Rutas con Flotas Heterogéneas y Múltiples Usos de Vehículos VRPHEMSTW realizado por Víctor Yepes y Josep R. Medina de la Agencia Valenciana del Turismo y del Departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes en la ciudad de Valencia, España en el año de 2002. En el estudio se trabaja una heurística y una Metaheurística para la resolución del VRP con flota heterogénea en donde se incorporan además restricciones muy cercanas a la realidad del área de distribución como por ejemplo ventanas de tiempos flexibles para los clientes, por tráfico o jornada laboral variable. (Víctor Yepes, 2002)
- 7) A record-to-record travel algorithm for solving the heterogeneous fleet vehicle routing problem, realizado en 2006 por Feiyue Li, Bruce Golden y Edward Wasil de las universidades de Princeton, Maryland y American University en Estados Unidos. Presentan una variante del algoritmo original diseñado por ellos, llamado Record-to-Record, en el cual resuelven varios ejemplos con casos de referencia del VRP con variantes de capacidad, tipos de vehículos y costos fijos y variables. (Feiyue Li, 2006)
- 8) A new meta heuristic approach to the fleet size and mix vehicle routing problem, desarrollado por Anthony Fu-Wha HAN y Yuh-Jen CHO de la National Chiao Tung University en Taiwan en el año de 1999. Crean una meta heurística basada en la búsqueda genérica por intensificación y diversificación GIDS. (Anthony Fu-Wha HAN, 1999)
- 9) El Doble Problema del Viajante con Múltiples Pilas, realizado por Gregorio Tirado Domínguez en 2009 de la Universidad Complutense de Madrid. Donde aborda en detalle la historia del VRP y específicamente estudia la complejidad del DTSPMS desarrollando heurísticas y estructuras que le permita encontrar soluciones factibles al problema indicado. (Domínguez, 2009).

10) The Life and times of the Savings Method for Vehicle Routing Problems, realizado por Graham K. Rand en 2009 del Departamento de Administración de la Ciencia de la Universidad de Lancaster del Reino Unido. En donde detallan todas las variantes y aplicaciones al VRP utilizando el método de ahorros original de Clarke and Wright. (Rand, 2009)

## **2.2 Marco Teórico**

### **2.2.1 El problema del ruteo vehicular**

El VRP es el resultado de la fusión de dos problemas fundamentales; El Problema de Agente Viajero (Traveling Salesman Problem), en el cual, se dispone de un solo vehículo que visita una sola vez a un conjunto de clientes en una sola ruta, construyendo un camino hamiltoneano, cuyo objetivo es minimizar la distancia total recorrida (o bien el tiempo o costo necesario para visitar todos los clientes); y del problema de Empaquetamiento (Bin Packing Problem) que se basa en encontrar una óptima asignación de un conjunto de elementos dentro de uno o varios espacios conocidos (mochila o contenedores), limitados a restricciones básicas de cantidad de elementos y peso a soportar; con lo cual esta combinación de problemas cuyos resultados dan rutas y capacidades generan el VRP.

En detalle sobre los orígenes del VRP, respecto al TSP, se desarrollaron algunas variantes que intentaban resolver esquemas diferentes más cercanos a la realidad usando solo un vehículo, como por ejemplo: TSPPD en el cual se incluye el escenario cuando el vehículo debe realizar entregas y recolección de mercancía partiendo desde un punto y regresando al mismo según una cantidad específica de clientes, los mismos que representan la capacidad limitada del transporte por lo que implica que se deberá encontrar una ruta hamiltoneano con un coste mínimo y cumpliendo con las restricciones descritas. Sobre el TSPPD se creó una variante denominada TSPPDL o el TSP con recogida y entrega, que refiere a que el primer cliente en recoger mercancía será el último al que se le entregara. También se desarrolló la variante que incluye entrega con varios vehículos y demás hasta la actualidad.

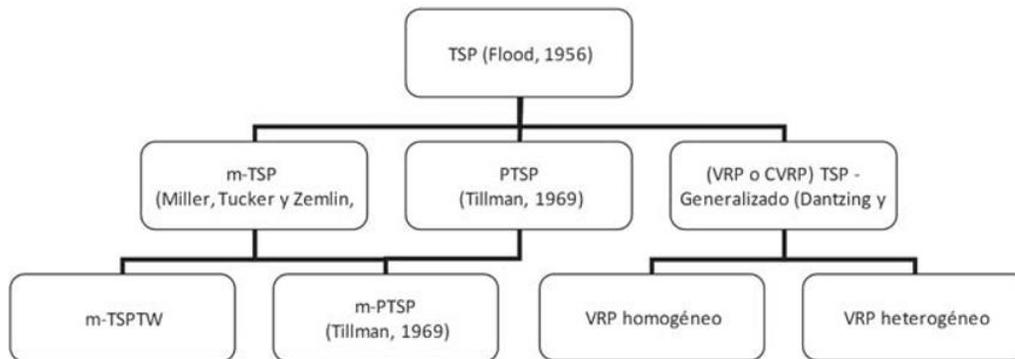


Figura 2.1 Modelos originarios del VRP- (Rocha & González, 2011)

El problema del ruteo de vehículos (VRP en sus siglas en inglés, The Vehicle Routing Problem) introducido por primera vez por Dantzig y Ramser en 1959, es el nombre que se le otorga a la clase de casos en los que involucran encontrar un conjunto de rutas óptimas para una flota de vehículos basados en limitaciones o restricciones según cada tipo de escenario y para un determinado número de clientes o ciudades localizadas geográficamente tratando de minimizar los recursos como tiempo, costos, distancia, vehículos, etc. El caso elemental consiste en establecer un conjunto de caminos, los cuales parten de un depósito en común para así, dado un número de clientes, satisfacer sus requerimientos básicos, optimizando recursos.

Existen variantes al caso estándar del VRP, dichas variantes dependen del comportamiento de los elementos que forman parte del modelo como lo son clientes, depósitos y vehículos, que a continuación se muestran:

Cada cliente tiene una cierta demanda la cual deberá ser satisfecha por un tipo de vehículo. En la mayoría de los casos, la demanda va a ser un bien que ocupa una cantidad de espacio, por lo que es usual que un mismo tipo de vehículo no pueda satisfacer la demanda de todos los clientes (VRPFC o VRPFH). Podría ocurrir que la mercadería a ser transportada a los clientes, no se encuentre en el depósito, sino que se encuentre distribuida a los proveedores, en este caso los proveedores deberán de ser visitado antes que los clientes.

En otros casos, la demanda no será un bien sino un servicio: el cliente requiere ser visitado por el vehículo y cada uno tiene una ubicación y desea ser transportado de un lado hacia otro, la capacidad del vehículo será una cota máxima sobre la cantidad de clientes que se puede transportar (CVRP), sin embargo, en ciertos casos se acepta que la demanda de un cliente sea satisfecha en momentos diferentes.

Los clientes pueden tener restricciones con respecto a su horario de servicio (VRPTW flexibles o duras), las cuales se expresan en forma de intervalos de tiempo. También se puede presentar que la cantidad de clientes o la demanda de cada cliente no es un número conocido sino una variable aleatoria (SVRP). La carga del cliente puede ser divisible, es decir se permite que la carga de algunos puntos esté dividida entre varios vehículos si su resultado permite una disminución de costos totales (SDVRP).

Si el escenario implica que cada ruta puede empezar y terminar en diferentes depósitos cada uno de estos con diferentes ubicaciones y una flota de vehículos asignada (MDVRP). Al igual que los clientes, los depósitos también pueden tener ventanas de tiempos, en este caso debe de considerarse el tiempo necesario para cargar un vehículo antes de que comience la ruta o cuando regrese, evitando de esta manera la congestión del depósito.

De todas las variantes el objetivo en común es minimizar el número de vehículos a utilizar y a su vez minimizar la distancia total recorrida definiendo la cantidad de rutas y vehículos a usar con el impacto de las restricciones deseadas.

### 2.2.2 VRP con flota heterogénea

Dentro del escenario global de distribución algunas complejidades como restricciones por zona de entrega o capacidad de recepción en clientes definen que las entregas no deban necesariamente realizarse en un mismo tipo de vehículo. Lo cual es un contexto ideal para la aplicación del HVRP.

Para el problema de ruteo vehicular con flotas heterogéneas también incluyen algunas variantes respecto a si la cantidad de vehículos se considera limitada o ilimitada y el tipo de coste a considerarse como los siguientes modelos: HVRPD analiza el enfoque con costos variables que dependen del tipo de ruta con flota limitada heterogénea, HVRPFD se refiere a cuando los costos son fijos y variables con flota limitada y heterogénea. El FSMD es el VRP con flota heterogénea ilimitada con costos variables, el FSMF hace referencia al mismo problema pero con costos fijos y el FSMFD implica los dos tipos de costos. Para todos estos se puede incluir según la realidad del caso, la restricción con ventanas de tiempo.

El HFVRP con flota ilimitada o llamado también FSM Fleet Size and Mix fue introducido por Golden et al. en 1984 proponiendo heurísticas de desarrollo utilizando a Clarke and Wright (1964) y también un esquema de ruta gigante Beasley (1983). La variante con flota limitada fue introducido por Taillard en 1999 con un método heurístico de generación de columnas y búsqueda tabú. Para el presente trabajo se considera un HVRP con flota limitada y costo variable de transporte por rutas.

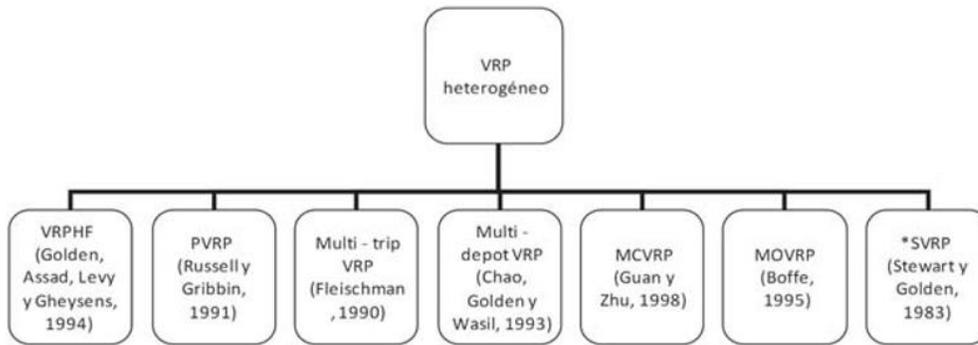


Figura 2.2 Taxonomía VRP Heterogéneo- (Rocha & González, 2011)



Figura 2.3 Taxonomía según métodos de solución - (Rocha & González, 2011)

El problema estándar puede describirse de la siguiente manera:

Dado un grafo  $G = (V, A)$  en donde  $V = \{0, 1, \dots, n\}$  es un conjunto de  $n+1$  nodos y  $A$  un conjunto de arcos. El depósito representa el Nodo 0 y  $V' = V \setminus \{0\}$  respecto a los clientes. Se establece una cantidad idéntica de vehículos con capacidad de carga fija  $P$  que debe ser entregada en cantidades de bienes  $p_i$  ( $i = 0, 1, \dots, n$ ) hacia  $n$  clientes desde un único almacén ( $i = 0$  y  $p_0 = 0$ ). La distancia  $d_{ij}$  entre clientes  $i$  y  $j$  es conocida ( $i, j = 0, \dots, n$ ). Con esto el objetivo es encontrar rutas para los vehículos en las cuales se cumpla lo siguiente:

- 1) Minimizar la distancia total de viaje de los vehículos.
- 2) La mercancía solo puede entregarla un vehículo a cada cliente.
- 3) La cantidad total de bienes de un vehículo no puede exceder la capacidad  $P$ .

Para el problema con flota heterogénea se describe como sigue:

Se establece un conjunto  $B = \{1, \dots, L\}$  de diferentes tipos de vehículos. El vehículo  $l$  tiene capacidad  $P_l$ . La cantidad de vehículos del tipo  $l$  disponibles es  $n_l$ . El costo de viajar desde el cliente  $i$  al  $j$  ( $i, j = 0, \dots, n$ ) con un vehículo del tipo  $l \in B$  es  $c_{ijl}$ . El uso de un vehículo de tipo  $l$  puede implicar que se genere un costo fijo  $f_l$ . El costo de viaje o costo variable según el tipo de variante puede ser el mismo para todos los tipos de vehículos  $c_{ijl} = c_{ijl}'$ . En el caso de que el costo no sea el mismo para los diferentes tipos de vehículos, uno de los objetivos del problema será definir los tipos de vehículos más baratos para la ruta deseada para cada arco  $(i, j)$ . Matemáticamente la ruta se define como el par  $(Ru, l)$  en donde  $Ru = \{i_0, i_1, i_2, i_3, \dots, i_n\}$ , secuencia de clientes visitados, sabiendo que  $i_0 = i_n = 0$  (el depósito) y  $s = \{i_1, i_2, i_3, \dots, i_{n-1}\} \subseteq V'$ . Todas las rutas contienen al depósito y también se indica el tipo de vehículo a usar.

Para que la ruta sea factible debe cumplir con las siguientes condiciones:

1) Condición de que la demanda total de los clientes de la ruta no exceda la capacidad total del vehículo.

$$\sum_{h=2}^{n-1} p_{hs} \leq P_l$$

2) Condición del costo de la ruta asignada el cual debe ser la suma de los costos por cada arco determinado y el costo fijo del vehículo asociado.

$$F_l + \sum_{h=1}^{n-1} C_{l \ sh \ sh+1}$$

El número total de rutas asignadas no debe ser mayor a la cantidad de vehículos disponibles. La flota de vehículos es limitada para cada tipo de vehículos  $B_l = W, \forall l \in B$ . En el caso de que el costo fijo no este asignado  $F_l = 0, \forall l \in B$ . El costo de las rutas dependen del vehículo utilizado lo que implica que  $C_{ijk1} \neq C_{ijk2} = C_{ij}, \forall l_1, l_2 \in B$  en donde  $l_1 \neq l_2 \forall (i, j)$ .

El costo de la ruta puede depender de varios factores, el tipo de vehículo usado, la capacidad de la carga que lleva en cajas, en tonelaje o por metros cúbicos, la cantidad de kilómetros recorridos o tiempo recorrido e inclusive una mezcla entre estos. Si depende del tipo de vehículo enviado y esté inclusive asociado a una distancia entre clientes sería definido  $C_{ijl} = CVariable_l * d_{ij}$ .

La variante general de este problema tendría las siguientes restricciones:

3) Condición de que cada cliente debe ser visitado solamente en una ocasión.

$$\sum_{l \in B} \sum_{i \in V} X_{isl} = 1; \forall s \in V'$$

4) Condición de que si el vehículo visita a un cliente, este vehículo debe de salir del mismo cliente.

$$\sum_{i \in V} X_{ihl} - \sum_{j \in V} X_{hjl} = 0; \forall h \in V' y \forall l \in B$$

5) Condición de cantidad máxima de vehículos disponibles por tipo de vehículo.

$$\sum_{j \in V'} X_{0jl} \leq b_l; \forall l \in B$$

6) Condición de flujo que se refiere a que la diferencia entre las cantidades de mercadería que un vehículo lleva previo y después de la visita al cliente es igual a la demanda del mismo.

$$\sum_{i \in V} Y_{ij} - \sum_{i \in V} Y_{ji} = p_j; \forall j \in V'$$

7) Condición para que no se exceda la capacidad del vehículo y generales binarias y de requerimiento positivo.

$$p_j x_{ijl} \leq y_{ij} \leq (P_l - p_i) x_{ijl}; \forall i, j \in V, i \neq j, \forall l \in B$$

$$y_{ij} \geq 0; \forall i, j \in V, i \neq j$$

$$x_{ijl} \in \{0,1\}; \forall i, j \in V, i \neq j, \forall l \in B$$

### 2.2.3 Métodos heurísticos y metaheurísticos

El HVRP pertenece a la categoría de problemas NP-Hard, lo que significa que los tiempos de procesamiento computacionales se incrementan exponencialmente con el tamaño del problema implicado. Debido a esto se plantean algoritmos heurísticos y meta heurísticos que brinden una solución aproximada y aceptable. También se puede recurrir a ellos cuando no existe ningún método exacto para su resolución o no se ha desarrollado aun.

Los algoritmos heurísticos proporcionan una solución de calidad basada en la exploración sobre el conjunto de soluciones posibles, la cual si bien no es la óptima, permite que el resultado se encuentre de forma más rápida. El conjunto de soluciones posibles debe ser finito ya que si la cantidad de elementos de este grupo es muy elevada, se hace difícil evaluar cada solución para poder llegar a un óptimo.

Dos de las propiedades que tiene el desarrollar una heurística para poder encontrar una buena solución es que la misma debe estar cerca del óptimo y que la probabilidad de encontrar una solución muy lejana a la óptima deba ser casi nula.

La clasificación completa sobre los métodos heurísticos es muy extensa sobre todo porque existen muchos que han sido desarrollados específicamente para una sola aplicación, más del total, se detallan a continuación las siguientes categorías que mayormente se pueden aplicar para diversos problemas:

- a) Métodos de descomposición: El procedimiento es descomponer el macro problema en algunos pequeños para mejor resolución.
- b) Métodos Inductivos: El procedimiento es sistematizar el problema grande en versiones más sencillas.
- c) Métodos de Reducción: El procedimiento es restringir el espacio de soluciones incluyendo ciertas características que en las buenas soluciones del problema se cumplen como limitaciones.
- d) Métodos constructivos: El procedimiento es construir la solución paso a paso, los cuales normalmente intentan buscar la mejor elección en cada iteración.

- e) Métodos de Búsqueda Local: El procedimiento se basa en buscar primero la solución del problema para después mejorarla progresivamente.

De los métodos heurísticos constructivos para el tratamiento y resolución del problema del ruteo vehicular se encuentran entre ellos:

- 1) Heurísticos del Vecino más cercano: Fue creado por Rosenkrantz, Stearns y Lewis en el año de 1977. Construye un camino hamiltoniano de bajo costo considerando la unión de la ruta con el vértice más cercano al dado inicialmente. Sin embargo terminando el proceso posiblemente se obligue a unir vértices que produzcan aristas con un costo elevado, ya que no visualiza desempeño de elecciones en iteraciones posteriores, por lo que se le conoce también como un procedimiento miope. Aunque para reducir este inconveniente y también para aumentar la velocidad se utiliza el concepto de subgrafo candidato en adición a otras características en la exploración de la ruta. El subgrafo candidato significa que ayudará a tomar aristas atractivas que generen un ciclo hamiltoniano de bajo coste.
- 2) Heurísticos de Inserción: Fue creado igualmente por Rosenkrantz, Stearns y Lewis. Consiste en crear un subtour inicial con una cantidad específica de vértices para luego insertarlos aplicando un criterio puntual donde no incremente la longitud del ciclo o se de en menor magnitud. Sobre los criterios para insertar un vértice se han definido los siguientes:
  - a. Criterio de inserción más cercana en donde se selecciona un vértice más cercano al ciclo inicial.
  - b. Criterio de inserción más lejana en donde se selecciona un vértice más lejano al ciclo inicial.
  - c. Criterio de inserción más barata en donde se selecciona un vértice que al ser insertado en el tour tenga el menor incremento de coste.
  - d. Criterio de inserción aleatoria en donde se selecciona un vértice al azar.

Aplicar cada criterio implica un incremento en el tiempo de ejecución mayor dependiendo del mismo y este método tiene una mayor desviación del óptimo según cada caso mayor del 10%.

- 3) Heurísticos basados en Árboles Generadores: Desarrollado en el año 1957 por Prim. Se basan en construir árboles generadores de costo mínimo o peso mínimo. El algoritmo define un conjunto de aristas del árbol vacío inicialmente y un conjunto  $W$  de vértices de un árbol formado por uno elegido al azar, los cuales en cada paso se calcula la arista de menor coste que une a  $W$  con los vértices generales y se añade al conjunto de aristas de solución. Un árbol generador de mínimo peso según su desarrollo va a tener menor costo que un ciclo hamiltoniano.
- 4) Heurísticos basados en Ahorros: Estos métodos fueron desarrollados por Clarke y Wright en el año de 1964 que fueron enfocados directamente a desarrollar el VRP pero también existen adaptaciones para el TSP. El procedimiento combina subciclos sucesivamente hasta obtener un ciclo hamiltoniano. Cada subciclo tiene un vértice base en el cual para el procedimiento se conectan subciclos de diferentes vértices con el vértice base y se unen dos vértices de los subciclos seleccionados. El ahorro obtenido es la diferencia entre el costo de las aristas eliminadas y de la que se conectó recientemente. Al desarrollar el algoritmo se requiere de la generación de una lista con combinaciones posibles y que sea actualizada constantemente. También en este caso se puede utilizar un grafo candidato que mejore los tiempos de resolución. La ventaja del método es que tiene una desviación del óptimo menor a los métodos anteriores.

Los algoritmos metaheurísticos son más eficientes y tienen el propósito de obtener resultados mejores sobre los resultados de algún método heurístico utilizado. El uso de este término fue propuesto por Fred Glover en el año de 1986 como una estrategia para generar un mayor rendimiento sobre una heurística. Para estos algoritmos también existe una clasificación según el tipo de heurística que trabaja como los siguientes:

- a) Metaheurísticas constructivas
- b) Metaheurísticas evolutivas
- c) Metaheurísticas de búsqueda

Los métodos constructivos alineados al método heurístico son aquellos que construyen elemento por elemento la solución y como meta heurística el objetivo es encontrar una mejor. Un ejemplo de este método es el GRASP que en sus siglas en ingles significa Greedy Randomized Adaptative Search Procedures que significa que son procedimientos de búsqueda basados en procedimientos aleatorios de búsqueda adaptativa. Este término fue introducido por Feo y Rezende en el año de 1995. La estrategia fue creada para resolver problemas de gran amplitud en optimización combinatoria.

Este método se basa en construir una solución de alta calidad para luego ser procesada para encontrar una mejor solución aun. Tiene dos fases la constructiva y la de mejora.

Los métodos evolutivos se basan en que para cada iteración se genera un conjunto de soluciones y su procedimiento general consiste en generar, seleccionar, combinar y reemplazar un conjunto de soluciones hasta encontrar la mejor. Debido a que el algoritmo debe realizar varias actividades para cada iteración, puede representar un mayor tiempo para su resolución que para otros métodos. Dentro de este enfoque dos grandes ejemplos son las Metaheurística de Búsqueda Dispersa (Scatter Search) y Algoritmos Genéticos.

Los algoritmos genéticos (GA) introducidos por John Holland en el año de 1970 se desarrollan basándose en el proceso natural de evolución de los seres vivos.

Los GA establecen una analogía sobre el conjunto de soluciones de un problema y el conjunto de individuos de una población natural, codificando cada solución en un vector binario en referencia a un cromosoma. Para esto se utiliza una función de evaluación de cromosomas que se basa en la función objetivo del problema. Luego se utiliza un mecanismo de selección en el cual elige a los cromosomas con mejor evaluación para que sean reproducidos y después evaluar la calidad del nuevo hijo, sustituyendo los cromosomas iniciales de la población por el cromosoma del hijo. De este método en conjunto con técnicas de búsqueda local parten los Algoritmos Meméticos, son híbridos debido a que integran los elementos de combinación con los de búsqueda local.

Los algoritmos de búsqueda dispersa (BD) se fundamentan en la idea de que la calidad de un conjunto de reglas de decisión, restricciones o soluciones es mediante la combinación de estas. Es decir, si existen dos soluciones, se puede lograr una mejor mediante la combinación de estas dos, siempre y cuando genere una mejor que las originales.

A diferencia de los GA está en que las elecciones son sistemáticas y estratégicas, mas no aleatorias sobre un conjunto pequeño de soluciones. Por lo que los GA pueden considerar una población de 200 soluciones mientras que los BD consideran solo 20 soluciones. Este método fue introducido en el año de 1977 por Fred Glover.

Los métodos de búsqueda son aquellos que presuponen que existe una solución y realizan procedimientos de búsqueda, en este caso no necesariamente encontrara la solución óptima pero también existe el riesgo de caer en óptimos locales. Ejemplos de algoritmos que utilizan estos métodos son los de Búsqueda Tabú (TS) o el Recocido Simulado (SA).

La Búsqueda Tabú aparece en la literatura en los años de 1977 por trabajos realizados por Glover. Es una técnica basada en inteligencia artificial que ayuda a resolver problemas combinatorios de mucha complejidad. Este método intenta generar una estrategia de búsqueda para evitar caer en óptimos locales con un concepto de memoria a corto y largo plazo, el cual trata de obtener información histórica y generar acciones sobre esta, para tener un aprendizaje y mejorarla. Se enfoca en trabajar una lista llamada Tabú que son las opciones visitadas anteriormente y que no cumplen cierto requerimiento con el objetivo de eliminarlas y evitar además que el algoritmo se cicle.

El Recocido Simulado fue propuesto en el año de 1983 por Kirpatrick, Gelatt y Vecchi. Creado según la analogía del comportamiento de un sistema físico al inducirlo a cambio de temperatura que lo convierte en una técnica muy útil para salir de óptimos locales. Este método se fija con una temperatura inicial alta que indica una probabilidad alta de aceptar un movimiento de no mejora y en cada iteración se va reduciendo la temperatura y las probabilidades de igual manera, lo que ayuda a acercarse a la solución óptima. Aunque existen nuevas investigaciones que trabajan en que la probabilidad no dependa de la iteración sino más bien de lo que sucede en cada búsqueda. Uno de los trabajos que utiliza esta técnica para la resolución del VRP con flota heterogénea es el realizado por Jorge Pemberthy de la Universidad Nacional de Colombia en 2012 sobre la Implementación de un algoritmo metaheurístico para la solución de un problema de programación de transporte terrestre internacional.

#### 2.2.4 GRASP

La metaheurística Greedy Randomized Adaptative Search Procedures construye soluciones de gran calidad en sus dos fases de procesamiento; la fase de construcción y la fase de mejora. El procedimiento Greedy o miope intenta conseguir con el tratamiento de varias iteraciones conseguir la mejor solución posible. La parte aleatoria del algoritmo implica que precisa de valores de entrada o de un generador de números aleatorios a ser procesados y generar una respuesta. Y en el concepto de adaptativo requiere de la necesidad de incorporar cambios dinámicos durante el procesamiento de la solución. Haciendo enlace con los métodos lineales, en la fase de construcción se busca soluciones factibles y en la fase de mejora intenta buscar el óptimo.

Aunque existe previamente una etapa de pre-procesamiento que al utilizarla puede ayudar a reducir el tiempo de proceso de la parte constructiva, la misma que consiste en definir ciertas sub estructuras que forman parte de la solución óptima y sirve como inicio para encontrar soluciones más diversificadas para la siguiente etapa.

Para la construcción de la solución factible se debe definir la función o metodología miope que elija el mejor movimiento posible en cada iteración. La elección de cada elemento se realiza de forma aleatoria entre los mejores construyendo así una Lista de Candidatos Restringida que satisfaga una cierta regla o parámetro que afecte a la función objetivo a llegar a su meta. En definitiva la construcción de la solución no es totalmente aleatoria ya que depende de la cantidad de restricciones que deba cumplir la solución. Las soluciones deben encontrarse de manera rápida, en la medida de lo posible, generando soluciones aceptables sobre todo en problemas de ruteo. Para lo que puede usarse los algoritmos de inserción, o de ahorros que dan soluciones buenas si la complejidad del problema no es tan grande.

Luego estas soluciones deberían ser mejoradas en la fase de búsqueda posterior a la que se debe de incluir un criterio de parada para evitar que se cicle el algoritmo.

En la fase de mejora se puede aplicar un criterio de búsqueda local o de vecinos. De entre los cuales el método de intercambio propuesto por Or en el año de 1976 o los intercambios r-óptimos desarrollados por Lim en el año de 1965 o también por Lin & Kernighan en 1973 son buenos métodos para problemas simétricos. Aunque el método de Or puede ser utilizado también para problemas asimétricos. Or propuso restringir la búsqueda de intercambios a 3-intercambios en los que las cadenas de hasta 3 puntos consecutivos pueden ser colocadas entre otros dos puntos.

### **2.2.5 Algoritmo de Ahorros**

El algoritmo de Clarke & Wright es un método clásico de resolución para el problema de ruteo vehicular. Se basa en un concepto de ahorros que para lo cual define una matriz de distancias para cada par de ubicaciones a ser visitadas, en caso de que el costo de transporte entre dichos lugares no sea conocido. La distancia entre dos puntos si no es conocida puede ser definida según el método de manhattan o el euclidiano. Sean  $i$  y  $j$  un par de clientes con una distancia  $c_{i0}$  y  $c_{0j}$  del depósito a cada cliente respectivamente y  $c_{ij}$  la distancia entre cada uno. En el caso de que las entregas sean hechas de manera separada entonces la distancia será simétrica y corresponde a  $2c_{i0} + 2c_{0j}$  pero en el caso de que las entregas se puedan realizar en un mismo vehículo o combinadas en una sola ruta la distancia total sería  $c_{i0} + c_{0j} + c_{ij}$ , con lo cual el ahorro en distancias se calcularía mediante la fórmula  $S_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij}$ . Los ahorros son clasificados y los clientes que generan estos ahorros son elegidos para las rutas hasta que cumpla un criterio de capacidad o la cantidad máxima de clientes para una ruta. Existen alternativas paralelas y secuenciales, las cuales difieren de cada una en que la primera de ellas se pueden desarrollar varias rutas al mismo tiempo y en la segunda solo una ruta es generada a la vez. Aunque de este procedimiento existe un efecto que surge de la característica miope del algoritmo, que al encontrar una conexión entre las rutas no

se puede desvincular de la misma. Holmes and Parker desarrollaron en 1976 un algoritmo que ayudaría a trabajar esta desventaja, imponiendo restricciones temporales para los enlaces que ofrecen grandes ahorros, pero que se supone afectara a los futuros enlaces consiguientes. Aunque esta técnica da buenos resultados no es tan llamativa por el gran esfuerzo computacional que implica.

El método de ahorro genera gran velocidad y simplicidad ya que es sencillo de programar, aunque su resultado para alcanzar el óptimo sea muy complejo para ejercicios con grandes datos. También dependiendo de la cantidad de restricciones que se empiecen a introducir la solución podría irse alejando mucho más del óptimo.

Gaskell en el año de 1967 vio la importancia de ajustar la distancia entre clientes, añadiendo un parámetro  $\lambda$  en la fórmula para calcular los ahorros, que mientras este parámetro tenía un valor mayor que cero, hacía referencia a darle mayor énfasis en la distancia entre clientes más que en la distancia entre depósito al cliente. Por lo que la fórmula quedaría de la siguiente manera  $S_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - \lambda c_{ij}$ . Luego de esto la cuestión era conocer cuál es el valor necesario que debía tomar este parámetro. McDonald en el año de 1972 demostró que con cualquier valor fijo para el parámetro se podían obtener resultados lejanos al óptimo y que no existía ningún valor significativo que otro. De ahí en adelante se han formulado nuevas funciones de ahorros incorporando parámetros para distancia entre clientes y la distancia entre depósitos. También fórmulas en las que se incluye la demanda del cliente añadiendo un parámetro adicional, para lo cual se debe determinar la mejor combinación de parámetros que en este caso se ha visto una mejora considerable respecto al método original. Este último método se puede usar en conjunto con Metaheurística como algoritmos genéticos, una aplicación de estas fue desarrollada por Batarra en el año de 2008, los cuales daban resultados similares al método en el cual incluía la demanda en la función y con mejores resultados y tiempos operacionales menores. Se ha estudiado extensivamente variantes al método original; Nelson en el año 1985, Paessens en 1988, Altinkemer y Gavish en 1991, Wark y Holt en 1994 y Reimann en 2004 obteniendo buenos resultados para un problema basado en la realidad actual.

El algoritmo de ahorros aplicado al problema de ruteo de flota heterogénea fue trabajado en primera instancia por Golden en 1984. En donde se extendió el concepto de ahorros para incluir el costo fijo del vehículo. El costo total de un subtour se considera como la suma de los costos de la ruta más el costo del vehículo usado. También se toma en cuenta la misma suma cuando se crea una ruta grande a partir de dos subtour. Lo que se debe de tomar en cuenta a la hora de unificar dos subtour en una ruta grande se debe elegir el subtour que genere el mayor ahorro. Al combinar los costos fijos con la demanda que debe llevar para un cliente en específico la fórmula del ahorro se desglosa de la siguiente manera, siendo en este caso la unión de los clientes  $i$  y  $j$  los puntos finales de los subtour  $I$  y  $J$  respectivamente:  $S_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij} + F(p_i) + F(p_j) - F(p_i + p_j)$  y el costo fijo de la demanda se denota por  $F(p)$  y las demandas de estos subtour son  $p_i$  y  $p_j$ . Como el método normal, los ahorros deben de ser calculados en cada iteración. Este método se denomina Ahorros Combinados o (CS). Luego se desarrolló el método de Ahorros Combinados Adaptado, en el cual se diferencia del original en que considera la carga de un vehículo y la máxima capacidad del mismo, específicamente evalúa la diferencia del costo fijo del vehículo capaz de llevar la carga de una ruta antes y después de insertar un cliente a la misma. El método del Ahorro Optimista de Oportunidad Adaptado se basa en restar el costo fijo del vehículo más pequeño que puede ser utilizado para la capacidad restante. Y el método de Ahorro Realista de Oportunidad Adaptado se basa en tomar como ahorros de oportunidad al costo fijo del vehículo pequeño más largo que puede ser utilizado en la iteración actual considerando que un nuevo cliente ha sido añadido a la ruta. De igual manera para el caso de unificación de rutas el mejor vehículo deberá ser utilizado.

Para el caso de estudio se elegirá el método estándar debido a que la flota de vehículos es contratada pero sus costos variables, es decir el flete a pagar por la cantidad de carga a llevar, se incluyen en la fase de mejora.

### **Capítulo 3. Metodología de Trabajo**

En el caso de estudio, el método de investigación base será de tipo proyecto factible, el cual según Arias, (2006, p. 134), indica: “Que se trata de una propuesta de acción para resolver un problema práctico o satisfacer una necesidad. Es indispensable que dicha propuesta se acompañe de una investigación, que demuestre su factibilidad o posibilidad de realización”.

El desarrollo de un plan de trabajo y una metodología de investigación, permite una mejor organización y estructuración del estudio y a su vez ayuda a determinar los intervalos de tiempo que llevaría cada proceso o tarea ser realizada. En relación con este punto, lo que se refiere a la distribución de tareas y sub tareas, siendo éstas subsiguientes de manera analítica, algunas de estas pueden realizarse de manera simultánea y otras no, mismas que son detalladas a continuación:

Como ingreso de información se tiene el planteamiento del problema, que engloba la problemática que presenta la empresa dedicada en este estudio, junto con la recopilación y análisis de los datos, para según estos detectar cuáles son las causas raíces que originan el efecto actual. Luego en el tema de investigación, se desglosan las tareas de definición del tema a estudiar, investigación detallada y métodos de resolución para el escenario planteado. Además como tarea global y uno de los hitos más relevantes, es el desarrollo como tal, que implica el modelado del algoritmo, sus respectivas calibraciones y análisis previo de los resultados preliminares obtenidos y finalmente la documentación de las conclusiones y resultados finales. Cabe recalcar que dentro de cada una de estas tareas se tiene previsto documentar los hallazgos e investigaciones a la par de la realización de las mismas.

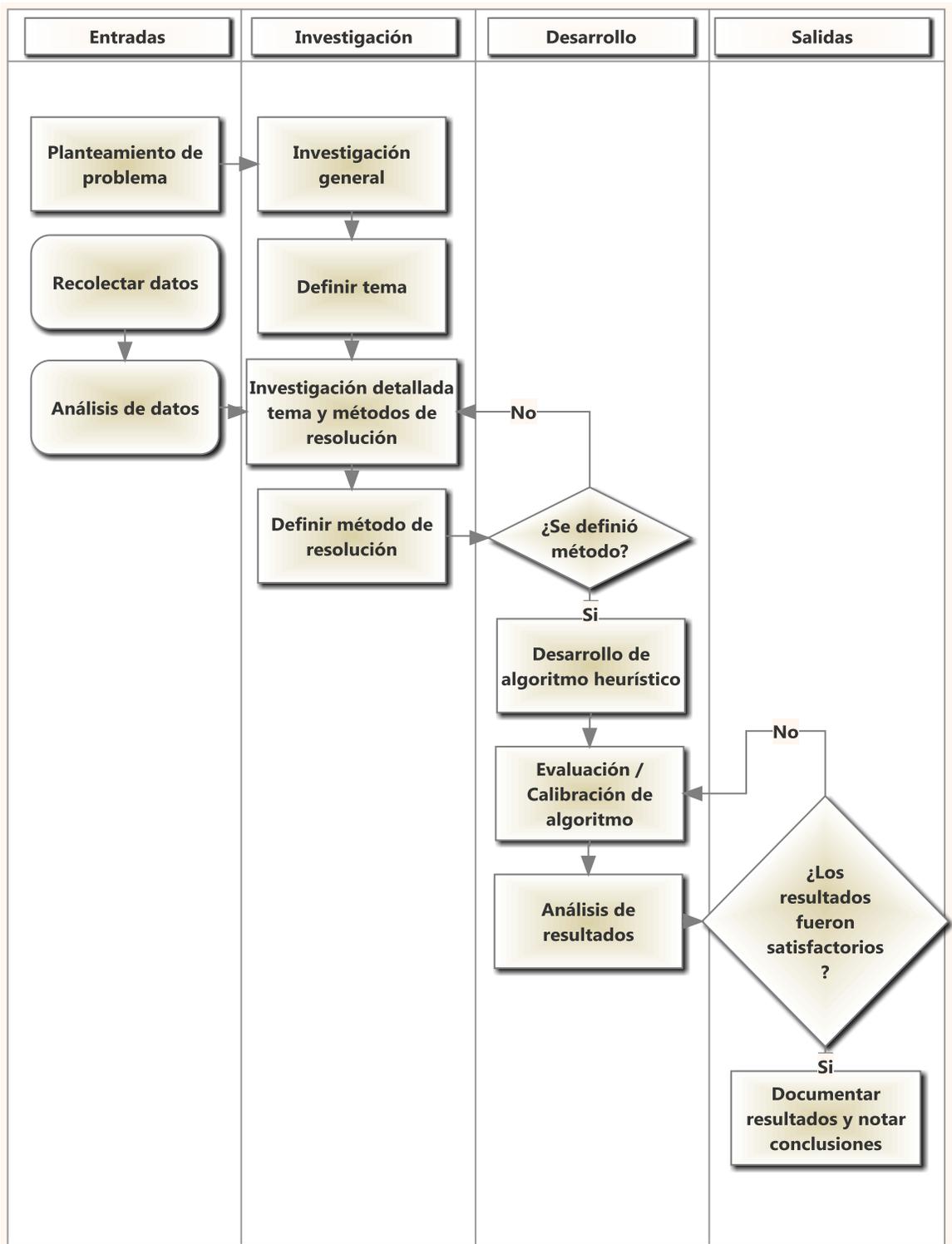


Figura 3.1 Flujograma de actividades

Según el diagrama presentado anteriormente se tiene fijado el siguiente cronograma de trabajo:

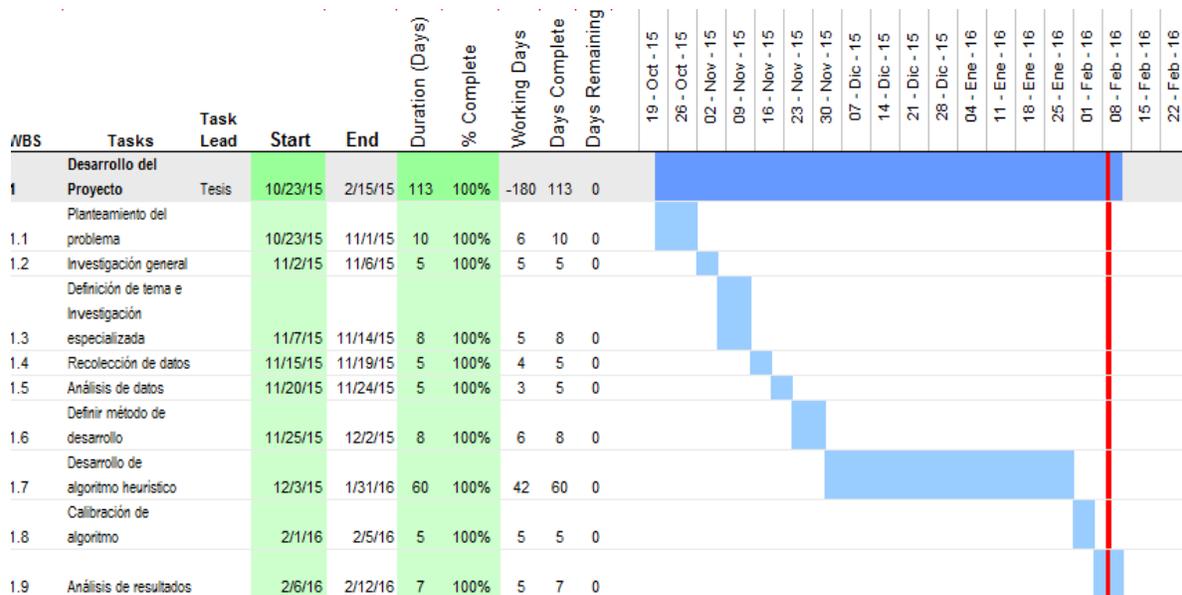


Figura 3.2 Diagrama de Gantt de cronograma de trabajo

El diseño de la investigación será de tipo documental y de campo. Documental debido a sus bases que están fundamentadas en artículos e investigaciones de diferentes autores, las cuales provienen de documentos escritos y de Campo ya que los datos son obtenidos de la situación real donde se producen.

Se realizó un muestreo cuantitativo con base a reportes del área de planificación para el canal de distribuidores y mayoristas de la parte sur del país debido a su frecuencia de ingreso de pedidos y de entregas.

La población del presente proyecto de estudio es la empresa indicada, sin embargo, dentro de la misma existen procesos a quienes el grado de afectación del problema es mayor, los cuales se muestran a continuación:

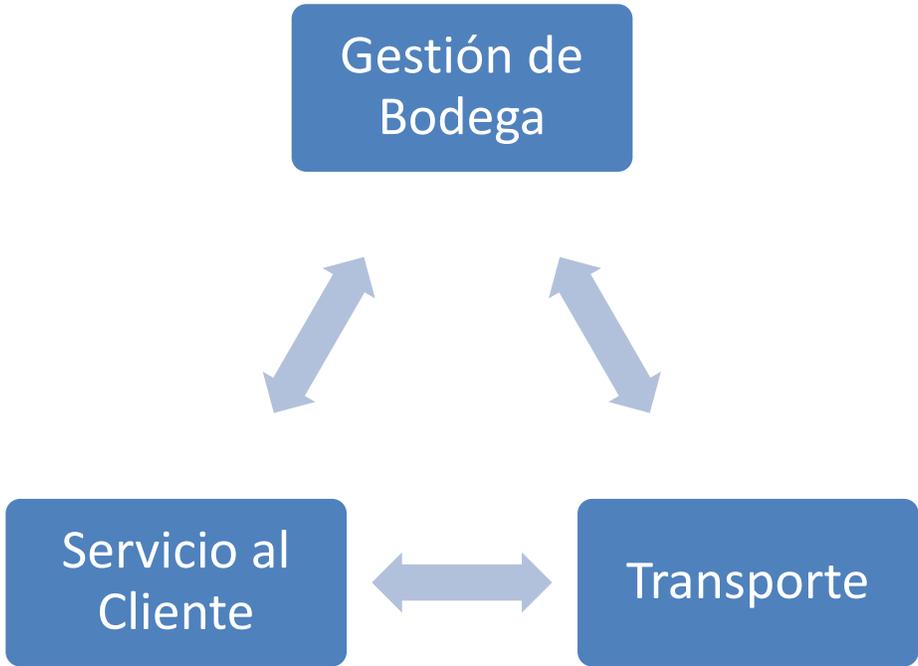


Figura 3.3 Áreas Involucradas en el proceso de Planificación de Carga

En cuanto al área de transporte, que es quien genera los procesos de planificación de carga y al área de gestión de bodega, encargados de los despachos directo a los vehículos asignados por transporte, la línea de proceso que describe lo indicado se muestra a continuación:



Figura 3.4 Proceso de Despachos de pedidos

La empresa en mención en sus operaciones no posee una restricción de ventanas de tiempo duras sino más bien flexibles en la medida de que la entrega debe de realizarse dependiendo del cliente entre 24 y 48 horas una vez ingresado el pedido. Por lo general la entrega a 48 horas aplica en las zonas foráneas que son las que no corresponde a Guayas. La restricción normal de ventanas de tiempo no es tan aplicable en este caso ya que no se tiene definido un acuerdo de recepción para horarios específicos entre la empresa y el cliente. Solo se define una ventana de tiempo de llegada del camión, dependiendo del cliente, muy amplia. Y el tiempo de recepción por cliente conlleva mucha incertidumbre inclusive para entregas por ruta.

Los procesos involucrados en la actividad de planificación de la distribución son las áreas de Servicio al cliente, Control de Stock, Transporte y Bodega. El planificador de la distribución visualiza en el sistema los pedidos que están listos para el procesamiento luego de que se ha ingresado el pedido y que se ha confirmado su liberación. Posterior a esto se genera la ruta con un número de entrega en SAP, según la capacidad que el vehículo pueda soportar y dependiendo de la cantidad de pedido solicitado por el cliente. Luego esta información la visualiza el personal de Bodega para su procesamiento y posterior despacho físico de la mercadería.

El método heurístico se va a identificar según su operación de distribución que modelo se ajusta de mayor manera para proceder a su modelización. Previo a esto se definirá el grupo de clientes o canal de distribución a aplicar la metodología y posteriormente se desarrollará la meta heurística.

## **Capítulo 4. Modelización del proyecto**

### **4.1 Introducción**

Para resolver el problema de ruteo vehicular con flota heterogénea existen diversos métodos para su desarrollo, desde algoritmos exactos hasta métodos heurísticos y Metaheurísticos que otorgan una solución cercana al óptimo en un tiempo de ejecución aceptable. A continuación se detalla cada uno de los componentes del algoritmo indicado para resolver la instancia del HVRP, realizado con una versión reciente de Wolfram Mathematica, 10.3.

### **4.2 Desarrollo del algoritmo**

Como se explicó anteriormente, para el caso de estudio de la planificación de la distribución de la empresa de distribución de productos de consumo masivo se ha elegido desarrollar un algoritmo basado en la metodología GRASP para el HVRP. Por lo que se procederá a definir los componentes principales del algoritmo para su posterior desglose:

- a) Determinar la solución inicial ( Lista de candidatos)
- b) Generar una Lista de Candidatos Restringida con los mejores candidatos.
- c) Seleccionar un elemento de la Lista de Candidatos Restringida aleatoriamente. Y repetir proceso hasta conseguir la solución de partida.
- d) Aplicar Búsqueda Local con Intercambio k-opt, este proceso deberá realizarse hasta que no se pueda mejorar más la solución.
- e) Si la solución obtenida mejora a la solución que estaba almacenada se deberá de actualizar.

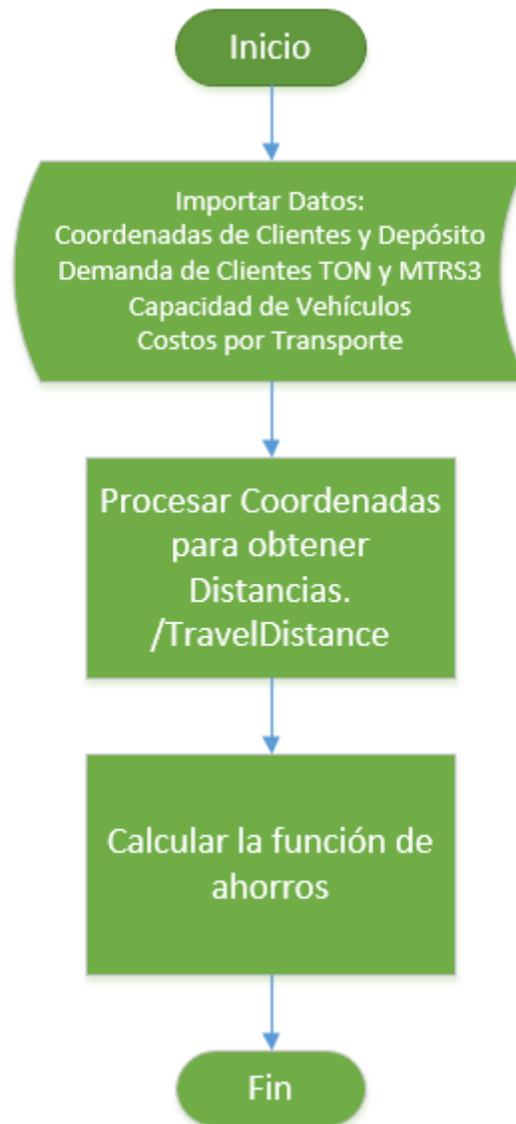


Figura 4.1 Diagrama de flujo de ingreso de datos y cálculo de función de ahorros

En forma de pseudocódigo se puede detallar de la siguiente manera:

Procedimiento GRASP [Número de Iteraciones, Semilla]

Mejor solución = 0

Para k=1 hasta Número de Iteraciones

$S^S$  = Construcción de Solución Inicial (Semilla)

$S^L$  = Búsqueda Local

Si Valor de ( $S^L$ ) < Valor de (Mejor Solución) entonces

Mejor Solución =  $S^L$

Fin Si

Actualizar Mejor Solución

Fin Para

Fin

### 4.3 Solución inicial

Para determinar la solución inicial del algoritmo se va a aplicar versión estándar de la heurística de ahorros de Clarke & Wright. Adaptando al escenario real, esta heurística tiene la misma estructura de la versión generalizada con la diferencia en que se considera la capacidad de carga del vehículo y la máxima capacidad del mismo en peso y volumen.

En las siguientes líneas se detallara el algoritmo mencionado.

- 1) Construcción de rutas y cálculos de los ahorros: Se crean  $N$  rutas de la forma  $(0, i, 0)$  para  $i=1, 2, \dots, N$  y luego se calculan los ahorros con la fórmula de  $S_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij}$  para todo  $i, j=1, 2, \dots, N$  en donde  $i \neq j$  y luego se inserta en la lista de ahorros.
- 2) Existen dos versiones del método constructivo, una paralela y otra secuencial, la cual difiere en el segundo paso que se muestra a continuación:
  - a. Versión paralela: Elección de la mejor solución para combinar rutas: Partiendo del valor más alto de los ahorros. Dado  $S_{ij} = \text{MAX}[\text{lista de ahorros}]$ . Y las rutas  $R_i$  y  $R_j$  donde se conoce que el mayor ahorro se puede generar se debe verificar si existe la posibilidad de que las rutas puedan ser combinadas y si una ruta inicia con el arco  $(0, j)$  y la otra termina en  $(i, 0)$ . En caso de que sea factible las rutas deben ser eliminadas de la lista de ahorros, eliminando los arcos indicados y añadiendo el arco  $(i, j)$ .
  - b. En la versión secuencial, se considera una ruta de la forma  $(0, i, \dots, j, 0)$  para lo cual se busca el primer ahorro factible que permita la unificación de dos rutas  $(i, 0)$  o  $(0, j)$ . Luego se realiza la unión y se repite la iteración para la ruta actual. Si para la ruta actual no es factible continuar con la unificación de rutas se deberá pasar a la siguiente repitiendo la misma actividad hasta cuando no exista unificación factible.

3) Verificar si la lista de ahorros ha quedado vacía para detener el algoritmo.

Adicionalmente en la fase constructiva se debe considerar que la capacidad de los vehículos estará representada por un vector, con datos referentes al tonelaje y al metraje según la muestra de vehículos, por lo que será una restricción variable que puede estar sujeta a cambios en cada fase del GRASP. En el algoritmo capacitado original con flota homogénea, sólo se considera una capacidad vehicular para que el resultado genere cierta cantidad de rutas sin tomar en cuenta si existe inclusive restricción en cantidad de recursos a usar.

El ejemplo de cómo se verá el proceso del Clarke & Wright se muestra a continuación, la figura fue tomada del documento de Métodos exactos y Heurísticos de Fernando Sandoya:

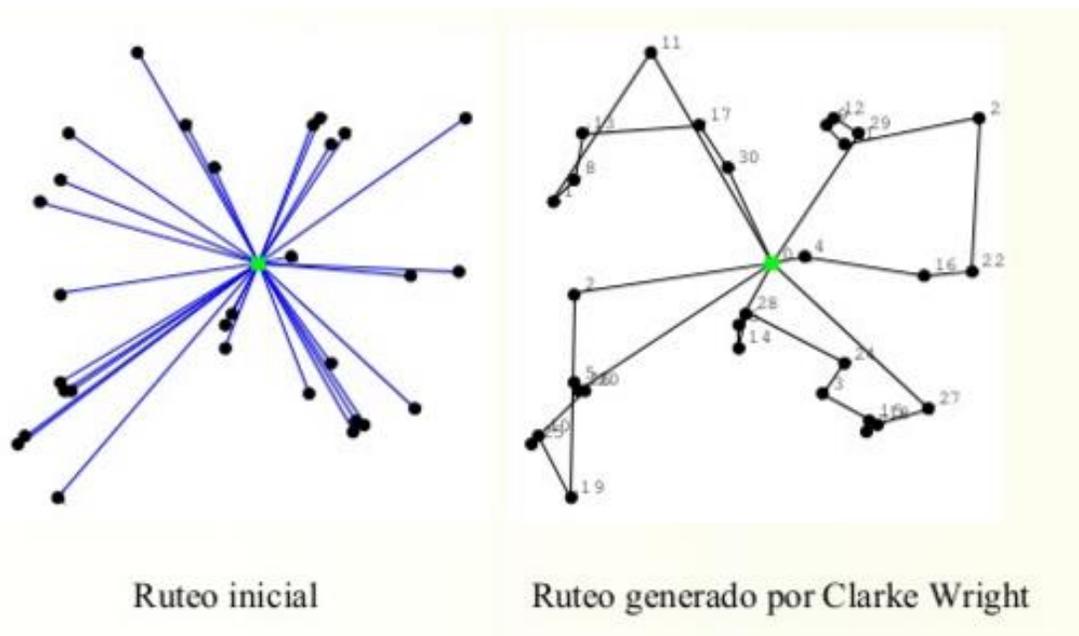


Figura 4.2 Proceso de Generación de Rutas con Clarke & Wright

Para el caso de estudio se detalla una flota de 24 vehículos de diferentes capacidades de arrastre que formarán parte de la restricción de flota heterogénea y limitada.

VHNO.	TON.	MTS.
1	3	10
2	5	20
3	5	20
4	5	20
5	6	24
6	6	24
7	8	30
8	8	30
9	8	30
10	8	30
11	8	30
12	8	30
13	10	34
14	10	34
15	10	34
16	10	34
17	12	40
18	12	40
19	20	60
20	20	60
21	30	70
22	30	70
23	30	70
24	30	70

Tabla 4.1 Información de capacidades de Vehículos (muestra) de la flota de la empresa de estudio

#### 4.4 Lista de Candidatos Restringida y Búsqueda Local

La Lista de candidatos restringida se determina con la solución del algoritmo constructivo en la primera fase, conociendo el beneficio asociado a cada uno de los elementos que se han incluido en el resultado. Es decir que la lista de candidatos restringida incluirá solo los elementos con mejor beneficio según el criterio de la función de optimización. En este caso, se puede restringir la lista definiendo una  $\alpha$  fija o variable. Esta  $\alpha$ , para el caso del VRP implica que se defina una cantidad específica de clientes o nodos del global de clientes de la lista de candidatos inicial. Por lo que si se define un valor de  $\alpha=6$ , por ejemplo, serán estos clientes del grupo restringido, los que luego serán elegidos de manera aleatoria para ser introducidos en la ruta. El GRASP es de esta manera, una de ellas, en las cuales introduce el componente aleatorio.

Para poder definir el componente  $\alpha$ , se puede definir un criterio específico que puede depender del algoritmo constructivo en este caso elegido. Para el algoritmo de Ahorros, no se quiere perder totalmente la esencia del Clarke & Wriqth, por lo que se elegirá un  $\alpha$  de la lista de ahorros, ordenada de mayor a menor.

Otra manera de restringir la lista de candidatos, sin necesidad de cambiar toda la estructura del algoritmo, es introducir un número aleatorio en la función de ahorros. Esta opción permite que se exploren posibles soluciones malas respecto al ahorro determinado, que sin embargo será mejorada en la siguiente fase aunque pierda un poco el esquema original del algoritmo constructivo.

Luego de creada la LCR y tomado un elemento de manera aleatoria, se procede a introducirlo a la ruta y a continuar con el procedimiento

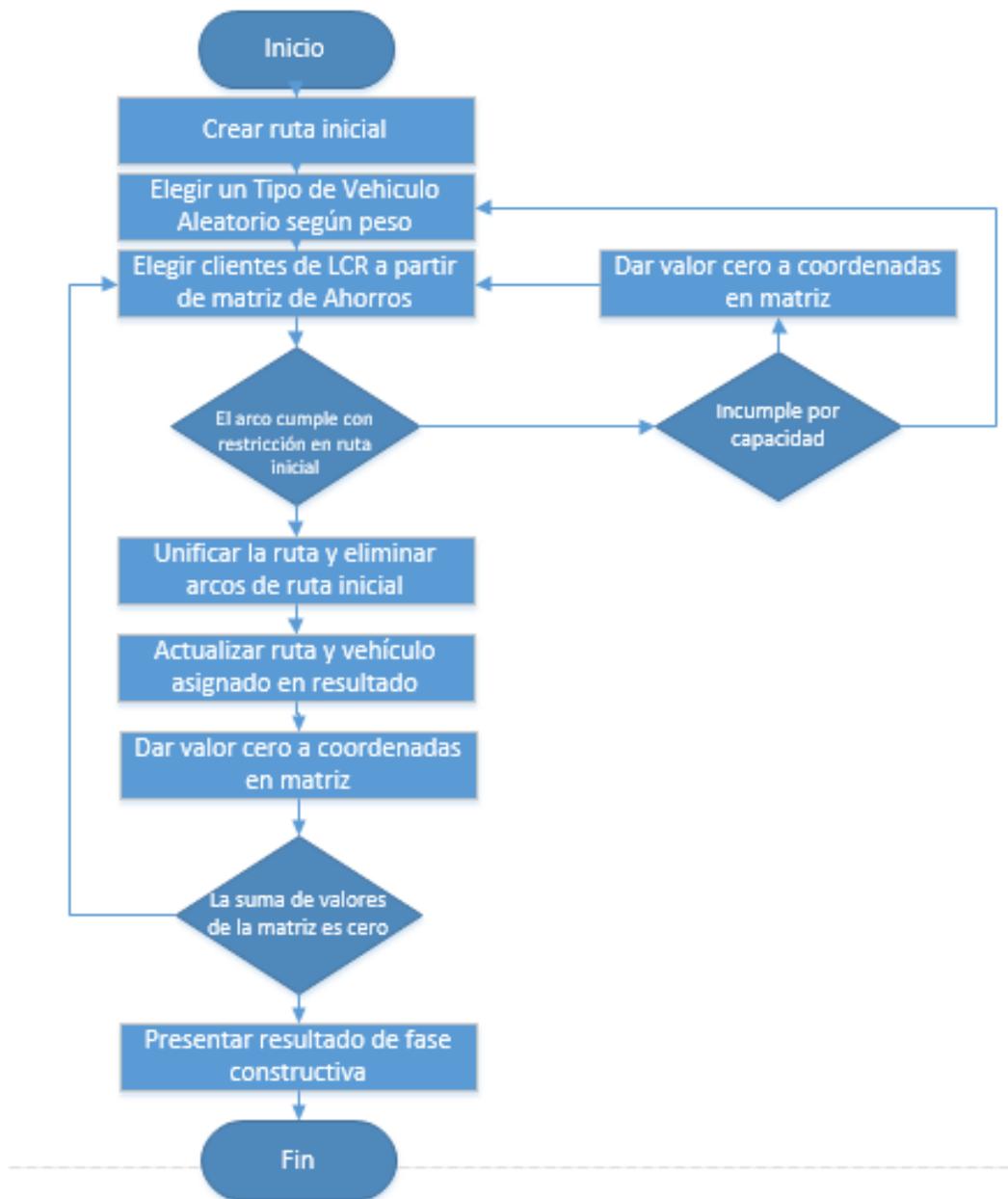


Figura 4.3 Diagrama de flujo de fase constructiva

Luego de obtener el resultado constructivo, es decir, un conjunto de rutas con sus respectivos vehículos asignados. Se procede a buscar una mejor solución con el método de intercambio de nodos, la cual sería parte de la fase de mejora del GRASP.

En este caso se intentaría buscar mejoras al intercambiar nodos de la misma ruta ya que poseen un vehículo asignado y se evita deshacer toda la solución obtenida. Se basa en el concepto de que si existe un ciclo Hamiltoniano que se cruza a sí mismo, puede ser reducido en su extensión, eliminando las aristas que se cruzan y volver a conectar los caminos resultantes uniendo con aristas que no se corten. El resultado debe ser un ciclo sin cruces y más corto que el inicial.

Existen diferentes procedimientos de intercambio en el cual difieren de la cantidad de nodos a intercambiar. El procedimiento 2-opt el cual consiste en eliminar dos aristas y conectar los caminos resultantes de tal manera que se pueda obtener un nuevo ciclo.

En forma de pseudocódigo se puede detallar de la siguiente manera:

#### Procedimiento 2-opt

Inicio

Se considera un ciclo Hamiltoniano inicial

band=0

Mientras (band=0)

Definir todos los vértices como sin explorar

Mientras (Existan vértices por explorar)

Seleccionar un vértice que no se haya explorado

Examinar todos los movimientos 2-opt que incluyan a la arista seleccionada.

Si alguno de los movimientos que han sido examinados reduce la longitud del tour, elegir el mejor de todos. band=1

Sino definir como explorado al vértice.

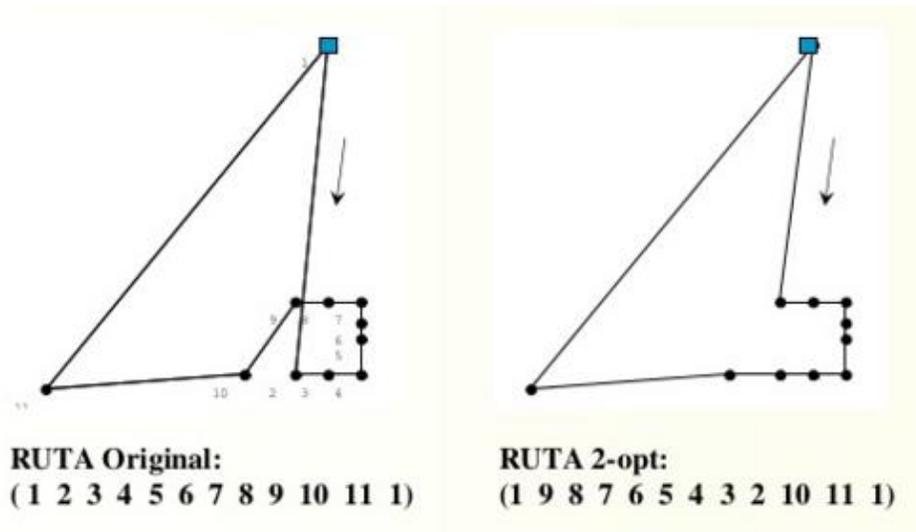


Figura 4.4 Ejemplo de Intercambio 2-opt.

La figura muestra un ejemplo de cómo funciona un intercambio 2-opt, la figura fue tomada del documento de Métodos exactos y Heurísticos de Fernando Sandoya.

Cuando se realiza un movimiento existen muchas posibilidades de encontrar movimientos de mejora que estén enlazados a los nodos candidatos a examinar. Por lo que el orden en el que el procedimiento evalúa a los nodos puede incidir en el resultado. Por ende es una buena opción considerar una lista de candidatos cuyo orden sea aleatorio para que en cada iteración se considere el primero de la lista de nodos candidatos. Cuando se examina un vértice se lo coloca al final de la lista de dejando a los vértices sin explorar al inicio de la misma.

Considerando que es probable de que la cantidad de iteraciones sea alta, podría interrumpirse al cumplir cierto número de iteraciones para evitar un aumento en el tiempo de desarrollo. Esta implementación puede depender del tamaño del problema.

El procedimiento de k-opt consiste en dividir el camino en K partes para combinarlos de la mejor manera posible. El caso más usado es el del k=3.

Una versión del algoritmo 3-opt limitada es el algoritmo Or-opt, el cual consiste en eliminar una secuencia de  $k$  clientes consecutivos de la ruta y colocarlos en otra posición de la misma ruta, con la condición de que sigan el mismo orden y consecuentes esto a través del intercambio de tres arcos en la ruta original por otros tres arcos sin modificar la orientación de la ruta. La idea es realizar primero movimientos con  $k = 3$ , luego con  $k = 2$  y finalmente con  $k = 1$ . Este procedimiento será usado para el estudio. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de cómo funciona el procedimiento del Or-Opt, la misma pertenece al trabajo de Joaquín A. Pacheco, C. R. (1999).

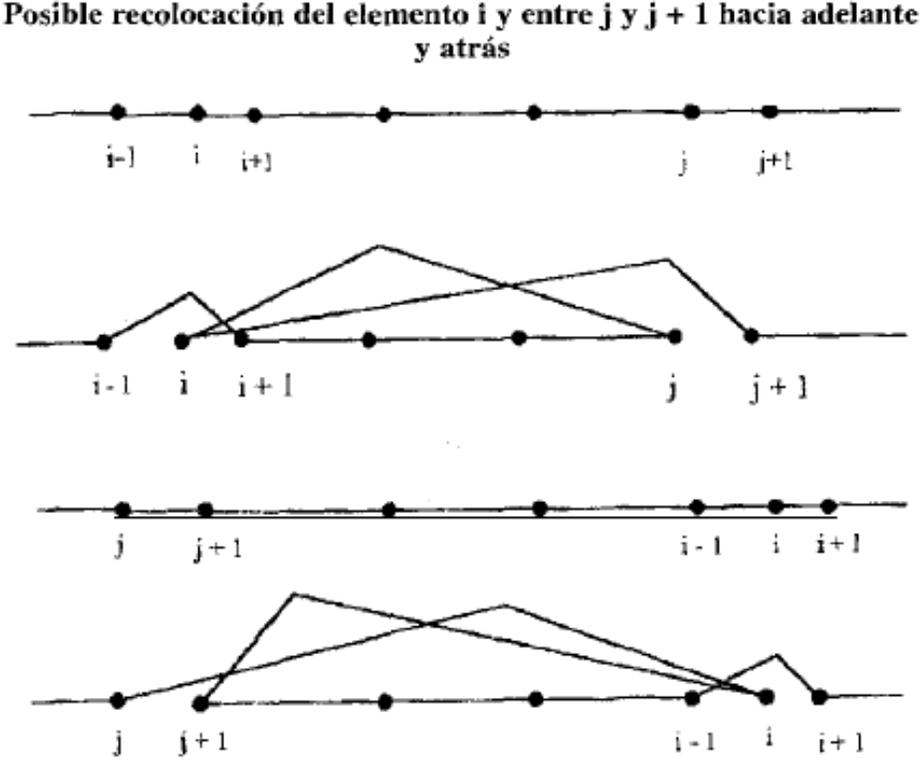


Figura 4.5 Posible recolocación del elemento  $i$  y entre  $j$  y  $j+1$  hacia adelante y atrás

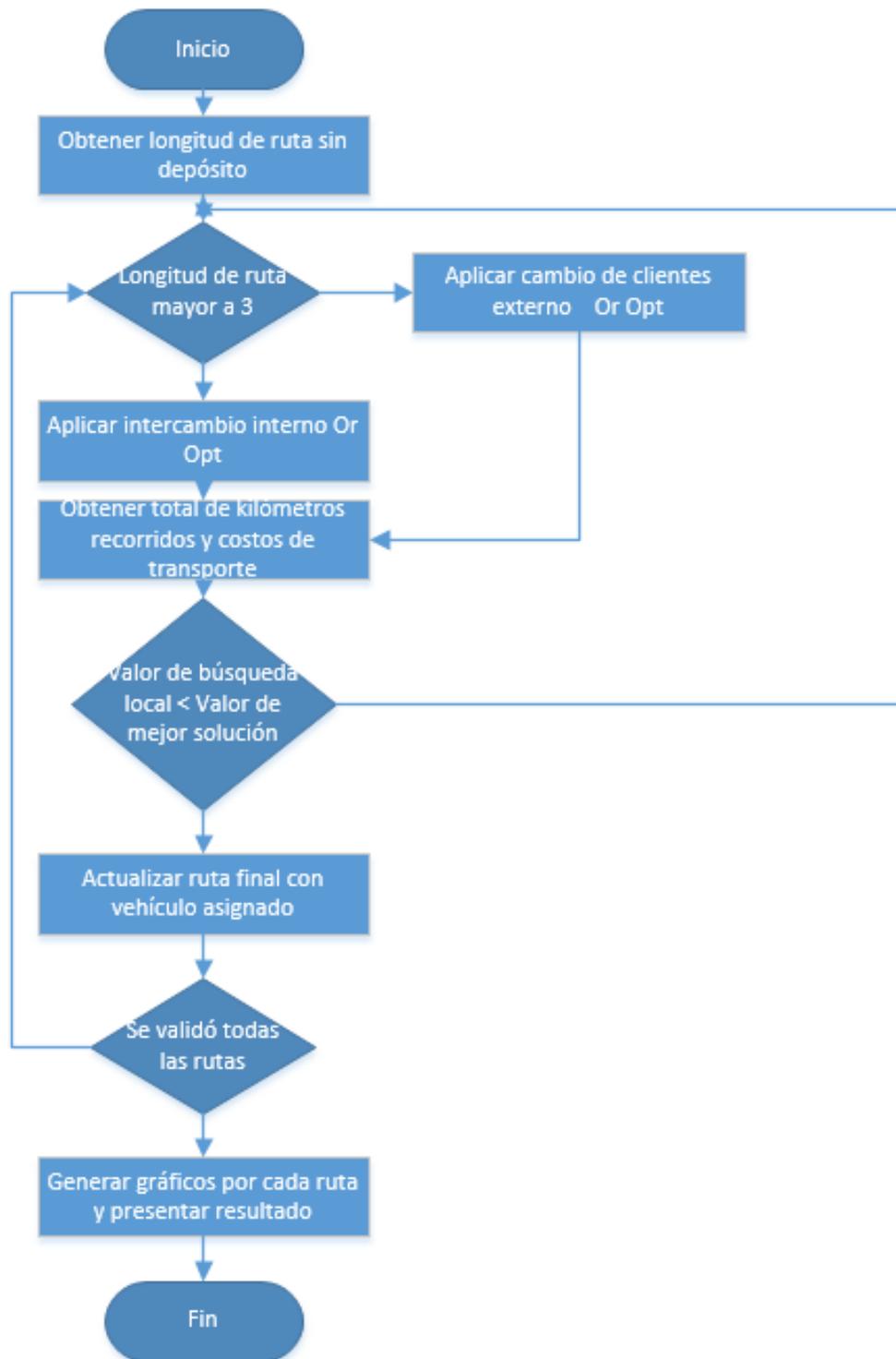


Figura 4.6 Diagrama de flujo de fase de mejora

#### 4.5 Resolución del caso de estudio

Para comprobar el resultado del algoritmo diseñado se usaron los datos de capacidades, demandas, vehículos y costos que la empresa de estudio mantiene al momento. Este fue implementado en Wolfram Mathematica 10.3 en una laptop DELL Intel® Core i-5, 1.70GHz, 8GB RAM.

Los clientes a analizar son de la ruta de El Oro, que posee un gap promedio del 9,5% respecto al costo de impacto calculado hasta septiembre de 2015, de la gráfica presentada en el capítulo 1, es el cuarto mayor contribuyente en gasto pero tiene más clientes y una mayor frecuencia de entrega que los 3 primeros sectores.

La información de los pedidos ingresados no tiene una cantidad fija ni por cliente ni por producto por lo que este lote de un día de planificación se considera como la muestra a usar, en donde se añade la información del depósito.

Cliente	No. Ruta	Latitud	Longitud	Toneladas	Metros
Depósito 1	1	-2,1188	-79,9325	0	0
Cliente # 3	2	-3,24531	-79,8334	1,7	4,1
Cliente # 4	3	-3,24573	-79,8329	2,1	3,45
Cliente # 5	4	-3,2467	-79,8337	2	1,3
Cliente # 6	5	-3,24224	-79,8291	5	12
Cliente # 7	6	-3,2467	-79,8337	2,5	4,5
Cliente # 13	7	-3,25634	-79,9559	1,1	4,9
Cliente # 14	8	-3,25773	-79,9567	0,8	2,5
Cliente # 15	9	-3,25882	-79,9568	1,5	0,9
Cliente # 16	10	-3,25773	-79,9567	0,7	3,8
Cliente # 17	11	-3,25773	-79,9567	0,29	1

Tabla 4.2 Lote de planificación con información de clientes



Figura 4.7 Densidad de Clientes en El Oro

Analizando la información de los clientes, respecto a los días de visita y entrega, se evidencia de que la frecuencia de visita a cada cliente y zona implica una mayor frecuencia de ingreso de pedidos:

<b>Cliente</b>	<b>Región El Oro</b>	<b>Día de Visita a clientes</b>	<b>Día entrega</b>	<b>Hora de entrega</b>
1	Arenillas	Miércoles	Lunes A Viernes	de 7:00am a 16:00pm
2	El Guabo	Jueves	Lunes-Martes-Jueves- Viernes	de 7:00am a 16:00pm
3	El Guabo	Jueves	Lunes-Martes-Jueves- Viernes	de 7:00am a 16:00pm
4	El Guabo	Jueves	Lunes-Martes-Jueves- Viernes	de 7:00am a 16:00pm
5	El Guabo	Lunes	Jueves	de 13h00pm a 14h00pm
6	El Guabo	Jueves	Lunes-Martes-Jueves- Viernes	de 7:00am a 16:00pm
7	Huaquillas	Viernes	Lunes A Viernes	de 7:00am a 16:00pm
8	Huaquillas	Viernes	Lunes A Viernes	de 7:00am a 16:00pm
9	Huaquillas	Viernes	Lunes A Viernes	de 7:00am a 16:00pm
10	Huaquillas	Viernes	Lunes A Viernes	de 7:00am a 16:00pm
11	Huaquillas	Viernes	Lunes A Viernes	de 7:00am a 16:00pm
12	Machala	Lunes	Lunes A Viernes	de 7:00am a 16:00pm
13	Machala	Lunes	Lunes A Jueves	de 7:00am a 16:00pm
14	Machala	Martes	Lunes A Viernes	de 7:00am a 16:00pm
15	Machala	Martes	Lunes-Martes-Jueves- Viernes	de 7:00am a 16:00pm
16	Machala	Martes	Lunes-Martes-Jueves- Viernes	de 7:00am a 16:00pm
17	Pasaje	Jueves	Lunes A Jueves	de 7:00am a 16:00pm
18	Pasaje	Jueves	Lunes A Viernes	de 7:00am a 16:00pm
19	Piñas	Miércoles	Miércoles	de 13h00pm a 14h00pm
20	Santa Rosa	Miércoles	Lunes A Viernes	de 7:00am a 16:00pm
21	Santa Rosa	Miércoles	Lunes A Viernes	de 7:00am a 16:00pm

Tabla 4.3 Información de clientes de El Oro.

Por lo que la frecuencia de entregas a la zona de El Oro se da en promedio 4 días a la semana:

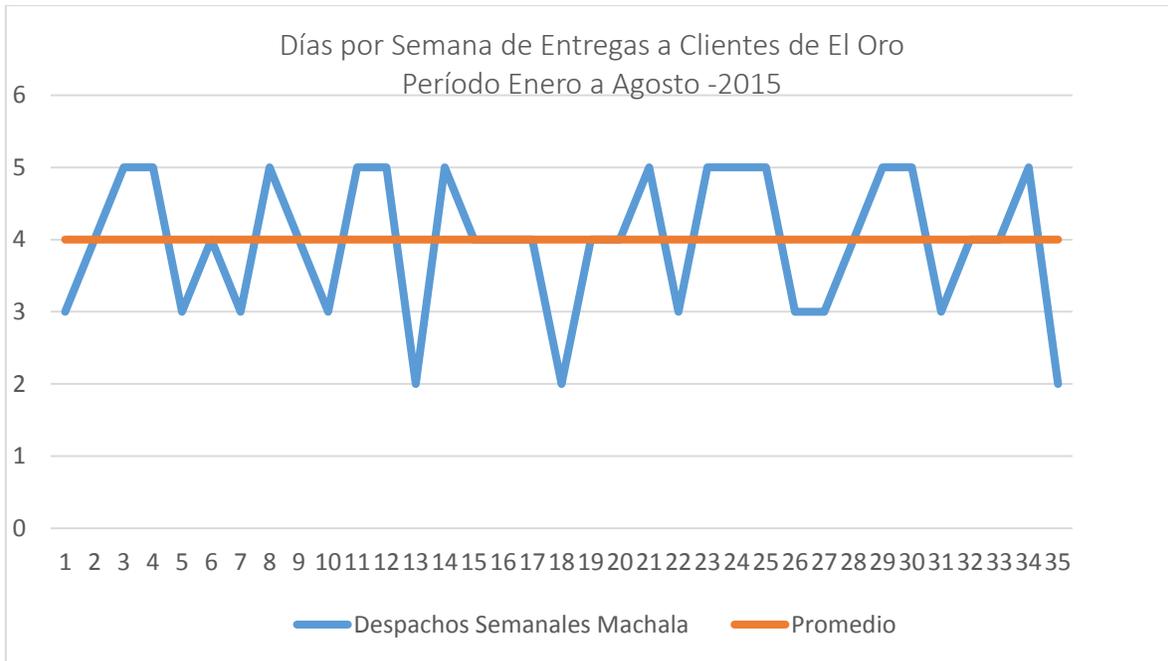


Gráfico 4.1 Frecuencia de atención semanal a clientes de El Oro durante el primer semestre del 2015.

Esto también puede implicar que en muchos de los casos, las entregas no sean efectivas debido a que, por tiempos de recepción en cliente, no se llegue a todos los clientes de la ruta. Por lo que se propone un calendario de visitas zonificado a fin de que el proceso pueda ser más fluido.

Región El Oro	Día de Visita a clientes
Arenillas	Lunes
Huaquillas	Lunes
Santa Rosa	Martes
Piñas	Martes
El Guabo	Miércoles
Pasaje	Miércoles
Machala	Jueves

Tabla 4.4 Calendario de Visitas a Clientes Propuesto

El problema se lo plantea como estándar con la función de ahorros referente a las distancias entre clientes y en la fase de mejora se aplica una validación entre rutas respecto al costo de transporte por cada tonelada cargada en el vehículo que tiene asignada cierta ruta.

Los costos asignados para la ruta de El Oro por tonelaje de carga asignada son los siguientes:

Rango	De 0,1 a 2 Ton	De 2,1 a 3Ton	De 3,1 a 4 Ton	De 4,1 a 5 Ton	De 5,1 a 6 Ton	De 6,1 a 7 Ton	De 7,1 a 8 Ton	De 8,1 a 9 Ton	De 9,1 a 10 Ton	De 10,1 a 11 Ton	De 11,1 a 12 Ton	De 12,1 a 13 Ton	De 13,1 a 14 Ton	De 14,1 a 15 Ton	De 15,1 a 20 Ton	De 20,1 a 25 Ton	De 25,1 a 30 Ton
Guayaquil-Machala	219,22	219,22	60,92	55,95	45,22	38,06	34,80	32,62	30,45	29,36	28,27	28,27	27,19	26,10	25,01	27,19	23,23

Tabla 4.5 Costos por ruta de El Oro y capacidad de carga asignada

Cabe recalcar que en la tabla mostrada los dos valores hasta 3 toneladas cargadas para los clientes de la ruta El Oro son fletes fijos, mientras que los valores desde 3,1 a 30 toneladas, varían según la capacidad de carga.

El modelo tarifario de la empresa no se desglosa por cliente o por kilómetro por lo que la función de ahorros del C&W se define como estándar. No se considera el ejemplo con restricción de ventanas de tiempo debido a que para el escenario actual de la empresa, a pesar de tener en un 50% la información de los horarios de recepción, las ventanas de tiempo de estos clientes son flexibles, pero el tiempo de servicio es muy elevado y aleatorio.

En la figura 4.1 se muestra una abstracción del ruteo inicial.

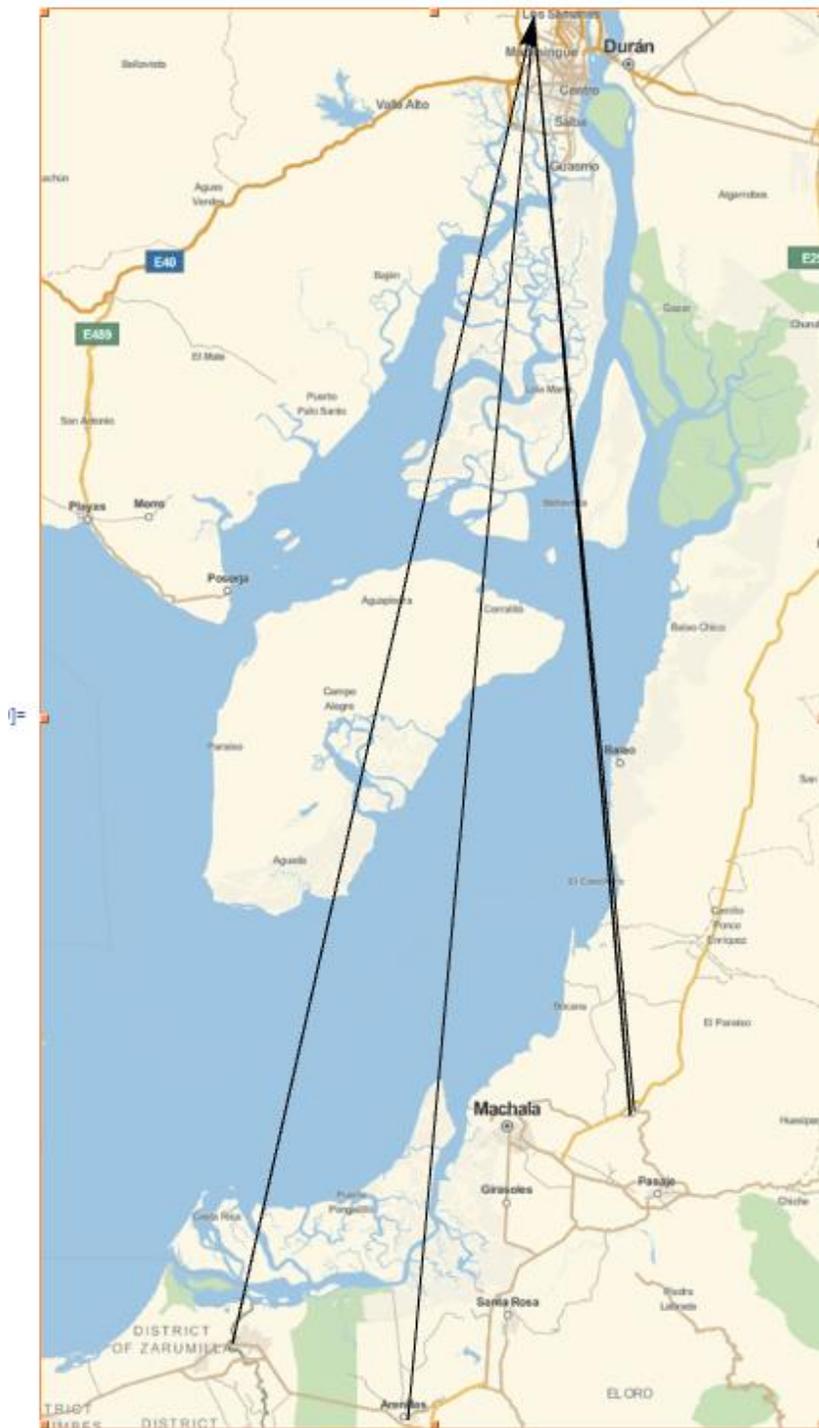


Figura 4.8 Ruta inicial para el C&W

Los resultados del algoritmo propuesto en la fase constructiva del GRASP para el lote de pedidos definido, se muestra en la siguiente tabla:

No. Ruta	Secuencia de Clientes	Distancia total	Capacidad Utilizada
1	{1,10,11,8,2,9,5,1}	541.91km	9.99Ton
2	{1,7,6,3,4,1}	345.47km	7.7Ton

Tabla 4.6 Resultados aplicados en fase constructiva

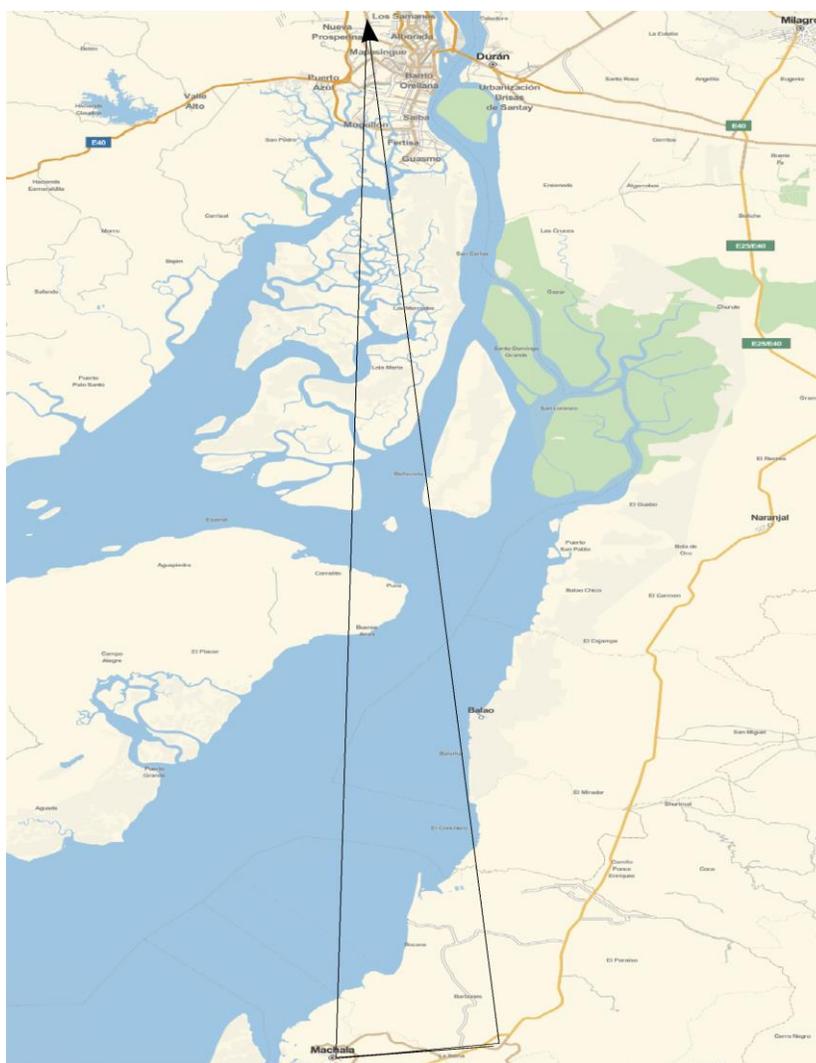


Figura 4.9 Ruta 1 en fase constructiva

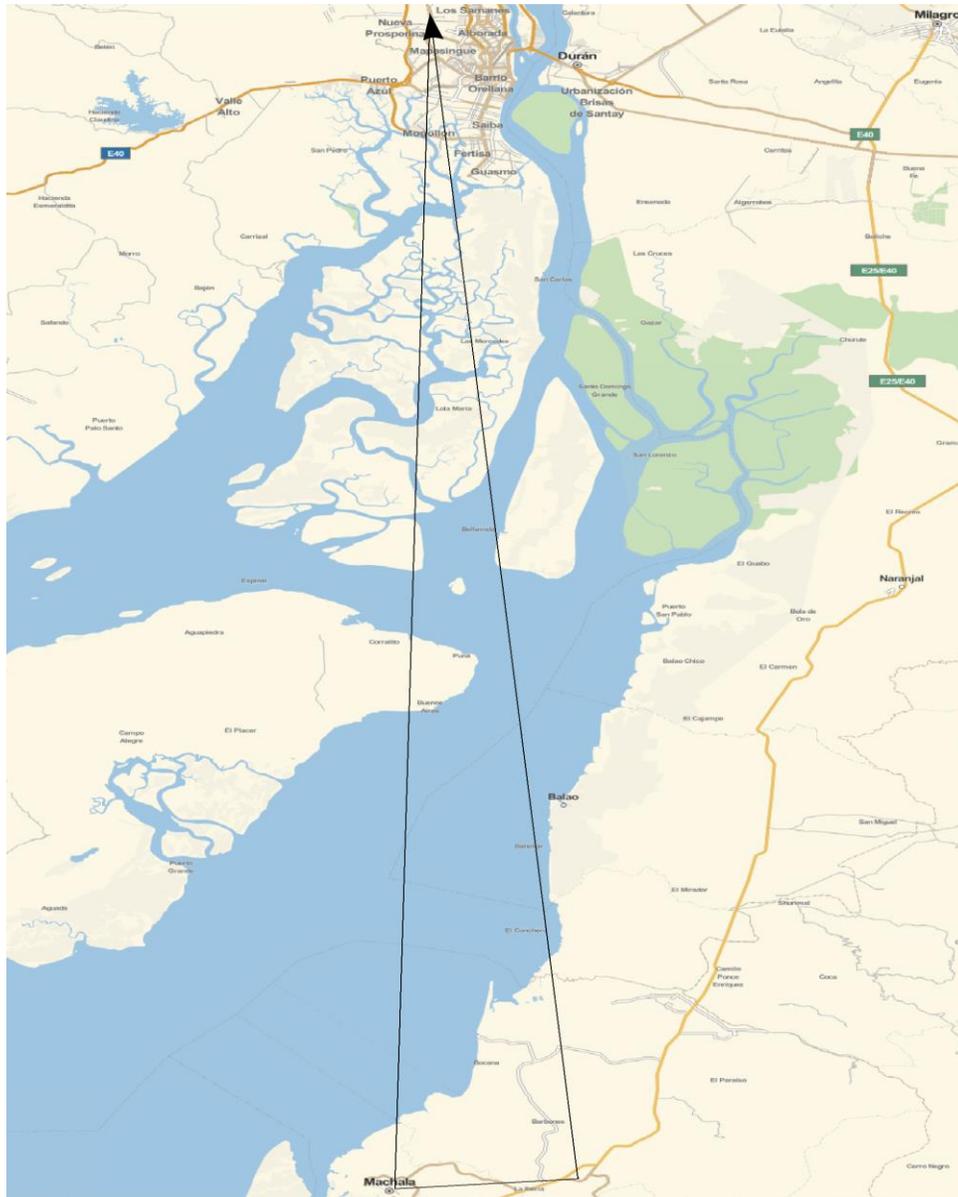


Figura 4.10 Ruta 2 en fase constructiva

En la fase de mejora se desarrolló el algoritmo Or-opt con cambio de clientes intraruta, eligiendo aleatoriamente clientes desde  $k=3$  hasta  $k=1$ . Adicionalmente se programó el algoritmo para el intercambio de clientes entre rutas utilizando el mismo algoritmo Or-opt, que ayudara a disminuir rutas en caso de que existan ciclos con pocos clientes.

En esta etapa se valida el total de fletes sobre la ruta con el cambio realizado y la capacidad del vehículo utilizada.

En este caso solo se consideran las mismas capacidades de vehículos asignadas inicialmente en la fase constructiva. Se considera además que para la zona de El Oro no hay restricciones por clientes en tipos de camión para el despacho.

<b>No. Ruta</b>	<b>Secuencia de clientes</b>	<b>Distancia total</b>	<b>Capacidad Usada</b>	<b>Costo Ruta</b>
1	{{1,2,11,9,8,10,5,1}}	494.65km	9.99Ton	\$304.19
2	{{1,6,3,4,7,1}}	344.05km	7.7Ton	\$267.96

Tabla 4.7 Resultados aplicados en fase mejora Or-opt



Figura 4.11 Ruta 1 en fase de mejora

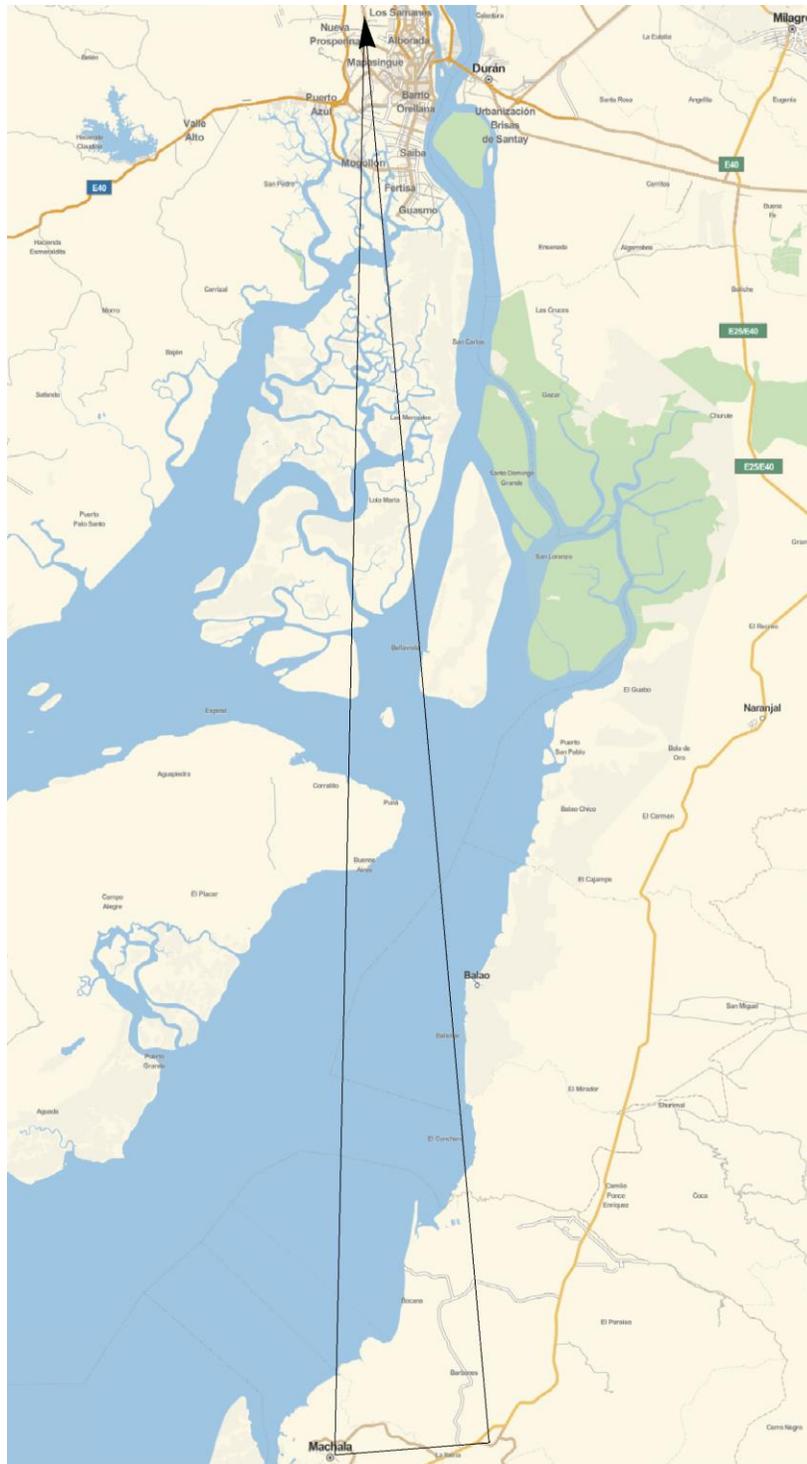


Figura 4.12 Ruta 2 en fase de mejora

Para esta instancia se puede visualizar que el porcentaje de utilización de la capacidad de la flota en toneladas resultó en promedio para las dos rutas en un 91% respecto al objetivo establecido de 85%, es decir, un 6% sobre el objetivo y cumpliendo un máximo en la métrica; considerando un máximo de 6 clientes para una ruta y de 4 para la segunda.

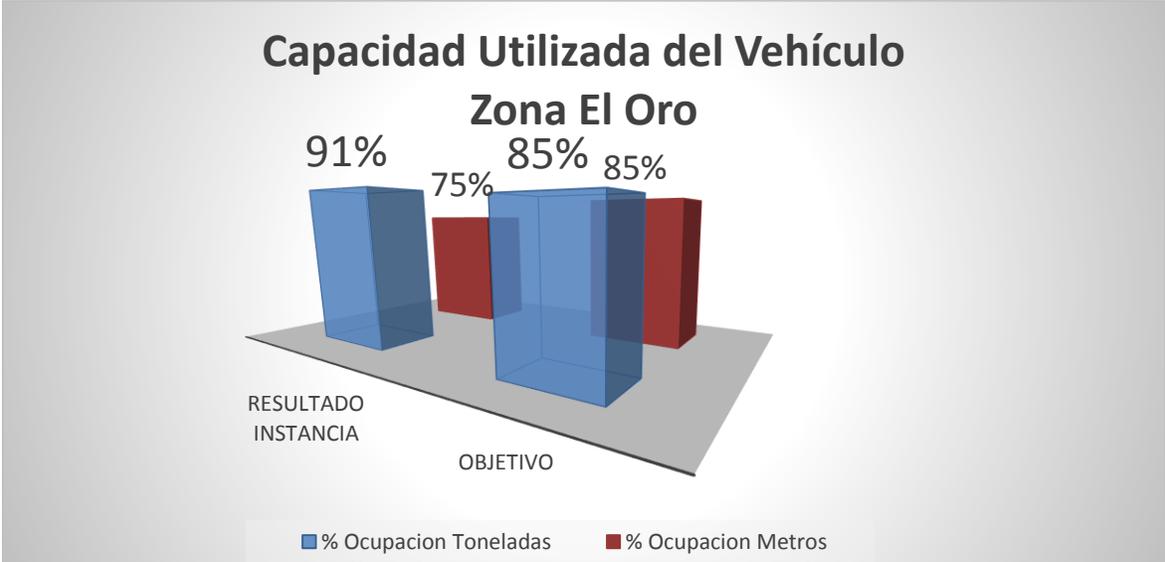


Gráfico 4.2 Resultado mejorado de capacidad vehicular sobre instancia

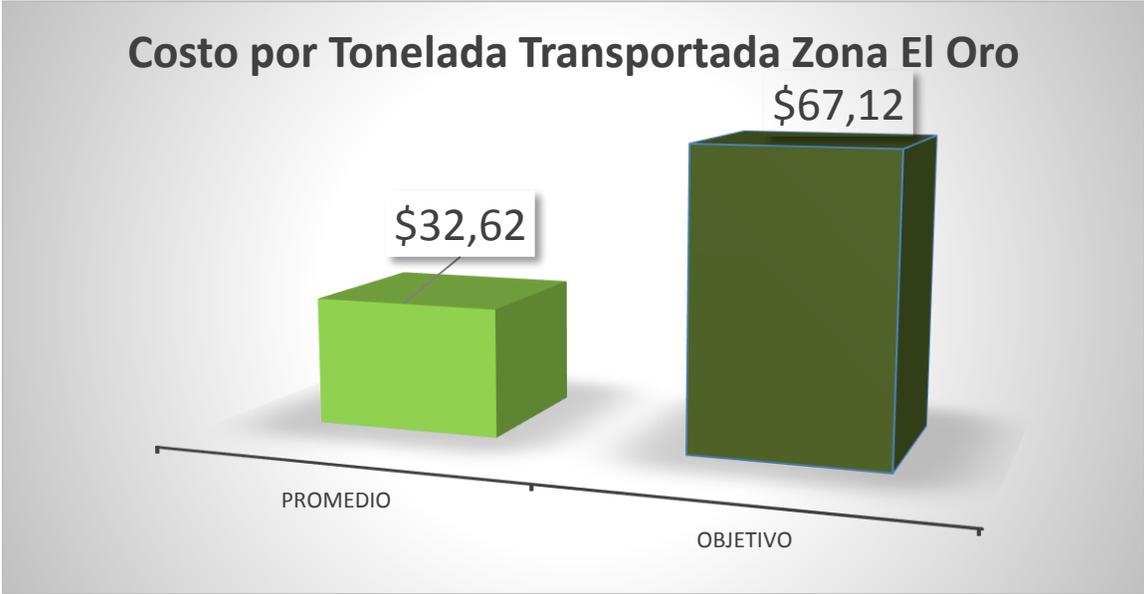


Gráfico 4.3 Resultado de costo por tonelada dentro del objetivo

Adicional a esto se tiene una visualización de la cantidad total recorrida por el vehículo incluyendo el trayecto de retorno que en la mayoría de ocasiones no es considerado en el proceso de planificación, sino solamente por lo que está aparentemente cercano. Considerando las dos rutas el mejor resultado en distancias fue de 838,7 km.

Es importante mencionar que los resultados obtenidos en esta instancia aplicados en la realidad dependerán de algunos factores operacionales adicionales, como el tiempo de llegada de las unidades a la zona de reparto. Según el escenario actual del despacho los pedidos para esta zona son considerados para entrega hasta 48hrs, sin embargo la hora de salida de la unidad desde el centro de distribución es aproximadamente al medio día del primer día de entrega (24hrs) lo que ocasiona que no alcance a entregar al total de clientes debido a la hora de llegada a la zona.

Una posible opción de entrega que la empresa hubiese analizado según el escenario de la primera instancia de pedidos es partir la entrega en 3 rutas, considerando sólo la cantidad de clientes del ejemplo para realizar la ruta, lo cual conlleva a aumentar un 50% en el costo de transporte de las rutas en total, debido a que existe un precio fijo hasta cierto tipo de tonelaje cargado en camión que normalmente no se considera en las planificaciones.

Actualmente si el conductor no alcanza a entregar los productos al cliente por inconvenientes en la zona de entrega (clientes, clima) o inconvenientes de parte de la empresa, existe un porcentaje adicional al flete que se realiza luego de la entrega, que en el caso de que pudiera ocurrir para la solución actual, el costo a cancelarse se estima no alcanzaría el 30% adicional que en el escenario de generar 3 rutas.

Si se toma de ejemplo otra instancia de pedido para la misma zona:

<b>Cliente</b>	<b>No. Ruta</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Toneladas</b>	<b>Metros</b>
Depósito #1	1	-2.118796	-79.932467	0	0
Cliente #2	2	-3.558685	-80.061690	0.567636	1.427
Cliente #14	3	-3.257728	-79.956740	0.097682	0.271
Cliente #16	4	-3.257728	-79.956740	2.946613	10.627
Cliente #17	5	-3.257728	-79.956740	1.93884	8.5

Tabla 4.9 Lote de planificación 2 con información de clientes

Los resultados de la fase constructiva son:

<b>No. Ruta</b>	<b>Secuencia de Clientes</b>	<b>Distancia total</b>	<b>Capacidad Utilizada</b>
1	{{1,4,3,5,2,1}}	447.52km	5.55Ton

Tabla 4.10 Resultado fase constructiva en segunda instancia

Los resultados de la fase de mejora son:

<b>No. Ruta</b>	<b>Secuencia de Clientes</b>	<b>Distancia total</b>	<b>Capacidad Utilizada</b>	<b>Costo Ruta</b>
1	{{1,2,5,4,3,1}}	447.36km	5.55Ton	\$248.71

Tabla 4.11 Resultado fase de mejora en segunda instancia

En este caso se evidencia una reducción en la cantidad de kilómetros de la ruta debido a que el nodo 2 está localizado en Arenillas y los tres clientes restantes en el Machala, que para estos últimos en la fase constructiva se generaba visitarlos primero. El costo por tonelada generado es de \$45.22 y el porcentaje de ocupación es de 92.5% en tonelaje y 74% en metros.



Figura 4.13 Instancia 2 en fase de mejora

## Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

- En este estudio se ha modelizado el problema de ruteo vehicular con flota heterogénea (HVRP) y ha sido basado en una heurística de tipo GRASP, cuyos objetivos se enfocan en la disminución de la distancia global recorrida y la reducción de costos de transporte. Este último se activa cuando hay la opción de disminuir rutas que tienen pocos clientes y unificarlas a otras rutas siempre y cuando la cantidad de clientes no supere un número establecido. Considerando el hecho de que la flota es contratada, podemos notar beneficios directos para las compañías de transporte que prestan servicio a la empresa, esto gracias a la planificación óptima de las rutas de los vehículos, entre ellos se puede mencionar el más importante que es la reducción del consumo de combustible que en cadena produce muchos otros beneficios sobre todo medio ambientales.
- La muestra de clientes se definió según la provincia que mantiene un costo por tonelada transportada mayor según los históricos del 2015 y con base a la cantidad de clientes que se atiende y su frecuencia semanal visitas de entrega a la zona.
- Luego de haber aplicado el algoritmo GRASP al lote de pedido de la instancia 1, se encontró que la mejor solución da un costo por tonelada zonal de \$32.61, lo cual es un costo mucho menor que el histórico de la zona de El Oro que en 2015 bordea los \$97.9 por tonelada, pero se debe tomar en cuenta de que un costo por tonelada transportada bajo va a depender de algunos factores como la cantidad de toneladas a despachar y el cumplimiento del calendario de pedidos.  
Para el calendario de visitas a clientes se propuso una mejora sencilla basado en la cercanía entre las ciudades y tomando en cuenta la cantidad de clientes a visitar por día, puesto que en el escenario actual existen clientes de ciudades más distantes que son visitadas en un mismo día lo que produce un ruteo no óptimo y que impacta a diversas áreas y recursos de la empresa.

- Sobre el resultado obtenido en la fase constructiva se obtuvo una distancia total recorrida de 887.38Km incluyendo la distancia de retorno al depósito. Aplicando la fase de mejora se obtuvo un resultado de 838.7km incluyendo la distancia de retorno, lo cual produce un ahorro de 48.68km en general. Métrica que actualmente no es tomada en consideración al detalle en la planificación de carga para la distribución de productos.

La medición de varios aspectos, en este caso el kilometraje recorrido, considerando la flota externa, ayuda internamente a la empresa a generar mejores planes que apoyen en la sostenibilidad del medio ambiente e inclusive impacta en la conducción segura de cada conductor, puesto que cada kilómetro adicional que se recorre representa tiempo en tránsito que el conductor pudo descansar y también apoyaría a una reducción en los tiempos de llegada a cada cliente.

## 5.2 Recomendaciones

- Con respecto a la información obtenida para diseñar el problema de ruteo vehicular con flota heterogénea, es necesario que los datos geográficos de todos los clientes sean determinados, es decir, que cada cliente este geo referenciado para poder ampliar el resultado del algoritmo. En este caso se requirió obtener de manera manual las coordenadas de cada cliente con información de sus direcciones de la base de datos que se mantiene actualmente.

También para la zona determinada en el estudio, se consideró según la información proporcionada que se podía llegar sin restricciones a cualquiera de los clientes, pero se conoce que no se posee la información actualizada al momento de los demás canales de distribución.

Se recomienda que desde la inclusión de un nuevo cliente por parte del departamento Comercial se entregue la información del nuevo cliente o de los clientes que actualmente constan en la base en caso de que exista algún cambio en general.

- Se debe trabajar en conjunto con las diversas áreas involucradas para que las ventanas horarias sean reales y el tiempo de servicio no sea aleatorio o muy elevado, ya que esto no permite que se pueda modelar el escenario con todas las variables necesarias, puesto que es muy probable que se sub estime la capacidad del camión y por ende pueda producirse un mayor costo por tonelada transportada.
- Para futuras investigaciones se debe tomar en cuenta que se debe generar un balance entre cada restricción y solución a generar, debido a que si se modela actualmente una ruta con tiempos de servicio muy elevados es probable que se sacrifique el costo por tonelada zonal o por ruta y tienda a elevarse mucho más que el histórico actual, lo cual no es una opción considerando el escenario actual del país. Por lo que las condiciones de entrega bien pactadas junto con una estrategia de ventas se hacen necesarias para poder diseñar el modelo de distribución basado a nuestras necesidades.

- Las tarifas de flete de la empresa están definidas por zonas de reparto y por la cantidad en toneladas que se carguen en el camión. Por lo que la cantidad de clientes que se incluyan en la ruta no influye en alguna variación del costo del flete, lo cual es un beneficio para la empresa actualmente pero podría impactar al proveedor de flota.

Para efectos del trabajo de planificación se podría recomendar el definir una tarifa por kilómetros inclusive, para que el análisis sea un poco más robusto. Se conoce que tomaría mucho tiempo su implementación debido a que se deberían reconfigurar todos los parámetros en el sistema SAP para que se pueda realizar el pago como actualmente se maneja y sin realizar pagos manuales en un 100%, lo que ocasionaría un re trabajo en la cadena final.

## Bibliografía

- Anthony Fu-Wha HAN, Y.-J. C. (1999). *A new meta heuristic approach to the fleet size and mix vehicle routing problem*. Taiwan.
- Domínguez, D. G. (2009). *El Doble Problema del Viajante con Múltiples Pilas*, Tesis Doctoral. Madrid.
- Feiyue Li, B. G. (2006). *A record-to-record travel algorithm for solving the heterogeneous fleet vehicle routing problem*. Estados Unidos: Elsevier.
- Joaquín A. Pacheco, C. R. (1999). *Diseño de metaheurísticos para problemas de rutas con flota heterogénea: GRASP*. España: Departamento de Economía, Facultad de C. EE y EE.
- Md. Mohibul Islam, S. G. (2015). Solving Capacitated Vehicle Routing Problem by Using Heuristic Approaches: A Case Study. *Proceedings of 10th Global Engineering, Science and Technology Conference*.
- Rand, G. K. (2009). *The Life and times of the Savings Method for Vehicle Routing Problems*. Reino Unido: Orion.
- Roberto Baldacci, M. B. (2007). *Routing a Heterogeneous Fleet of Vehicles*. Italia: DEIS, University Bologna.
- Rocha, L., & González, C. y. (2011). *Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución*. Colombia.
- Rodrigo Linfati, J. W. (2014). *Un algoritmo metaheurístico para el problema de localización y ruteo con flota heterogénea*. Chile, Colombia.
- Vadillo, J. I. (2014). *Ruteo de Barcos para el Suministro de Alimentos en la Industria Salmonera*, Tesis para optar al Grado de Magister en Gestión de Operaciones. Chile.

Víctor Yepes, J. R. (2002). *Optimización de Rutas con Flotas Heterogéneas y Múltiples Usos de Vehículos VRPHEMSTW*. Valencia, España.

## Anexos

### Anexo 1 Entrevista.

Entrevista Empresa de Distribución de Productos de Consumo Masivo

Área: Transporte

Entrevistado: Jefe de Distribución

Estructura de la entrevista:

Para la entrevista se utilizara una estructura de tipo embudo.

Tipos de Preguntas:

Los tipos de preguntas que se utilizaran son abiertas y cerradas según la estructura de la entrevista y se considerara formular preguntas de sesgo en el caso que se requiera aclarar un tema.

Formulario:
1.- Nos puede indicar al detalle ¿Que actividades engloba su proceso de Transportes dentro de la empresa?
2.- ¿Qué áreas están involucradas dentro del proceso de planificación de distribución?
3.- Respecto a la parte de Distribución nos puede explicar ¿Cómo realizan la planificación de distribución de las entregas?
4.- ¿La planificación debe hacerse enfocado principalmente por tipo de clientes o se puede mezclar los tipos de clientes en un solo vehículo?

5.- ¿Qué criterios adicionales se toman en cuenta al momento de planificar las entregas?
6.- ¿Se tiene un cronograma y frecuencia definida para las entregas?
7.- ¿Existen incumplimientos sobre este cronograma y frecuencias establecidas?
8.- ¿Cuál es el impacto sobre la planificación?
9.- En la actividad de planificación. ¿Cómo el recurso asignado identifica que la ruta o despacho es válido hacerlo efectivo?
10.- ¿Cuánto tiempo aproximadamente podría consumirle analizar una ruta?
11.- ¿Posee visibilidad sobre los beneficios que tiene la elección de una ruta específica?
12.- ¿Existe algún método de apoyo para la selección de la ruta optima actualmente?
13.- ¿Considera que una aplicación que le permita disminuir el tiempo de análisis de la ruta al recurso asignado puede serle útil al proceso?
14.- ¿Qué resultados quisiera que se muestren?
15.- ¿Qué restricciones pueden existir para que se pueda usar la aplicación?