

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



INSTITUTO DE CIENCIAS MATEMÁTICAS

PROYECTO DE GRADUACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

“INGENIERO EN LOGÍSTICA Y TRANSPORTE”

TEMA:

**“MODELO DE PLANEACIÓN DE LAS RUTAS DE DISTRIBUCIÓN DE UN
OPERADOR LOGÍSTICO”**

AUTORES:

JOHAN AQUINO MORENO

RONNY JIMÉNEZ MOROCHO

Guayaquil – Ecuador

AÑO

2010

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a mi tía Amelia por haber creído en mí y haberme dado la oportunidad de iniciar mi carrera universitaria. De igual manera al Director de la Carrera, el M. Sc. Fernando Sandoya, y a todos los profesores que he tenido durante mi formación académica, quienes han compartido su conocimiento y experiencia en cada clase. Finalmente a mis amigos, por brindarme su apoyo, ánimo y colaboración en cada momento y sobre todo cuando más necesitaba de ellos.

Ronny Jiménez Morocho

Gracias al M. Sc. Fernando Sandoya Sánchez, quien a través de sus conocimientos impartidos pude formarme académicamente pues no solo fue un profesor más, sino un amigo quien estuvo dispuesto a escuchar toda inquietud que tenía ayudándome en la misma. Gracias al Ing. Víctor Vega quien fue un apoyo importante en el planteo de este proyecto, quien nos brindó un espacio en sus labores cotidianas y que gracias a su experiencia adquirida pudo guiarnos en el desarrollo del mismo.

Johan José Aquino Moreno

DEDICATORIAS

A Dios, quien me dio la vida y la oportunidad de alcanzar mis metas. A mis padres, Narcisa y Sixto, quienes siempre han confiado en mí y me han brindado su apoyo incondicional. Mis abuelos, Segundo y Carmen, quienes me inculcaron buenos valores y son parte fundamental de mi vida. A mis tíos y tía, quienes siempre estuvieron conmigo cuando necesitaba de sus sabios consejos. A mi querida novia, Yui, quien con su cariño, comprensión y paciente espera me ha inspirado a superarme en la vida.

Ronny Jiménez Morocho

A José Aquino y Marlene Moreno, mis padres que como un par de ángeles enviados por Dios han sabido darme la fuerza necesaria para no desviarme del camino hacia el éxito y quienes han sufrido la soledad de no tenerme a su lado por mucho tiempo; a mis hermanas quienes han visto en mí un segundo padre y a Nadia que con su amor y paciencia ha sido la pareja ideal y complemento en mi vida.

Johan José Aquino Moreno

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

M. Sc. Erwin Delgado

PRESIDENTE

M. Sc. Pedro Echeverría

DIRECTOR DE PROYECTO

DE GRADUACIÓN

DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Graduación, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma al **ICM (Instituto de Ciencias Matemáticas)** de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Ronny Jiménez Morocho

Johan Aquino Moreno

AUTORES DEL PROYECTO DE GRADUACIÓN

Ronny Jiménez Morocho

Johan Aquino Moreno

RESUMEN

La situación actual de un operador logístico presenta un gran problema en el proceso de distribución de la mercadería a sus clientes. Actualmente, se utiliza un modelo de distribución empírico en base a los horarios de atención que la empresa como operador logístico ofrece a sus clientes, dichos clientes a su vez se acoplan al o a los horarios en los cuales les resulta más conveniente la recepción de la mercadería. Esta política, en cuanto a distribución, que tiene la empresa ha dado como resultado la satisfacción del cliente pero los costos operativos para la empresa son muy elevados, he aquí que la estrategia de GANAR – GANAR no se cumple, lo cual es una de las metas en una empresa. El enfoque para la solución sería básicamente tratar de que el cliente obtenga la misma satisfacción, pero ahora en dependencia de la nueva política de distribución del operador logístico, sustentada en un criterio más formal al obtener datos de ubicación geográfica, unificación de horarios, tiempos de entrega y demanda del cliente; que como resultado podría ayudar a definir nuevas zonas, crear nuevas rutas que abarquen la totalidad de los clientes, reducir el porcentaje de utilización de los recursos de la empresa, establecer nuevas jornadas de trabajo, reestructuración del personal, disminución de las devoluciones; todo esto nos conlleva a la disminución de costos para la empresa.

Tabla de Contenido

Capítulo 1	21
1. Modelo de Planeación de las Rutas de Distribución de un Operador Logístico	21
1.1 Objetivos:	21
1.2 Descripción del Problema	21
Capítulo 2	24
2. Justificación/ Teorías	24
2.1 Los Problemas de Optimización Combinatoria.....	25
2.1.1 Introducción	25
2.1.2 La Modelización de un Problema	25
2.1.3 Programación Matemática	27
2.1.4 Técnicas de Resolución de Problemas de Optimización Combinatoria ...	28
Capítulo 3	29
3. Modelos de Distribución Física y Transporte	29
3.1 Problema del Ruteo de Vehículos	29
3.1.1 Métodos de Solución para los Problemas de Ruteo de Vehículos	30
3.1.2 Complejidad Algorítmica.....	31
3.2 Clasificación del los problemas VRP	32

3.2.1 Problema del Ruteo Capacitado con Ventanas de Tiempo (CVRPTW)...	33
3.2.1.1 Modelo Matemático del Problema del CVRPTW	34
3.3 El Método de los Ahorros.....	37
3.4 Intercambios 2 – Opt.....	38
3.5 Algoritmo del Vecino Más Cercano	39
Capítulo 4	39
4 Situación actual de la empresa	39
Capítulo 5	46
5 Planteamiento de la solución.....	46
5.1 Obtención de datos reales para la aplicación de la Metaheurísticas propuesta.	46
5.2 Selección de la Zona	47
5.3 Ubicación geográfica de los clientes.....	49
5.4 Calculo de distancias.....	51
5.5 Definición de parámetros y funciones del algoritmo.	53
Capítulo 6	54
6 Resultados Obtenidos.....	54
6.1 Aplicación de la heurística de búsqueda local 2 - Opt:.....	58
6.2 Resultados obtenidos y comparación con los datos de la empresa	61
6.3 Comparación de resultados entre Clarke & Wright y Mejora 2- Opt	62

Capítulo 7	63
7. Conclusiones y Recomendaciones	63
7.1 Conclusiones	63
7.2 Recomendaciones	65
BIBLIOGRAFÍA:	66

Contenido de Tablas

Tabla 3.1 Clasificación de los VRP	32
Tabla 4.1 Clientes y cantidad de mandada	41
Tabla 4.2 Turno 1	41
Tabla 4.3 Recorridos actuales Turno 1	42
Tabla 4.4 Turno 2	43
Tabla 4.5 Recorridos actuales Turno 2	43
Tabla 4.6 Turno 3	44
Tabla 4.7 Recorridos actuales Turno 3	45
Tabla 4.8 Turno 4	45
Tabla 4.9 Recorridos actuales Turno 4	46
Tabla 5.1 Coordenadas geográficas de clientes y operador logístico.	50
Tabla 5.2 Distancias, en kilómetros, entre los clientes y el operador.	52
Tabla 6.1 Rutas generadas por la heurística de Clarke & Wright	55

Tabla 6.2 Rutas mejoradas por la heurística 2 - Opt	58
Tabla 6.3 Comparación de la situación actual con los resultados obtenidos	61
Tabla 6.4 Comparación entre los resultados Clarke & Wright y 2 – Opt	62

Contenido de Figuras

Figura 3.1 CVRP y CVRPTW	34
Figura 3.2 Método de los ahorros	38
Figura 3.3 Intercambio 2- Opt.	38
Figura 5.1 Distribución de los clientes en la Zona norte de Guayaquil.....	48
Figura 5.2 Cálculo de la distancia de Manhattan.....	51
Figura 6.1 Recorrido de la Ruta 1 con Clarke & Wright.....	55
Figura 6.2 Recorrido de la Ruta 2 con Clarke & Wright.....	56
Figura 6.3 Recorrido de la Ruta 3 con Clarke & Wright.....	56
Figura 6.4 Recorrido de la Ruta 4 con Clarke & Wright.....	57
Figura 6.5 Recorrido de la Ruta 5 con Clarke & Wright.....	57
Figura 6.6. Recorrido de la Ruta 1 con 2 - Opt.	58
Figura 6.7 Recorrido de la Ruta 2 con 2 – Opt.....	59
Figura 6.8 Recorrido de la Ruta 3 con 2 – Opt.....	59
Figura 6.9 Recorrido de la Ruta 4 con 2 - Opt.	60

Figura 6.10 Recorrido de la Ruta 5 con 2 – Opt..... 60

DEFINICIONES

Algoritmo: Procedimiento de cálculo con símbolos, según unas reglas determinadas y con un número finito de pasos.

Empírico: Sistema o procedimiento fundado en una mera práctica o rutina.

Flota: Conjunto de diversas embarcaciones con el mismo destino.

Optimizar: Buscar la mejor manera de realizar una actividad.

Incertidumbre: Falta de conocimiento seguro y claro de las cosas.

Secuenciación: Sucesión de un conjunto de operaciones de un sistema.

Homogéneo: Relativo a un mismo género.

Heterogéneo: Compuesto de partes de diversa naturaleza.

Inserción: Lugar donde una cosa se inserta en otra.

Simetría: Proporción adecuada de las partes de un todo.

Circuito: Conjunto de elementos conectados mediante conductores adecuados.

Turno: Se aplica a la persona o cosa a la que corresponde actuar en un momento

Determinado: según la alternativa previamente acordada.

Recorrido: Conjunto de todos los valores alcanzados por una función.

Ordenes de picking: Ordenes de pedido por parte de los clientes.

Parámetro: Variable que toma un valor constante durante la ejecución de un programa.

Factible: Que se puede hacer.

Jornada: Tiempo de duración del trabajo diario.

Paletizado: Colocación adecuada de la mercadería en elementos auxiliares de carga.

ABREVIATURA

LP: Lineal problem (Problema lineal).

MILP: Mix lineal problem. (Problema lineal mixto).

NLP: Non Lineal Problem (Problema no lineal).

MINLP: Mix Non Lineal Problem (Problema no lineal mixto).

TSP: Traveling Salesman Problem (Problema del agente viajero).

VRP: Vehicle Routing Problem (Problema de ruteo vehicular).

VRPTW: Vehicle Routing Problem Time Windows (Problema de ruteo vehicular con ventanas de tiempo).

CVRPTW: Capacited Vehicle Routing Problem Time Windows (Problema de ruteo vehicular capacitado con ventanas de tiempo).

MDVRP: Multiple Depots Vehicle Routing Problem (Problema de ruteo vehicular con multidepósitos).

VRPSD: Vehicle Routing Problem Stochastic Demands (Problema de ruteo vehicular con demanda estocástica).

VRPSC: Vehicle Routing Problem Stochastic Customers (Problema de ruteo vehicular con clientes estocásticos).

VRPST: Vehicle Routing Problem Stochastic Time (Problema de ruteo vehicular con tiempo estocástico).

SDVRP: Split delivery Vehicle Routing Problem (Problema de ruteo vehicular con entrega compartida).

VRPB: Vehicle Routing Problem backhauls (Problema de ruteo vehicular con división de clientes).

VRPPD: Vehicle Routing Problem picking & delivery (Problema de ruteo vehicular con recolección y entrega en cada cliente visitado).

PVRP: Period Vehicle Routing Problem (Problema de ruteo vehicular con horizonte de planeación).

MFVRP: Mix Fleet Vehicle Routing Problem (Problema de ruteo vehicular con flota heterogénea).

GPS: Global Position System (Sistema de posicionamiento global)

INTRODUCCIÓN

La planificación de rutas es uno de los principales problemas en la optimización de las operaciones logísticas de transporte, por tanto uno de los objetivos principales en estas operaciones es reducir los costos de esta actividad.

A primera vista, la operación de una empresa operadora logística describe un VRP, cuyos principios están basados en el TSP, los problemas mencionados anteriormente buscan establecer un conjunto de rutas de costo mínimo para la flota de camiones. Estos problemas dan como resultado soluciones aproximadas, pero eficientes mediante la incorporación de metaheurísticas.

El Problema de Ruteo de Vehicular, tiene numerosas aplicaciones en las operaciones logísticas de los sectores industriales, banca, transporte, producción, etc. El VRP es un problema de programación entera, el cual cae dentro de la categoría de los problemas NP-Duros, debido a que la complejidad computacional para resolver este problema se incrementan exponencialmente de acuerdo al número de variables involucradas. Los métodos de solución para el VRP son diversos, entre los cuales encontramos los exactos y los heurísticos siendo este último el método que se va a aplicar para la resolución del problema además de una heurística de mejora de rutas.

La empresa se dedica al almacenamiento y distribución de mercadería siendo la operación de distribución la de vital importancia para la empresa la cual se la puede

modelar como un VRP. A la operación se le añaden variables como lo son las ventanas de tiempo y la capacidad del camión por lo que la tarea de determinar las rutas de los camiones se vuelve un poco más complicada, considerando estas variables el modelo tomaría el nombre de CVRPTW. En Ecuador existe un sinnúmero de empresas que trabajan bajo este mismo esquema, es decir tienen problemas logísticos sin ellos saberlo y en la mayoría de ellos se utilizan métodos empíricos para el establecimiento de estas rutas, lo que a menudo da como resultado una mala planificación de sus operaciones, se encarecen los costos de distribución y se disminuye el nivel de servicio al cliente.

Mediante la aplicación del Método de los Ahorros (Clarke and Wright) se desarrolla un sistema de rutas que cumpliendo con las restricciones de un mínimo recorrido y capacidad de vehículo nos permitirá tener un criterio mucho más racional en el momento de la toma de decisiones ante las situaciones que se presenten antes, durante y después de las operaciones logísticas. Adicionalmente usaremos la heurística de mejora 2- Opt para que la interacción entre las rutas nos genere una respuesta aún mejor.

Este proyecto sugiere una razón más por la cual la empresa debe de hacer uso de un software especializado en ruteo de vehículos, aunque el principal impedimento para la adquisición de este tipo de software son sus altos precios se lo debe considerar como una inversión que en un futuro no tan lejano dará como resultado ahorros significativos que justifiquen su adquisición. Se parte del modelo del CVRPTW para

luego proponer heurísticas de mejora de rutas como lo son Clark and Wright y 2 – Opt que demuestran fundamentos suficientes para el desarrollo e implementación de un sistema de decisiones que va a ayudar en la planificación de rutas de una manera óptima.

Se van a utilizar los datos de uno de los operadores logísticos más grandes en el mercado local, por su número de clientes en la ciudad de Guayaquil, con el propósito de evidenciar la aplicabilidad de los métodos heurísticos mencionados anteriormente.

Capítulo 1

1. Modelo de Planeación de las Rutas de Distribución de un Operador Logístico

1.1 Objetivos:

- Proponer la disminución de distancias recorridas, creando nuevas rutas que cubran una mayor cantidad de clientes dentro de una zona específica, aprovechando de manera adecuada los recursos de la empresa, y la disminución de tiempos de la distribución.

- Disminuir el porcentaje de devolución de producto, mediante una mejor distribución en los horarios de visita a cada uno de los clientes, es decir se los podrá atender dentro de las horas dispuestas en un inicio.

- Disminuir los costos de operación de la distribución, con la implantación de un nuevo esquema de trabajo se podrían disminuir el número de vehículos utilizados en el transcurso de la operación que nos conlleva a una reducción en lo que se refiere a costos por fletes.

1.2 Descripción del Problema

La empresa inicia sus labores con la recepción de los cabezales que transportan la mercadería para su posterior descarga, almacenamiento, maquilación (opcional) y distribución.

En el proceso de descarga la mercadería es paletizada y mediante la utilización de montacargas eléctricos es ubicada en estanterías o racks de almacenamiento de hasta 7 ubicaciones de altura en posiciones previamente asignadas. Luego de este proceso, dependiendo de los requerimientos del cliente la mercadería pasa al proceso de maquila en donde se adecua el producto para su presentación final al consumidor, una vez finalizada esta actividad la mercadería se vuelve a colocar en sus ubicaciones correspondientes.

El proceso de distribución inicia con la generación del pedido, donde se detallarán las cantidades y volúmenes de los productos a transportar con lo que se establece la asignación de vehículos. Entonces se procede a retirar los productos de las estanterías para colocarlos en el muelle de embarque. Es en esta etapa cuando el personal del departamento de distribución iniciará la planificación de las rutas.

La empresa, actualmente realiza la planeación de sus rutas manualmente, lo que han hecho es sectorizar a la ciudad de Guayaquil en tres grandes zonas: Norte, Centro y Sur. En cada una de estas zonas se encuentra una cierta cantidad de clientes a quienes tienen que hacer llegar el producto, para luego asignar un orden de visita según un determinado horario previamente acordado con el cliente. Otro de los criterios que se considera es la ubicación de los clientes dentro de una determinada ciudadela, barrio o área específica sin conocerse de antemano la posición geográfica ni distancias reales entre los puntos de visita.

Para el reparto la empresa cuenta con una flota de 30 furgones tercerizados con una capacidad de 5.5 toneladas y un volumen de carga aproximado de 21m^3 , cabe recalcar que si se da el caso de un pedido demasiado grande se procede a contratar cabezales eventualmente. Las rutas son asignadas a los furgones según su orden de llegada a los patios de la empresa, por lo que no siempre un mismo furgón recorre la misma ruta y cuando hay pocos pedidos algunos furgones no laboran.

Por el momento, la empresa tiene implementado este modelo de sistema logístico, pero se han dado cuenta de que no es tan eficiente como ellos quisieran, debido a que se incurren en altos costos de transportación. A continuación, describiremos algunas de las causas que generan los altos costos de transporte.

- En algunas ocasiones sucede que la demanda de ciertas zonas, no pueden ser cubiertas por un solo furgón, por lo que tiene que realizarse un viaje más o a veces optan por enviar a otro furgón a media capacidad con lo cual genera un gasto adicional por el flete.
- Incorrecta zonificación de los clientes, en ocasiones hay clientes que están muy alejados de cierta zona por lo que quedan rezagados porque el furgón no tuvo suficiente capacidad de carga para llevar sus pedido, por lo que se tiene que emplear un vehículo dedicado únicamente para esos clientes.
- Otra causa sería la devolución de mercadería debido a que al final de la jornada habría camiones que regresan con producto , debido:
 1. El cliente no se encontraba en el lugar previsto al momento de la entrega.

2. El chofer no alcanzó a cumplir con el rutero asignado.
3. El producto en mal estado debido al manipuleo.
4. El producto no correspondiente al pedido.
5. No se cumplió con la ventana horaria del cliente.

Capítulo 2

2. Justificación/ Teorías

Una respuesta ágil y eficiente al mercado constituye una de las principales ventajas competitivas de una empresa. Una organización obtiene oportunidades si garantiza a sus clientes cualquier pedido en el menor tiempo posible y a un menor costo que la competencia. Entonces la gestión de la distribución conlleva una multitud de decisiones que deben abordarse con métodos que permitan identificar las oportunidades de mejora, reduciendo costos, disminuyendo el nivel de inversión y mejorando el servicio al cliente.

Para las empresas que poseen y administran flotas de camiones, la planificación de rutas ayuda a optimizar y así ser más eficientes. Las operaciones de distribución de un operador logístico básicamente son: asignar órdenes y clientes a las rutas, reasignar secuencias de recorridos, establecer zonas y combinar recursos de acuerdo a las normativas establecidas del negocio. En muchas ocasiones las operaciones descritas anteriormente son complejas de llevar a cabo y es cuando aparece el Problema del Transporte [2].

2.1 Los Problemas de Optimización Combinatoria

2.1.1 Introducción

Optimizar significa hallar el valor máximo o mínimo de una cierta función. En los problemas de decisión que generalmente se presentan existen una serie de requisitos a cumplir los cuales condicionan la elección de la solución adecuada entonces la decisión que se escoja debe llevar a cabo el plan propuesto de una manera óptima (por ejemplo, minimizando costos o maximizando el beneficio). Desgraciadamente la complejidad de las situaciones reales hace que los problemas de optimización planteados frecuentemente se resuelvan con métodos aproximados.

La optimización consiste en la selección de la mejor alternativa del conjunto de alternativas posibles. Los problemas de optimización se componen de:

- **Función objetivo:** es el valor que toma la función el cual se desea optimizar.
- **Variables:** son las decisiones que afectan el valor de la función objetivo.
- **Restricciones:** las relaciones que las variables están obligadas a satisfacer.

2.1.2 La Modelización de un Problema

La investigación operativa trata de resolver los problemas reales analizando la representación simplificada de una parte de la misma, denominado modelo. Una vez definido el problema se debe formular un modelo cuantitativo empleando métodos matemáticos, los mismos que nos dan la ventaja de analizar un número considerable de opciones en breve tiempo en lugar de años.

Algunos beneficios para el modelador son:

- Organiza los datos
- Organiza, estructura y mejora la comprensión del sistema.
- Proporciona un entorno ágil para el análisis.

Para desarrollar un modelo tenemos las siguientes etapas:

1. **Identificación del problema:** consiste en la recolección y análisis de la información relevante para el problema.
2. **Especificación matemática y formulación:** escritura matemática del problema de optimización, definiendo sus variables, sus ecuaciones, su función objetivo, sus parámetros.
3. **Resolución:** se trata de implantar un algoritmo de obtención de la solución numérica óptima. Puede haber varios métodos de solución de un problema.
4. **Verificación, validación y refinamiento:** se eliminan los errores en la codificación, es decir, conseguir que el modelo haga lo que se desea.
5. **Interpretación y análisis de los resultados:** en esta etapa se proponen soluciones. Permite conocer en detalle el comportamiento del modelo al estudiar diferentes escenarios.
6. **Implantación, documentación y mantenimiento:** es una etapa fundamental del desarrollo de un modelo para garantizar su amplia difusión. La documentación ha de ser clara, precisa y completa [4].

Los modelos matemáticos se clasifican de acuerdo a los siguientes criterios:

- Según la naturaleza de los datos: deterministas, en donde se conoce con exactitud los datos que intervienen en el modelo y estocásticos, en donde los valores de los datos varían de acuerdo a una distribución de probabilidades.
- Según los objetivos del problema: con objetivo único o con objetivos múltiples.
- Según tengan o no restricciones: se tienen problemas restringidos o problemas sin restricciones.
- Según la linealidad de las funciones: modelos lineales o modelos no lineales.
- Según la continuidad de las variables: problemas continuos o discretos [3].

2.1.3 Programación Matemática

La programación matemática constituye un amplio campo de estudio que se ocupa de la teoría, aplicaciones y métodos computacionales para resolver los problemas de optimización. De manera general un problema de programación matemática puede expresarse de la siguiente manera:

$$\min(\max): f(x) \longrightarrow \textit{Función Objetivo.}$$

$$\textit{s. a.: } h(x) = 0 \longrightarrow \textit{Restricciones.}$$

$$g(x) \leq 0$$

$$x \in R^n \longrightarrow \textit{Variables continuas, discretas.}$$

Donde el vector $x \in R^n$ tiene como componentes x_1, x_2, \dots, x_n , que son desconocidas en el problema. La función f es la función objetivo y el conjunto de condiciones $g(x)$, $h(x)$ son las restricciones. La función objetivo nos dará la solución para un problema específico, esta solución sirve para minimizar o maximizar un valor según los requerimientos del problema.

2.1.4 Técnicas de Resolución de Problemas de Optimización Combinatoria

Los métodos de optimización los podemos clasificar en: métodos clásicos en los que se encuentran la optimización lineal, lineal entera mixta, no lineal, estocástica, etc. y métodos metaheurísticos que incluyen los algoritmos evolutivos, el método del recocido simulado o las búsquedas heurísticas. De forma general se puede decir que los métodos clásicos buscan y garantizan un óptimo local mientras que los métodos metaheurísticos tienen mecanismos específicos para alcanzar un óptimo global.

Los problemas analizados en esta investigación son del tipo MILP con variables binarias, tal como se describe a continuación:

$$\min: Z = c^T x + a^T y \longrightarrow \text{Función Objetivo.}$$

$$s. a: Ax + By - b \leq 0 \longrightarrow \begin{array}{l} \text{Método de Solución:} \\ \text{Branch and Bound.} \\ \text{Método de los planos de corte de Gomory.} \end{array}$$

$$x \geq 0, x \in \mathfrak{R}^n, y \in \{0,1\} \longrightarrow \text{Métodos basados en la teoría poliedral [5].}$$

Capítulo 3

3. Modelos de Distribución Física y Transporte

Los problemas de distribución consisten básicamente en asignar una ruta a cada vehículo de una flota para repartir o recoger mercancías. Los clientes se localizan en determinados puntos y a su vez pueden tener horarios de servicio determinados. Según lo descrito se trata entonces de un problema de secuenciación y programación de los horarios de las unidades de transporte. Algunas características de estos problemas son:

- Tamaño de flota: número de vehículos limitado/ ilimitado
- Tipo de flota: homogénea/heterogénea
- Almacén: depósito único/múltiple
- Naturaleza de la demanda: determinada/estocástica/fija/dinámica
- Localización de la demanda: nodos/arcos
- Restricciones horarias de servicio: sin restricciones/ventana temporal
- Restricciones en la capacidad de los vehículos: limitada/ilimitada
- Duración máxima de una ruta: limitada/ilimitada

3.1 Problema del Ruteo de Vehículos

La planificación de rutas es uno de los principales problemas en la optimización de las operaciones logísticas de transporte cuyo objetivo principal es reducir los costos de esta actividad obteniéndose ahorros entre el 5% y el 20% de los costos totales de

transportación y entre el 10% y 20% del costo final de los bienes lo que justifica el uso de las técnicas de investigación de operaciones.

Uno de los problemas más estudiados de optimización y combinatoria es el TSP que consiste en visitar una y solo una vez un conjunto de clientes, partiendo de un punto inicial y finalmente retornando a éste, siguiendo una ruta de menor costo. El VRP tiene planteamientos basados en TSP. Propuesto por Dantzig y Ramser en 1959 es un problema importante para el transporte, distribución y logística. Lo que se plantea en este problema es que con una flota de vehículos con una determinada capacidad se necesita despachar bienes situados en un depósito central para los clientes que han realizado pedidos de tales productos siendo visitados una sola vez con el objetivo de minimizar el costo de la distribución de las mercancías. Actualmente se resuelven estos problemas de manera aproximada y de forma eficiente con adaptaciones de algoritmos aplicados al TSP mediante la incorporación de metaheurísticas [1].

3.1.1 Métodos de Solución para los Problemas de Ruteo de Vehículos

Se han propuesto varios métodos para solucionar el VRP y se pueden agrupar en exactos y aproximados.

Algoritmos exactos: dada la complejidad de los problemas, solo instancias con pocos clientes (hasta 50 aproximadamente) pueden ser resueltas con métodos exactos; normalmente, se resuelve el problema con un esquema de ramificación y poda o acotación, Branch & Bound.

Algoritmos aproximados: se clasifican a su vez en heurísticas y metaheurísticas.

- **Heurísticas:** son procedimientos simples, no aseguran encontrar la solución óptima pero si una muy cercana a través de una exploración limitada del espacio solución. Las soluciones obtenidas son aceptables y tienen una complejidad algorítmica baja, pueden ser mejoradas a través procedimientos sofisticados como lo son los algoritmos constructivos obteniendo las heurísticas de inserción y ahorro.
- **Metaheurísticas:** son procedimientos complejos que por lo general emplean heurísticas de búsqueda local y mejora; tienen un costo computacional más elevado, pero exploran el espacio solución de una manera más amplia que los algoritmos heurísticos. Para encontrar mejores soluciones se puede recurrir a procedimientos como: Recocido Simulado, Algoritmos Genéticos, Búsqueda Tabú, 2 – Opt.

3.1.2 Complejidad Algorítmica

El criterio para saber si un problema de optimización combinatoria es difícil o no, es la complejidad del algoritmo, la que básicamente relaciona el tiempo de ejecución con el tamaño del procedimiento. Existen muchas opciones de solución para un problema, sin embargo, debemos escoger la mejor secuencia de pasos y con el menor tiempo de ejecución. Los VRP pertenecen en su mayoría a la clase NP-Hard, debido al gran consumo de recursos computacionales para encontrar una solución óptima que crece de forma exponencial en relación al tamaño del problema (cantidad de clientes).

3.2 Clasificación del los problemas VRP

Durante el transcurso de las operaciones aparecen muchas restricciones para los VRP, es por esto que aparecen variantes del problema original. Entre las más importantes tenemos:

Problema	Características	Optimizar
CVRP (Capacitated VRP)	Diseñar rutas de modo que los vehículos visiten a todos los clientes. La ruta no puede sobrepasar la capacidad del vehículo.	Función de costos toma en cuenta la capacidad del vehículo.
VRPTW (VRP with Time Window)	Diseñar rutas de modo que los vehículos visiten a todos los clientes de acuerdo a una ventana de tiempo previamente establecida.	Función de costos toma en cuenta las ventanas de tiempos de los clientes.
CVRPTW	CVRP + VRPTW	Función de costos toma en cuenta las ventanas de tiempo de los clientes y la capacidad de cada vehículo.

Tabla 3.1 Clasificación de los VRP

Otras variantes pueden ser: MDVRP (Multiple Depots VRP), VRPSD (VRP Stochastic Demands), VRPSC (VRP Stochastic Customers), VRPST (VRP Stochastic Time), SDVRP (Split Delivery VRP), VRPB (VRP Backhauls), VRPPD (VRP Picking & Delivery), PVRP (Period VRP), MFVRP (Mix Fleet VRP). [1].

3.2.1 Problema del Ruteo Capacitado con Ventanas de Tiempo (CVRPTW)

El problema del CVRPTW constituye una modelización útil de muchas situaciones reales es por eso que tiene un sinnúmero de aplicaciones en áreas como: automotriz, transporte, industria, planificación, defensa, banca, sector público, etc. En algunos casos las ventanas de tiempo se asocian al intervalo de servicio posible para la entrega o recogida de mercancías para cada uno de los clientes. El problema clásico se puede plantear de la siguiente manera: si se tiene una flota de vehículos del mismo tipo localizada en un depósito central y un conjunto de clientes con una demanda conocida, se debe diseñar un conjunto de posibles rutas que empiecen y terminen en el almacén de modo que se visiten todos los clientes una sola vez al mínimo costo. Además cada ruta debe satisfacer las restricciones de capacidad de los vehículos y de las ventanas de tiempo.

Esta primera solución pertenece al conjunto de rutas solución que se encuentran dentro de la región factible de soluciones, no se asegura que la solución encontrada sea la óptima. Lo que se hará es aplicar un método de solución metaheurística para mejorar la solución. Además se deben considerar las siguientes restricciones, que describen al CVRPTW:

- Capacidad limitada de los vehículos.
- Varios vehículos pueden atender en forma conjunta a un cliente.

- El cliente debe ser visitado dentro de una determinada ventana de tiempo.
- El vehículo puede llegar al punto de entrega antes y esperar el inicio de la ventana de tiempo.
- Se considera una velocidad promedio para los vehículos.
- Se considera distancias Manhattan.
- El cliente se visita una sola vez [1].

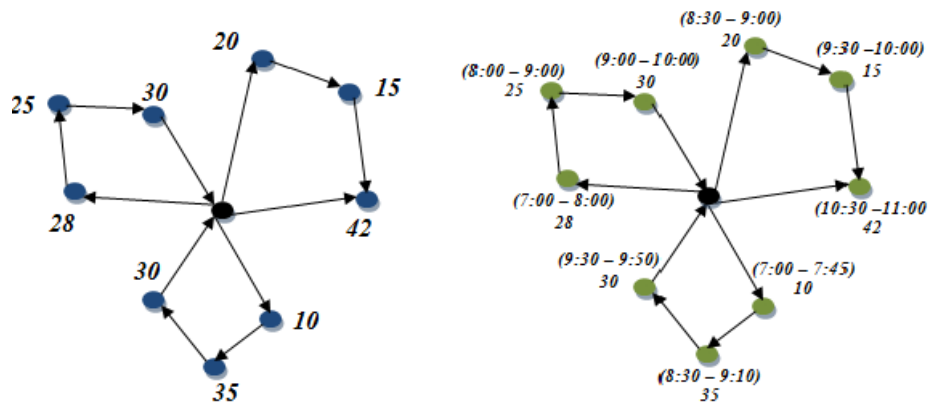


Figura 3.1 CVRP y CVRPTW

3.2.1.1 Modelo Matemático del Problema del CVRPTW

El problema del VRPTW se define para una flota homogénea de vehículos (V), un conjunto de clientes (C) y un grafo orientado (G). El grafo contiene $|C|+2$ vértices, de los cuales los clientes corresponden a $1, 2, 3, \dots, n$ y el almacén se representa con el nodo 0 y $n+1$ siendo N el conjunto de nodos. El conjunto de los arcos (A) representa las posibles conexiones entre los nodos. Los arcos no pueden terminar en el nodo 0 ni pueden empezar en el $n+1$. Todas las rutas empiezan en 0 y terminan en $n+1$. Cada arco $(i, j) \in A, i \neq j$ que pertenece a la red tiene asociado un costo C_{ij} y una duración del viaje t_{ij} . El tiempo t_{ij} incluye una duración del servicio S_i al cliente i . Cada vehículo se

caracteriza por una capacidad de carga q . Cada cliente presenta una demanda q_i , $i \in C$. Para cada uno de los clientes, el inicio del servicio debe realizarse en un intervalo de tiempo denominado ventana temporal $[e_i, u_i]$, $i \in C$. El depósito también tiene una ventana temporal $[e_0, u_0]$ que marca los límites en la salida y vuelta de los vehículos. Se conviene que si un vehículo llega demasiado pronto a la cita con el cliente, deberá esperar hasta que la ventana temporal se abra, pero nunca se iniciará el servicio si no se llega a tiempo. Se puede admitir que $e_0=0$, es decir que las rutas comienzan a la hora. También se asume que los datos son números enteros y no negativos.

Se debe asignar a cada cliente un vehículo y una secuencia de clientes para cada vehículo de modo que el costo sea mínimo, todo esto sujeto a las restricciones definidas anteriormente. El modelo matemático contiene dos conjunto de variables de decisión (X y b). Para cada arco (i, j) , $i \neq j$, $i \neq n+1$, $j \neq 0$ y para cada vehículo k , se define X_{ijk} como:

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{si el vehículo } k \text{ viaja directamente desde el cliente } i \text{ al } j \\ 0, & \text{sino} \end{cases}$$

La variable de decisión b_{ik} se define para cada nodo i y para cada vehículo k e indica el momento en que empieza el servicio. En el caso de que no exista el servicio, la variable no tiene significado. Se asume que $b_{0k} = 0$, $\forall k$ y que $b_{n+1,k}$ denota la llegada del vehículo k a la base.

El objetivo consiste en diseñar un conjunto de rutas de costo mínimo, una para cada vehículo de forma que:

- Se visite exactamente una sola vez a cada cliente
- Cada ruta empiece y termine en el depósito
- Se respeten las restricciones de capacidad de los vehículos y los horarios de entrega.

El modelo puede formularse matemáticamente como sigue:

$$\text{Minimizar: } \sum_{k \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} C_{ij} X_{ijk} \quad (1.1)$$

$$\text{Sujeto a: } \sum_{k \in V} \sum_{j \in N} X_{ijk} = 1 \quad \forall i \in C \quad (1.2)$$

$$\sum_{i \in C} q_i \sum_{j \in N} X_{ijk} \leq Q \quad \forall k \in V \quad (1.3)$$

Si le añadimos las restricciones de horario de servicio

$$\sum_{j \in N} X_{0jk} = 1 \quad \forall k \in V \quad (1.4)$$

$$\sum_{i \in N} X_{ihk} - \sum_{j \in N} X_{hjk} = 0 \quad \forall h \in C, \forall k \in V \quad (1.5)$$

$$\sum_{i \in N} X_{i,n+1,k} = 1 \quad \forall k \in V \quad (1.6)$$

$$X_{ijk} (b_{ik} + t_{ij} - b_{jk}) \leq 0 \quad \forall i, j \in N, \forall k \in V \quad (1.7)$$

$$e_i \leq b_{ik} \leq u_i \quad \forall i \in N, \forall k \in V \quad (1.8)$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N, \forall k \in V \quad (1.9)$$

La función objetivo (1.1) indica que el costo total del recorrido debe ser mínimo. La condición (1.2) asegura que cada cliente sea visitado una sola vez por un vehículo y la (1.3) que cualquier vehículo se carga como mucho a su capacidad.

El conjunto de restricciones (1.4), (1.5), (1.6) son ecuaciones de flujo que garantizan que el vehículo sale del nodo 0 una sola vez, que abandona cualquier nodo i , $i \in C$ si y solo si ha entrado antes en él y al final vuelve al nodo $n+1$. Las inecuaciones (3.7) establecen que el vehículo k no pueda llegar a j antes de $|b_{ik}| + t_{ij}$, cuando se viaja de i a j . El conjunto de restricciones (3.8) aseguran que se respetan todas las ventanas temporales y las condiciones (3.9) garantizan que las variables X_{ijk} sean enteras. Por último cuando en algún caso la demanda particular de un cliente supere la capacidad del vehículo, el esquema teórico mantiene su validez simplemente creando nuevos clientes ficticios con la misma localización y horarios de servicio, pero con su demanda dividida [2].

3.3 El Método de los Ahorros.

El método de los ahorros fue desarrollado por Clarke y Wright en 1963 siendo la heurística más significativa para el VRP. Es la aplicación del sentido común a la hora de construir rutas de transporte.

El algoritmo de ahorros es un algoritmo heurístico, y por consiguiente no proporciona una solución óptima al problema. El método hace, sin embargo, que a menudo rinda una solución relativamente buena. Es decir, una solución que se desvía poco de la solución óptima. Las soluciones pueden ser mejoradas usando la heurística 2 – Opt.

El concepto básico de ahorro expresa el ahorro en costos obtenido uniendo dos rutas en una sola ruta, tal como lo muestra la figura 3.2, donde el punto 0 representa el depósito.

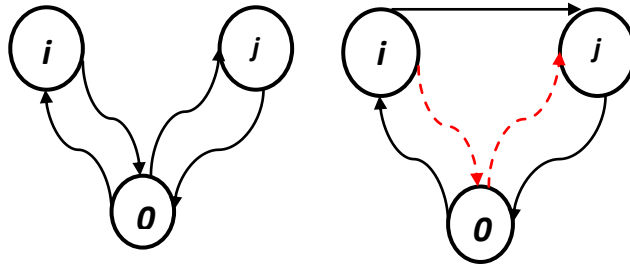


Figura 3.2 Método de los ahorros

3.4 Intercambios 2 – Opt.

Cuando existen varias rutas es posible intercambiar los enlaces de forma que estos pertenezcan a dos itinerarios distintos. Entonces los primeros clientes de una ruta se unen a los últimos clientes de la siguiente ruta manteniéndose la orientación en las trayectorias puesto que la introducción de clientes con ventanas temporales tardías de una ruta se enlazan con aquellos de la otra que las tienen más tempranas lo cual favorece que las soluciones resultantes sean factibles.

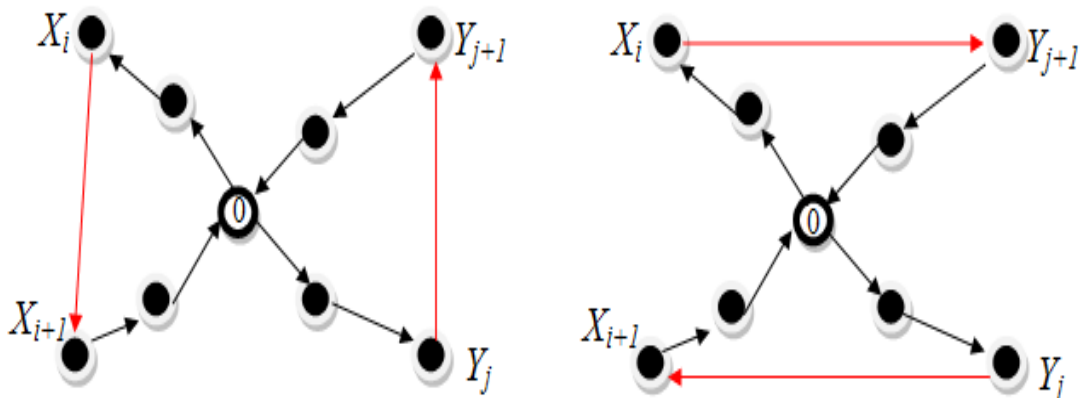


Figura 3.3 Intercambio 2- Opt.

3.5 Algoritmo del Vecino Más Cercano

El algoritmo consiste en escoger el mejor vecino para cada uno de los nodos, es decir que situándose en un nodo se escoge la ruta con la menor distancia posible hacia el nodo siguiente y así sucesivamente. El problema consiste básicamente en encontrar una ruta que, empezando y terminando en la misma ciudad, recorra sólo una vez las ciudades restantes y que a la vez esta ruta sea la mínima posible.

Los costos son simétricos en el sentido de que viajar desde la ciudad *X* a la ciudad *Y* tiene el mismo costo que viajar desde la ciudad *Y* a la ciudad *X*. La condición de visitar todas las ciudades implica que el problema se reduce a decidir en qué orden las ciudades van a ser visitadas. Este problema se cataloga NP-completo, lo que significa que el esfuerzo computacional para encontrar una solución óptima crece de forma exponencial dependiendo del número de nodos de la red.

Capítulo 4

4 Situación actual de la empresa

Para sus operaciones, la empresa ha dividido a la ciudad de Guayaquil en tres grandes zonas como lo son: Norte, Centro y Sur; dentro de las cuales se encuentran ubicados la totalidad de los clientes.

Para efecto de estudio, se selecciona la zona NORTE de la ciudad de Guayaquil, la cual atiende a 37 clientes, la empresa pone a disposición de sus clientes 4 horarios de

atención para la entrega de los pedidos, el mismo que lo elige el cliente para su mayor conveniencia. Esto ha dado como resultado que se utiliza más de un camión en un mismo turno para cubrir la demanda de los clientes a quienes se debe atender.

La demanda de productos de cada cliente se la detalla a continuación en la Tabla 4.1

CLIENTE	DEMANDA (unidades)
1	0
2	46
3	38
4	25
5	28
6	17
7	27
8	20
9	24
10	40
11	25
12	37
13	24
14	16
15	23
16	30
17	47
18	29
19	49
20	44
21	35
22	27
23	49
24	32
25	30
26	33
27	32
28	39

29	28
30	44
31	40
32	20
33	50
34	22
35	18
36	36
37	15
38	41

Tabla 4.1 Clientes y cantidad demandada

El primer horario de atención que ofrece la empresa es de 9 am a 10 am, el cual se lo denota como **turno 1**. Dentro de este turno se visita a 7 clientes quienes han elegido este horario para ser atendidos, se puede apreciar a cada uno con su respectiva demanda en la tabla 4.2

TURNO 1 (9 am – 10 am)

CLIENTE	DEMANDA
1	0
5	28
8	20
11	25
13	24
18	29
31	40
34	22

Tabla 4.2 Turno 1

Para cubrir la totalidad de los clientes correspondientes a este turno de trabajo se cuenta con 3 rutas, a continuación en la tabla 4.3 se detalla la secuencia a seguir de cada ruta donde el número 1 que se encuentra al principio y al final de la secuencia de cada ruta, indica el punto de salida y llegada del vehículo, que en este caso es la bodega de la empresa, mientras que los números restantes representan a los clientes atendidos, además la distancia total recorrida, la demanda cubierta y el tiempo total de la ruta.

Ruta	Secuencia	Distancia total recorrida (Km)	Demanda total cubierta (unidades)	Tiempo total de recorrido (min)
1	1 - 8 - 1	50.19	20	103.57
2	1 - 5 - 11 - 31 - 1	45.84	93	106.56
3	1 - 18 - 13 - 34 - 1	54.10	75	120.21

Tabla 4.3 Recorridos actuales Turno 1

Distancia Total de Recorrido del Turno 1: 330.34 km

El segundo horario de atención que ofrece la empresa es de 10 am a 11 am, el cual se lo denota como turno 2. Dentro de este turno se visita a 14 clientes quienes han elegido este horario para ser atendidos, se puede apreciar a cada uno con su respectiva demanda en la tabla 4.4

TURNO 2 (10 am – 11 am)

CLIENTE	DEMANDA
1	0
7	27
12	37
16	30
17	47

19	49
21	35
23	49
25	30
26	33
29	28
32	20
33	50
35	18
36	36

Tabla 4.4 Turno 2

Para cubrir la totalidad de los clientes correspondientes a este turno de trabajo se cuenta con 4 rutas, a continuación en la tabla 4.5 se detalla la secuencia a seguir de cada ruta donde el número 1 que se encuentra al principio y al final de la secuencia de cada ruta, indica el punto de salida y llegada del vehículo, que en este caso es la bodega de la empresa, mientras que los números restantes representan a los clientes atendidos, además la distancia total recorrida, la demanda cubierta y el tiempo total de la ruta.

Ruta	Secuencia	Distancia total recorrida (Km)	Demanda total cubierta (unidades)	Tiempo total de recorrido (min)
4	1 - 7 - 19 - 21 - 1	48.55	111	114.86
5	1 - 12 - 23 - 25 - 1	51.96	116	122.47
6	1 - 16 - 17 - 26 - 36 - 1	42.65	146	108.65
7	1 - 29 - 32 - 33 - 35 - 1	45.33	116	109.22

Tabla 4.5 Recorridos actuales Turno 2

Distancia Total de Recorrido del Turno 2: 188.48 km

El tercer horario de atención que ofrece la empresa es de 11 am a 12 pm, el cual se lo denota como turno 3. Dentro de este turno se visita a 8 clientes quienes han elegido este horario para ser atendidos, se puede apreciar a cada uno con su respectiva demanda en la tabla 4.6.

TURNO 3 (11 am – 12 pm)

CLIENTE	DEMANDA
1	0
2	46
9	24
15	23
22	27
24	32
27	32
37	15
38	41

Tabla 4.6 Turno 3

Para cubrir la totalidad de los clientes correspondientes a este turno de trabajo se cuenta con 2 rutas, a continuación en la tabla 4.7 se detalla la secuencia a seguir de cada ruta donde el número 1 que se encuentra al principio y al final de la secuencia de cada ruta, indica el punto de salida y llegada del vehículo, que en este caso es la bodega de la empresa, mientras que los números restantes representan a los clientes atendidos, además la distancia total recorrida, la demanda cubierta y el tiempo total de la ruta.

Ruta	Secuencia	Distancia total recorrida (Km)	Demanda total cubierta (unidades)	Tiempo total de recorrido (min)
8	1 - 2 - 27 - 37 - 1	44.4	93	103.69
9	1 - 22 - 9 - 15 - 24 - 38 - 1	46.48	147	116.47

Tabla 4.7 Recorridos actuales Turno 3

Distancia Total de Recorrido del Turno 3: 90.88 km

Finalmente, el cuarto horario de atención que ofrece la empresa es de 12 am a 1 pm, el cual se lo denota como turno 4. Dentro de este turno se visita a 8 clientes quienes han elegido este horario para ser atendidos, se puede apreciar a cada uno con su respectiva demanda en la tabla 4.8

TURNO 4 (12 pm – 13 pm)

CLIENTE	DEMANDA
1	0
3	38
4	25
6	17
10	40
14	16
20	44
28	39
30	44

Tabla 4.8 Turno 4

Para cubrir la totalidad de los clientes correspondientes a este turno de trabajo se cuenta con 3 rutas, a continuación en la tabla 4.9 se detalla la secuencia a seguir de cada ruta donde el número 1 que se encuentra al principio y al final de la secuencia de

cada ruta, indica el punto de salida y llegada del vehículo, que en este caso es la bodega de la empresa, mientras que los números restantes representan a los clientes atendidos, además la distancia total recorrida, la demanda cubierta y el tiempo total de la ruta.

Ruta	Secuencia	Distancia total recorrida (Km)	Demanda total cubierta (unidades)	Tiempo total de recorrido (min)
10	1 - 4 - 14- 1	50.77	41	108.1
11	1 - 6 - 10 - 1	41.87	57	92.85
12	1 - 3 - 20 - 28 - 30 - 1	49.69	165	125.77

Tabla 4.9 Recorridos actuales Turno 4

Distancia Total de Recorrido del Turno 4: 142.32 km

Total de kilómetros Recorridos sumando todas las 12 rutas establecidas en los 4

Turnos es: 752.03 Km.

Capítulo 5

5 Planteamiento de la solución

5.1 Obtención de datos reales para la aplicación de la Metaheurísticas propuesta.

La empresa registra los datos de los clientes en su sistema, tales como: dirección, transportista, cantidad, novedades, etc. En un principio tenían pocos clientes de gran volumen de carga por lo que solo realizaban viajes dedicados para cada uno de ellos, pero en los últimos años debido a un gran incremento en la cantidad de clientes así

como los requerimientos de cada uno de ellos se vieron en la obligación de zonificar a dichos clientes. Entonces han particionado a la ciudad de Guayaquil en tres grandes zonas: Norte, Centro y Sur.

Tomando en cuenta las zonas y los vehículos disponibles para la distribución, una vez generadas las órdenes de picking, una persona bajo el cargo de “ruteador” se encarga de crear las rutas dentro de una zona basándose en las direcciones de los clientes, entonces un determinado número de pedidos es asignado a un transportista. Para efectos de nuestro proyecto vamos a considerar la posición geográfica de los clientes con lo cual podremos tener una visión más amplia de cómo los clientes se encuentran distribuidos. Debido a que la empresa no cuenta con estos datos tuvimos que obtener su longitud y latitud mediante el uso de un GPS.

5.2 Selección de la Zona

La ruta seleccionada fue la de la Zona Norte porque es la que se encuentra más lejos del operador logístico (Zona Sur) y registra devoluciones frecuentemente. Además no muchos clientes están ubicados en el mismo punto y la distribución es más ágil ya que no son áreas de gran congestionamiento vehicular.



Figura 5.1 Distribución de los clientes en la Zona norte de Guayaquil.

5.3 Ubicación geográfica de los clientes

Una vez seleccionada la zona, es necesario establecer la ubicación geográfica de los clientes. Para el efecto la empresa nos autorizó monitorear la distribución de la zona norte desde la consola de operaciones y mediante el la lectura del GPS cada vez que el camión llegaba a un cliente pudimos obtener las coordenadas angulares, latitud y longitud, que nos expresa la posición de cualquier punto de la superficie terrestre.

El total de los clientes distribuidos en las 3 zonas mencionadas anteriormente es de 287, pero los clientes contenidos dentro de la zona norte, que es objeto de nuestro estudio, son 37. El operador logístico se encuentra ubicado en las coordenadas - 2.247855, -79.894338 (Av. 25 de Julio y calle Puyo), en la tabla 5.1 detallaremos las coordenadas de los clientes:

Cliente	Latitud	Longitud	Zona	Barrio
1	-2.247855	-79.894338	GYE_SUR	AV. 25 DE JULIO (OPERADOR)
2	-2.11102	-79.958	GYE_NORTE	COOP FORTIN
3	-2.0955	-79.9587	GYE_NORTE	FLOR DE BASTION BQ 6
4	-2.110788	-79.951242	GYE_NORTE	COOP. FORTIN
5	-2.09909	-79.9231	GYE_NORTE	COOP B POPULAR
6	-2.077944	-79.898155	GYE_NORTE	VERGELES
7	-2.119127	-79.966362	GYE_NORTE	NUEVA PROSPERINA
8	-2.11426	-79.9872	GYE_NORTE	SERGIO TORAL
9	-2.09909	-79.9345	GYE_NORTE	COOP BASTION POPULAR
10	-2.077932	-79.91375	GYE_NORTE	LOS GERANIOS 2
11	-2.0798666	-79.933533	GYE_NORTE	BASTION POPULAR
12	-2.09854	-79.9745	GYE_NORTE	COOP NUEVO GUAYAQUIL
13	-2.08753	-79.9729	GYE_NORTE	FLOR DE BASTION
14	-2.11422	-79.9864	GYE_NORTE	SERGIO TORAL
15	-2.08361	-79.9254	GYE_NORTE	BASTION POPULAR
16	-2.114972	-79.952649	GYE_NORTE	FORTIN
17	-2.1136	-79.9492	GYE_NORTE	LOT SAN NICOLAS
18	-2.10236	-79.9617	GYE_NORTE	COOP. FLOR DE BASTION
19	-2.10529	-79.958	GYE_NORTE	COOP. PARAISO DE FLOR
20	-2.10306	-79.964	GYE_NORTE	COOP FLOR DE BASTION
21	-2.1038	-79.9611	GYE_NORTE	COOP FLOR DE BASTION
22	-2.11448	-79.918	GYE_NORTE	COOP CARLOS MAGNO
23	-2.107815	-79.979539	GYE_NORTE	COOP BALERIO ESTACIO
24	-2.08679	-79.931	GYE_NORTE	COOP BASTION POPULAR
25	-2.107921	-79.964134	GYE_NORTE	COOP FLOR DE BASTION
26	-2.113581	-79.948436	GYE_NORTE	FORTIN
27	-2.12829	-79.9538	GYE_NORTE	LOMAS DE LA FLORIDA
28	-2.100715	-79.963773	GYE_NORTE	FLOR DE BASTION MZ660
29	-2.09146	-79.935	GYE_NORTE	BASTION POPULAR
30	-2.105125	-79.953725	GYE_NORTE	COOP LINCO SALCEDO
31	-2.09392	-79.9274	GYE_NORTE	COOP BASTION POPULAR
32	-2.0836666	-79.931233	GYE_NORTE	CERRO BASTION
33	-2.087918	-79.922251	GYE_NORTE	CDLA VILLA ESPAÑA
34	-2.09108	-79.956339	GYE_NORTE	FLOR DE BASTION
35	-2.088905	-79.907868	GYE_NORTE	VERGELES
36	-2.14303	-79.92876	GYE_NORTE	COOP. SANTA ADRIANA
37	-2.14172	-79.9387	GYE_NORTE	COOP. PROSPERINA

Tabla 5.1 Coordenadas geográficas de clientes y operador logístico.

5.4 Cálculo de distancias.

Las distancias entre todos los clientes, desde el 1(Operador) hasta el 38, implicó la construcción de 1444 (38 x 38) rutas tal como lo indica la Tabla 5.2. Para poder calcular la distancia entre los clientes aplicamos el algoritmo en Mathematica de la distancia de Manhattan, la cual nos da una muy buena aproximación debido a que la configuración de las calles de Guayaquil describe bloques (manzanas).

La distancia de Manhattan nos facilita el cálculo de distancias entre clientes, pues en vez de calcular pequeñas distancias entre cuadradas horizontales y verticales que implica una ruta de un punto P_1 con coordenadas (x_1, y_1) a un punto P_2 con coordenadas (x_2, y_2) , sumamos una sola distancia horizontal y una sola distancia vertical con la siguiente fórmula $(|x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|)$, donde las barras (|) indican el valor absoluto o positivo del resultado obtenido de dicha sustracción, obteniendo el mismo resultado al sumar todos los pequeños tramos horizontales y verticales.

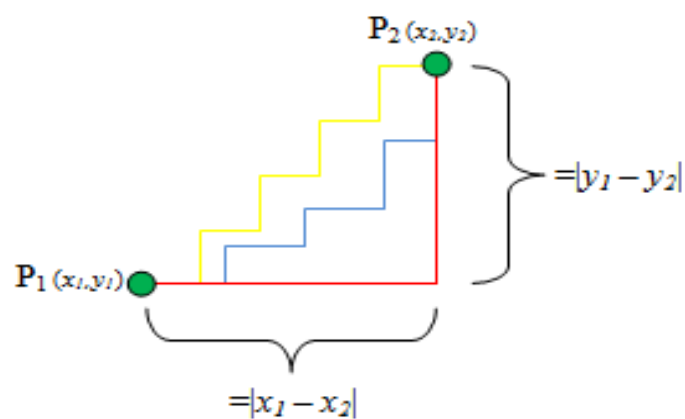


Figura 5.2 Cálculo de la distancia de Manhattan

5.5 Definición de parámetros y funciones del algoritmo.

Para la resolución del problema planteado desarrollamos un programa informático que utiliza como base un modelo de programación del Algoritmo de Clarke & Wright en lenguaje de programación Mathematica, diseñado por Sandoya [5] al cual fue necesario realizar ciertas modificaciones para adaptarlo a nuestros requerimientos, además fue necesario definir algunos parámetros que forman parte de las restricciones del problema. Estos parámetros hacen referencia a la realidad de la situación, a continuación los describimos:

Capacidad del camión: 275 cajas. Considerando que la flota de camiones de la empresa es de 5.5 TN y poseen una capacidad aproximada de 23 m³.

Distancia máxima de recorrido del camión: 1190 Km. El rendimiento de un camión de estas dimensiones es de 7 Km. por litro y posee un tanque de combustible diesel de 170 litros.

Velocidad: 30 Km /h. Puesto que el recorrido se va a realizar en la zona urbana de la ciudad en donde el límite de velocidad es de 40 Km/h. Nosotros hemos considerado prudente una menor velocidad

Tiempos de servicio y recorrido entre clientes. Una vez obtenida la tabla de distancias fue necesaria la creación de una tabla de tiempos de recorrido entre los clientes así como una tabla de tiempos de servicio debido a que son estos valores los que restringirán la creación de una o más rutas.

Creamos la función de factibilidad dentro del algoritmo de Clarke & Wright. Una vez definidos los parámetros definidos anteriormente, la función evalúa tres restricciones que son de vital importancia para el cumplimiento del VRPTW. Estas son:

1. Restricción de Capacidad:

$$\sum_{i=2}^{Length[x]-1} demanda[x[i]] \leq capacidad\ camión$$

2. Restricción de Distancia:

$$\sum_{j=1}^{Length[x]-1} distancia\{[x[j],x[j+1]]\} < distancia\ máxima$$

3. Restricción Ventana Horaria:

$$\sum_{k=1}^{Length[x]-1} tiempoviaje\{[x[k],x[k+1]]\} + tiemposervicio[x[k]] \leq limitesuperior$$

Capítulo 6

6 Resultados Obtenidos

Los resultados obtenidos por la heurística de Clarke & Wright con Ventanas de Tiempo se describen en la tabla y figuras siguientes:

Ruta	Secuencia	Distancia total recorrida (Km)	Demanda total cubierta (unidades)	Tiempo total de recorrido (min)
1	1 - 6 - 10 - 35 - 36 - 1	46.5	111	110.76
2	1 - 2 - 8 - 14 - 12 - 13 - 23 - 25 - 30 - 1	58.92	266	160.4
3	1 - 19 - 3 - 34 - 18 - 20 - 28 - 21 - 37 - 1	51.18	271	145.72
4	1 - 22 - 4 - 16 - 17 - 26 - 7 - 27 - 38 - 1	52.68	262	147.28
5	1 - 5 - 31 - 9 - 29 - 15 - 24 - 11 - 32 - 33 - 1	49.8	270	142.8

Tabla 6.1 Rutas generadas por la heurística de Clarke & Wright

Al final obtenemos un recorrido total de: 259.08 Km

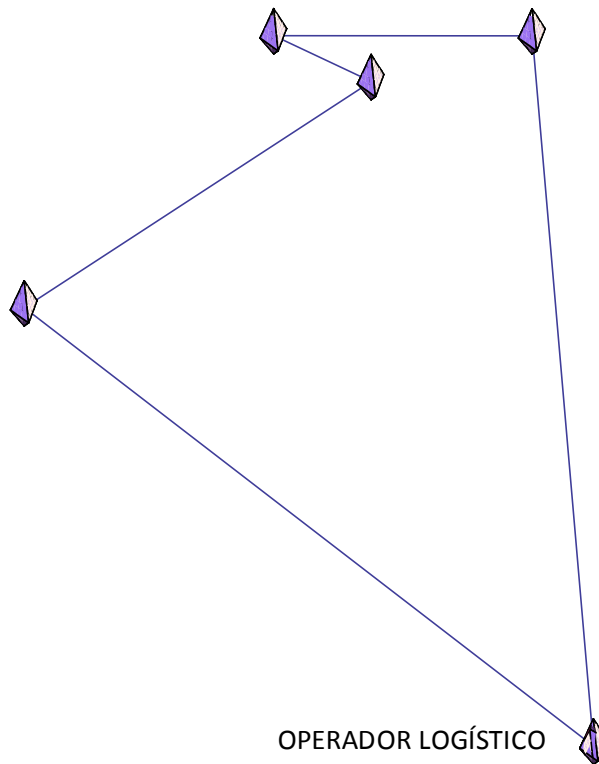


Figura 6.1 Recorrido de la Ruta 1 con Clarke & Wright.

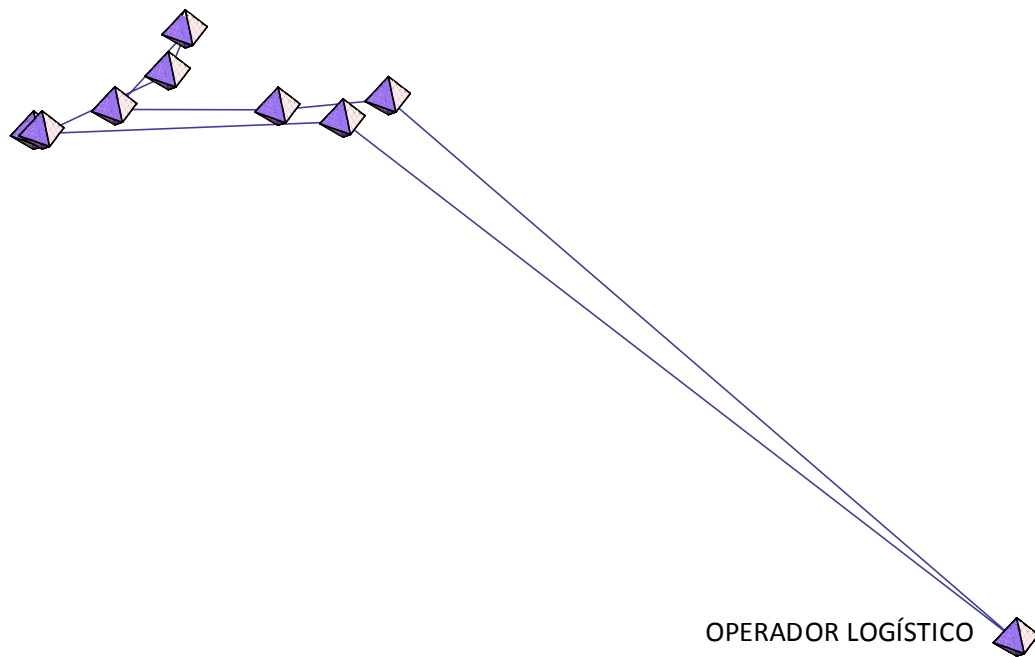


Figura 6.2 Recorrido de la Ruta 2 con Clarke & Wright.

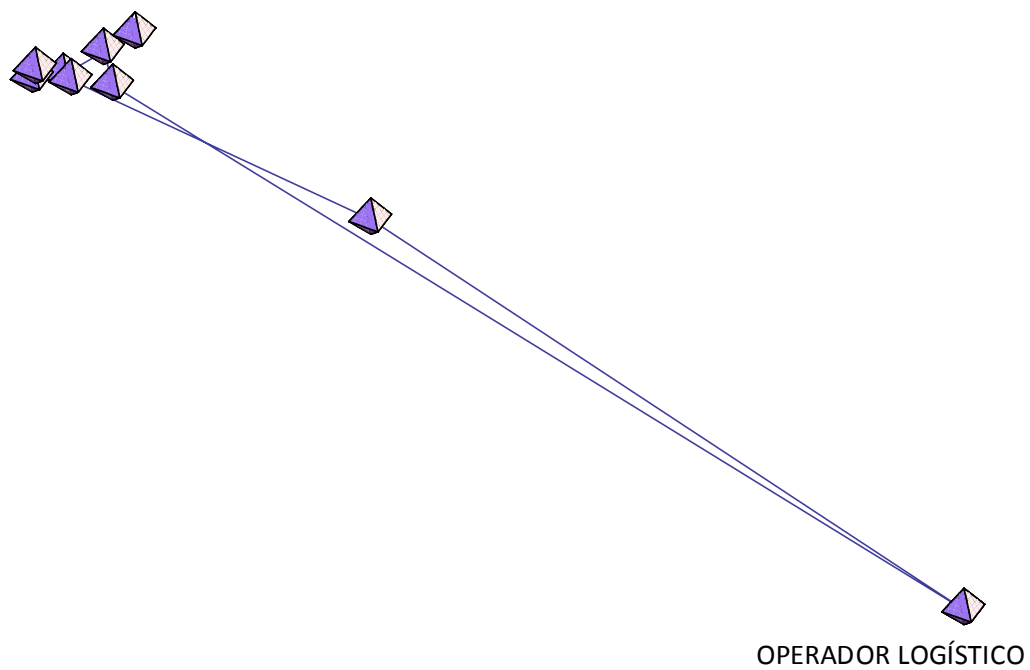


Figura 6.3 Recorrido de la Ruta 3 con Clarke & Wright.

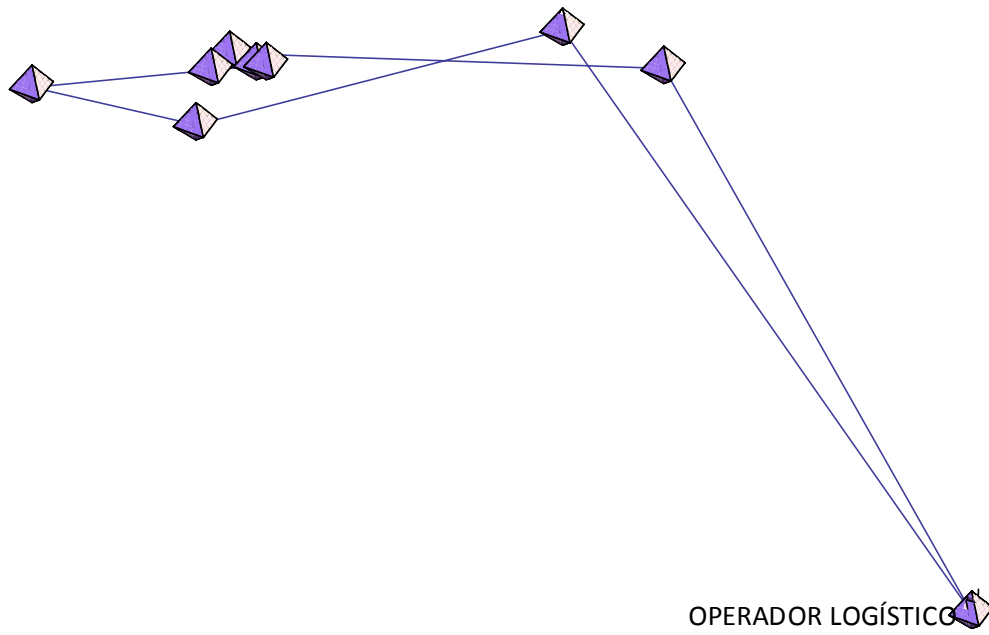


Figura 6.4 Recorrido de la Ruta 4 con Clarke & Wright.

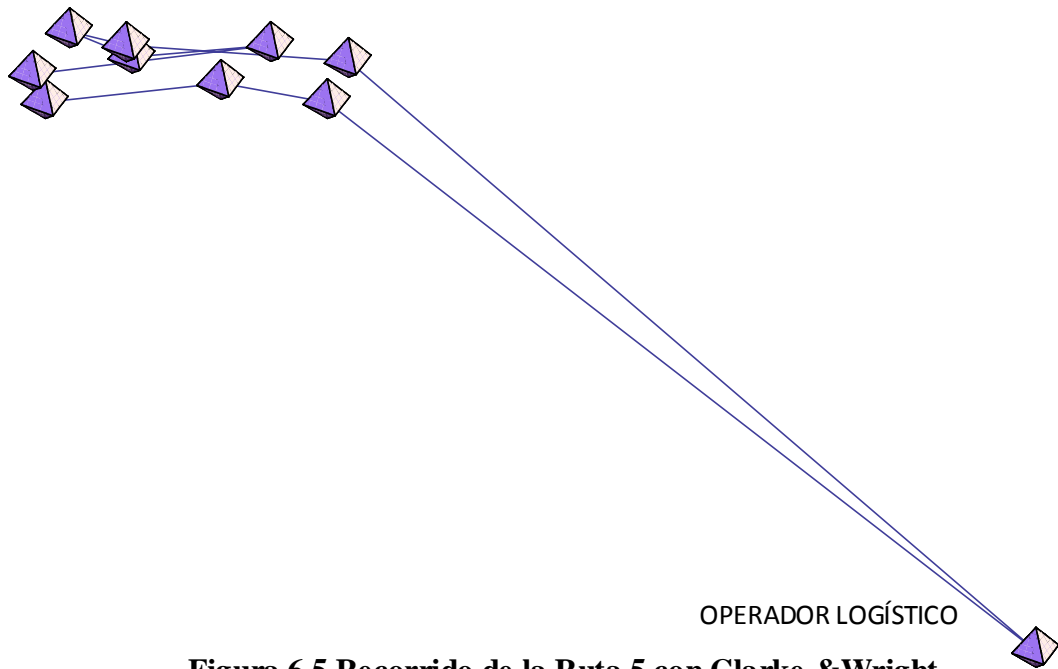


Figura 6.5 Recorrido de la Ruta 5 con Clarke & Wright.

6.1 Aplicación de la heurística de búsqueda local 2 - Opt:

En búsqueda de una mejora entre las rutas aplicamos la búsqueda local 2 - Opt, a continuación se describen los resultados obtenidos:

Ruta	Secuencia	Distancia total recorrida (Km)	Demanda total cubierta (unidades)
1	1 - 6 - 10 - 35 - 36 - 1	46.5	111
2	1 - 2 - 8 - 14 - 23 - 12 - 13 - 25 - 30 - 1	57.42	266
3	1 - 19 - 21 - 18 - 20 - 28 - 3 - 24 - 37 - 1	50.30	271
4	1 - 27 - 7 - 16 - 17 - 26 - 4 - 38 - 22 - 1	48.19	262
5	1 - 5 - 31 - 9 - 29 - 24 - 32 - 11 - 15 - 33 - 1	47.87	270

Tabla 6.2 Rutas mejoradas por la heurística 2 - Opt

Recorrido total con 2-OPT es: 250.31 Km.

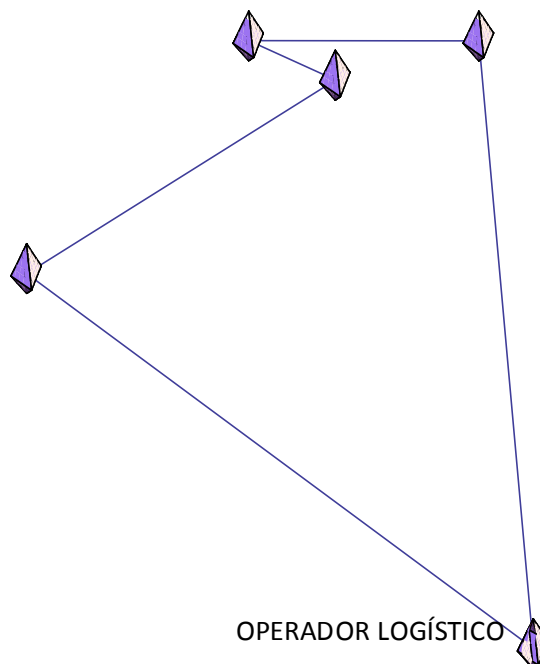


Figura 6.6. Recorrido de la Ruta 1 con 2 - Opt.

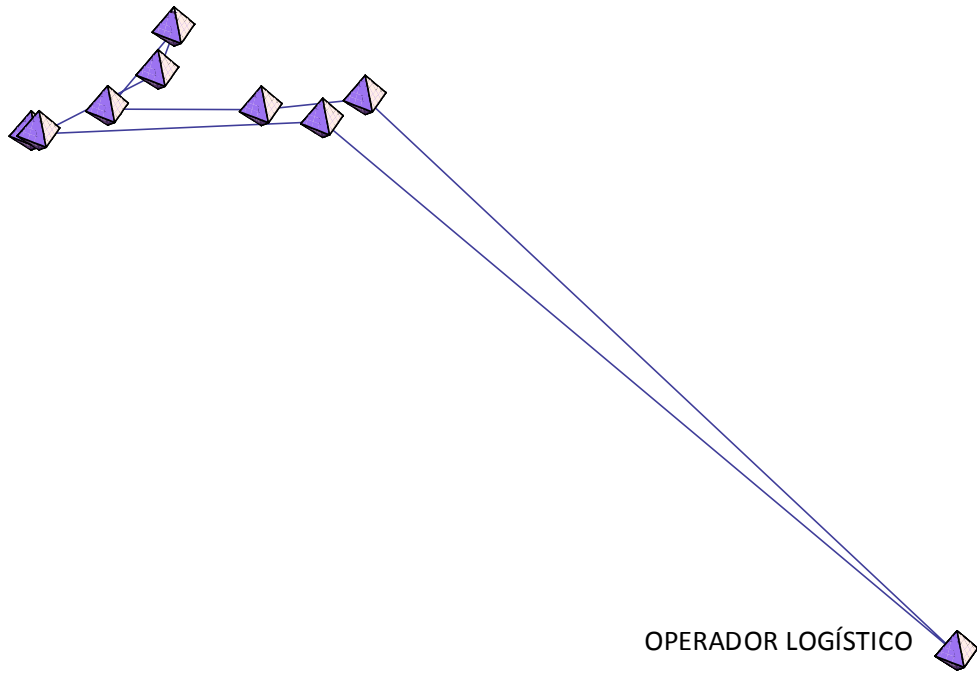


Figura 6.7 Recorrido de la Ruta 2 con 2 – Opt.

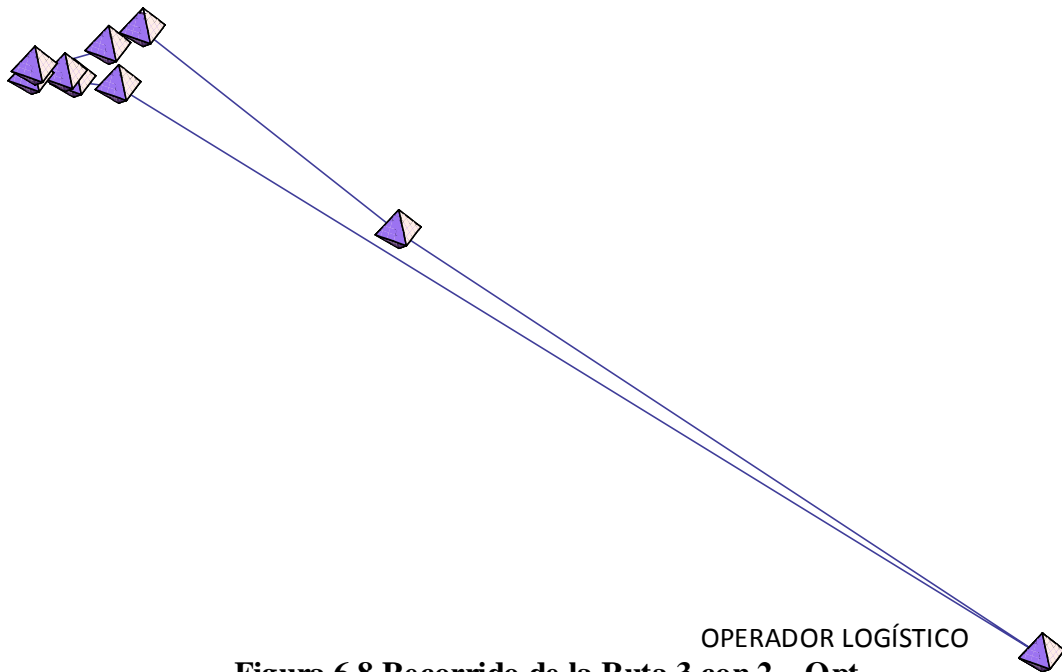


Figura 6.8 Recorrido de la Ruta 3 con 2 – Opt.

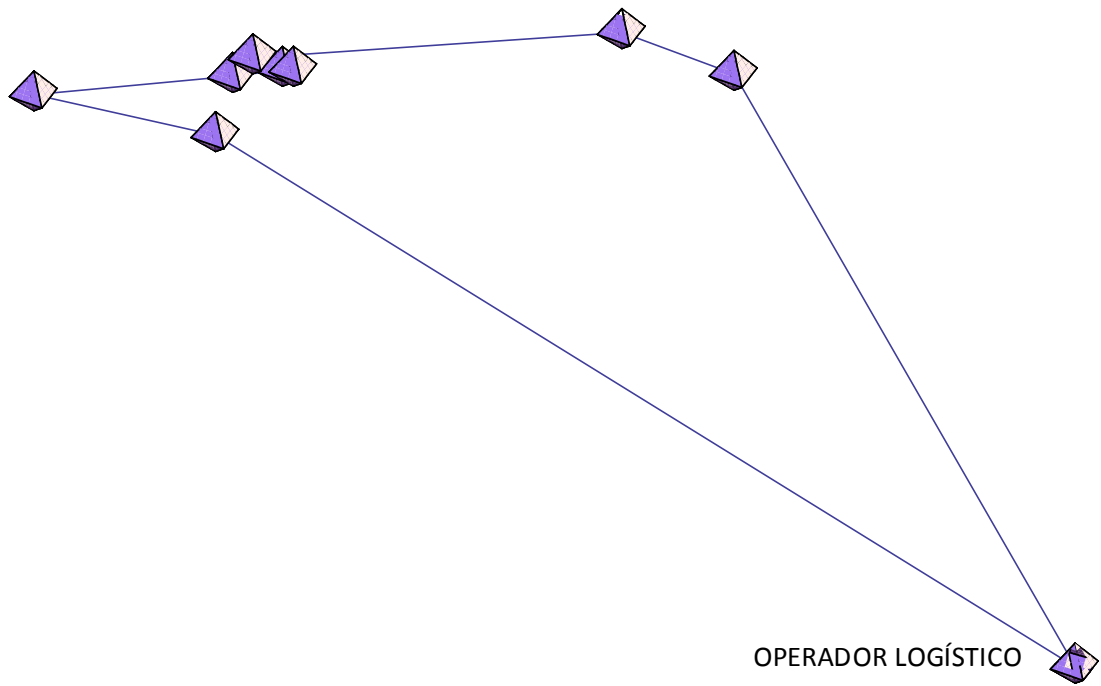


Figura 6.9 Recorrido de la Ruta 4 con 2 - Opt.

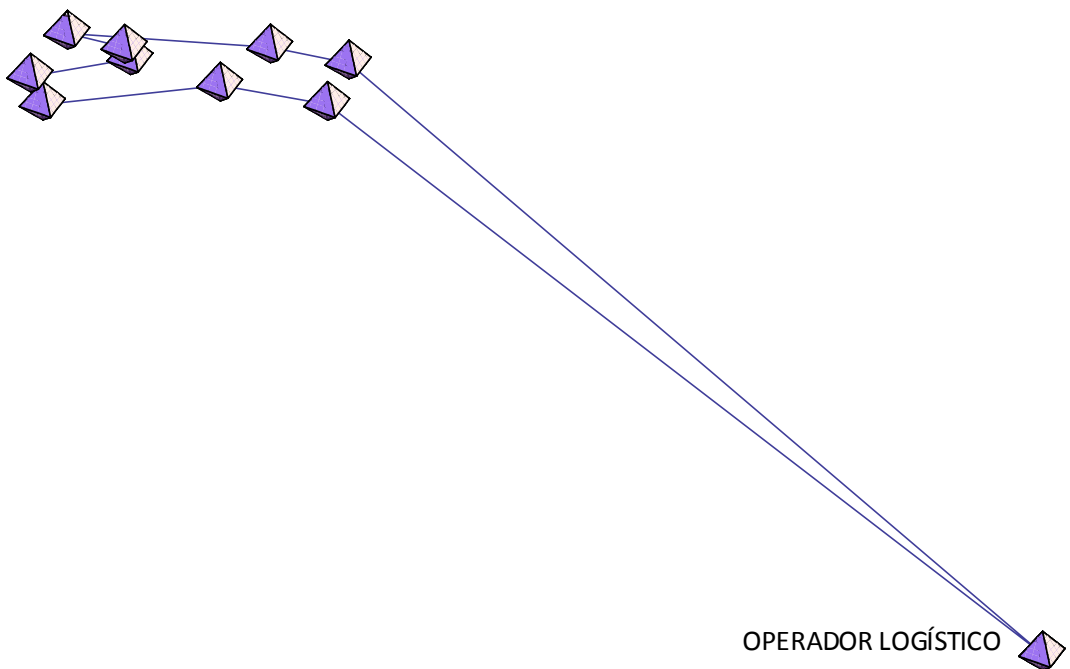


Figura 6.10 Recorrido de la Ruta 5 con 2 - Opt.

6.2 Resultados obtenidos y comparación con los datos de la empresa

HORA DE LLEGADA			
CLIENTE	ACTUAL	CLARKE WRIGHT	AHORRO
2	11:44	9:45	1:59
3	12:48	9:56	2:52
4	12:43	9:47	2:56
5	9:40	9:39	0:01
6	12:38	9:38	3:00
7	10:45	10:17	0:28
8	9:50	9:58	-0:08
9	11:46	9:55	1:51
10	12:45	9:45	3:00
11	9:50	10:22	-0:32
12	10:51	10:11	0:40
13	9:53	10:19	-0:26
14	12:56	10:03	2:53
15	11:55	10:09	1:46
16	10:42	9:53	0:49
17	10:49	9:58	0:51
18	10:09	10:11	-0:02
19	10:54	9:46	1:08
20	12:57	10:16	2:41
21	11:03	10:31	0:32
22	11:35	9:35	2:00
23	11:00	10:30	0:30
24	12:01	10:15	1:46
25	11:12	10:41	0:31
26	10:56	10:06	0:50
27	11:57	10:26	1:31
28	13:05	10:24	2:41
29	10:44	10:01	0:43
30	13:14	10:49	2:25
31	10:00	9:46	0:14
32	10:51	10:27	0:24
33	10:57	10:33	0:24
34	10:02	10:03	-0:01
35	11:08	9:55	1:13
36	11:12	10:04	1:08
37	12:08	10:50	1:18
38	13:01	10:42	2:19
		AHORRO TOTAL	22:15

Tabla 6.3 Comparación de la situación actual con los resultados obtenidos

6.3 Comparación de resultados entre Clarke & Wright y Mejora 2-Opt

Si comparamos los resultados obtenidos en **2- OPT** con los de **Clarke & Wright**, las rutas 3, 4, y 5 varían de la siguiente forma:

	CLARKE & WRIGHT	2-OPT
Ruta 3	1 – 19 – 3 – 34 – 18 – 20 – 28 – 21 – 37 – 1	1 – 19 – 21 – 18 – 20 – 28 – 3 – 24 – 37 – 1
Ruta 4	1 – 22 – 4 – 16 – 17 – 26 – 7 – 27 – 38 – 1	1 – 27 – 7 – 16 – 17 – 26 – 4 – 38 – 22 – 1
Ruta 5	1 – 5 – 31 – 9 – 29 – 15 – 24 – 11 – 32 – 33 – 1	1 – 5 – 31 – 9 – 29 – 24 – 32 – 11 – 15 – 33 – 1

Tabla 6.4 Comparación entre los resultados Clarke & Wright y 2 – Opt

Mejora es de: 3.38 % que serian 8.77 km menos.

Capítulo 7

7. Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones

La planificación del rutas del Operador Logístico es su principal problema, el cual puede ser modelado como un ruteo capacitado con ventanas de tiempo y para resolverlo se utiliza la Heurística de Clarke & Wright adaptado a las restricciones de capacidad y tiempo del problema. Además se aplica la heurística de mejora 2 – Opt que mediante el intercambio entre las mejores rutas reduce la infactibilidad de la mejor respuesta posible. Entonces se puede enunciar las siguientes conclusiones:

- Mediante el uso de la heurística de Clark & Wright, se pudo establecer rutas de menor recorrido permitiendo una reducción de costos, logrando así un ahorro de \$110.00 por jornada diaria. Dicho ahorro resulta de la diferencia entre utilizar 12 rutas que tienen asignado un vehículo a cada una de ellas a un costo de \$30.00 y la propuesta de utilizar 5 rutas asignando un vehículo a cada una de ellas al mismo costo de la jornada diaria.
- Minimizar el porcentaje de devoluciones ocasionadas por el incumplimiento de la entrega en un horario definido, tratando de aumentar nuestro nivel de

servicio que en la actualidad se encuentra en un 90% de efectividad en la entrega. Se espera entonces que este porcentaje de efectividad se incremente a pesar de que no se puede cuantificarlo con exactitud hasta una vez puesto en práctica el modelo planteado.

- Una vez aplicadas estas heurísticas la solución sugerirá una reestructuración que involucra a zonas y clientes obteniendo rutas acorde a los recursos de la empresa, el beneficio ahora sería mutuo pues pasamos de utilizar 12 rutas a utilizar solo 5 rutas cubriendo toda nuestra demanda y a la vez garantizamos la satisfacción del cliente en su entrega. Esto también da como resultado el ahorro en tiempo de 22 horas con 15 minutos.
- Los recursos de la empresa han logrado llegar a un porcentaje de utilización adecuado permitiendo así que los costos operativos sean mejor administrados, debido a que si antes se tenía que depender de 12 camiones para cubrir toda la zona norte pues ahora solo se necesitara 5 para cubrir la misma zona, logrando una tercerización menos costosa.

7.2 Recomendaciones

Lo que la empresa requiere es una planeación dinámica de sus rutas para que al momento de realizar algún cambio en los recorridos establecidos inicialmente puedan generarse nuevas rutas que permitan cubrir a la totalidad de los clientes.

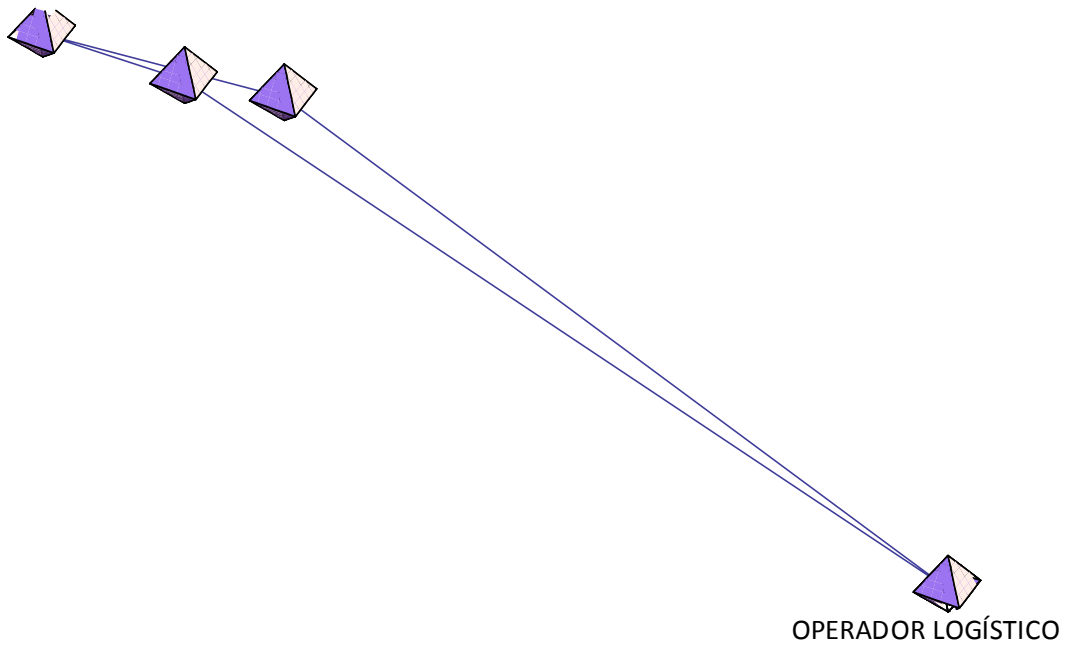
La compra de un software de optimización de rutas que permita evaluar, optimizar y planificar las rutas de la flota obteniendo una mejora en la productividad. Por otro lado en caso de que no se cuente con los recursos económicos suficientes, la aplicación de Google Maps es una alternativa que se puede considerar para lo cual se necesitará hacer un levantamiento de datos geográficos de un determinado lugar que la empresa no posee actualmente.

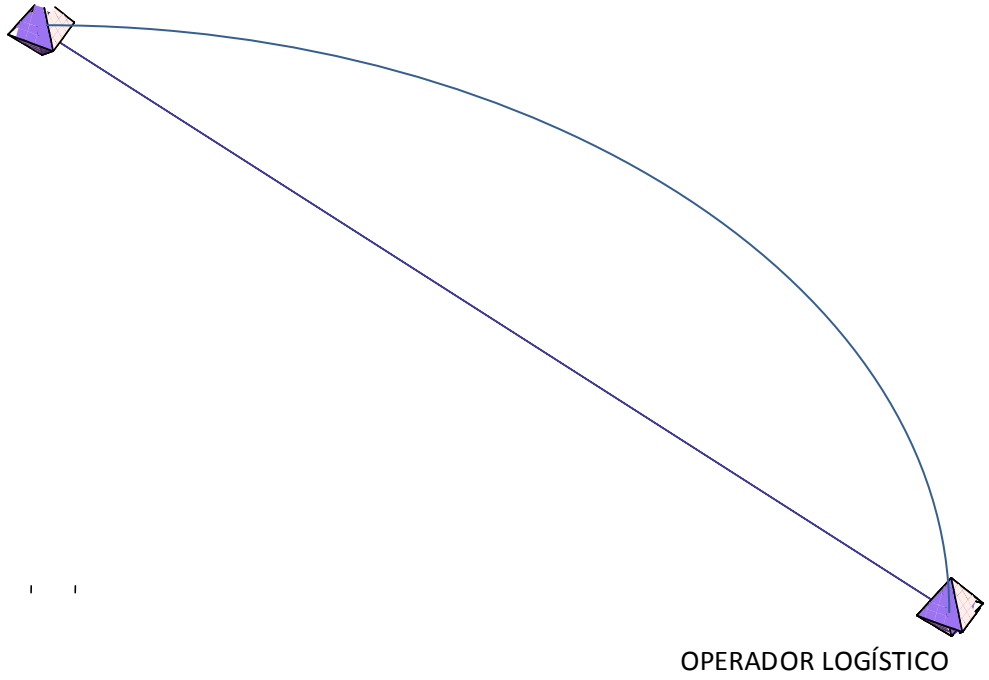
Un operador logístico con gran cantidad de clientes no debe desarrollar sus operaciones empíricamente sino más bien automatizarlas utilizando programas logísticos que se adapten con facilidad a las variantes del negocio.

En Ecuador existen alrededor de 30 compañías Operadoras Logísticas consideradas las más importantes por los servicios integrales que estas ofrecen. Adicionalmente alrededor de 100 empresas se desenvuelven en el campo de la logística indirectamente como es el caso de las transportadoras de carga y empresas couriers. Esta cantidad sugiere incrementar el número de investigaciones y desarrollo de proyectos de ruteo con el objetivo de mejorar la gestión logística.

BIBLIOGRAFÍA:

- [1] James Tomalá Robles y Johnny Pincay Villa. Diseño de un sistema de soporte de decisiones para resolver el problema del ruteo en un servicio courier. Dspace Web Site. Citado el 7 de agosto del 2010. www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/11107
- [2] Josep Medina Folgado. Optimización Heurística Económica Aplicada a las Redes de Transporte del tipo VRPTW. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia, 2002.
- [3] Introducción a la programación Matemática. Uv.es. Revisado el 1 de Agosto del 2010. Disponible en <http://www.uv.es/sala/C010405.pdf>
- [4] Alberto Aguilera. Modelos Matemáticos de Optimización. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad Pontificia Comillas Madrid, 2001
- [5] Fernando Sandoya. Investigación de Operaciones I. Instituto de Ciencias Matemáticas. Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2007
- [6] Jens Lysgaard. Clarke & Wright's Savings Algorithm. Department of Management Science and Logistics, The Aarhus School of Business, 1997





| |

OPERADOR LOGÍSTICO