

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.

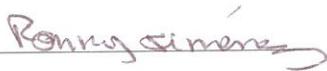


Ronny Jiménez Morocho



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 21 m³, 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:

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

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

$$g(x) \leq 0$$

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

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 de 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].

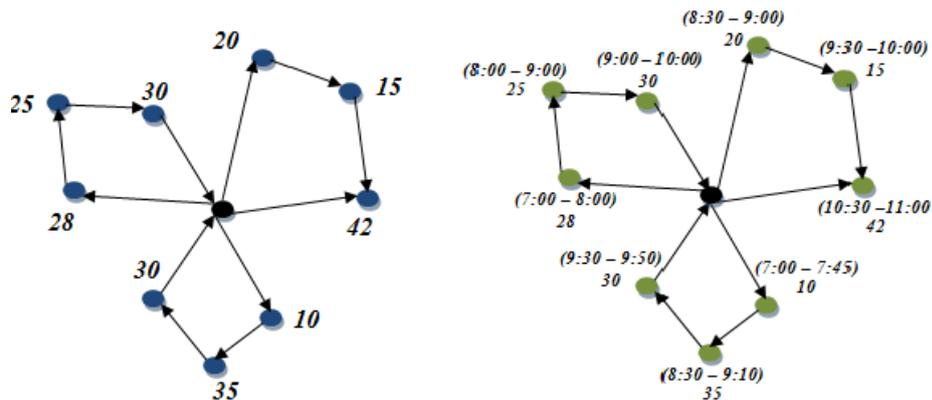


Figura 3.1 CVRP y CVRPTW

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.

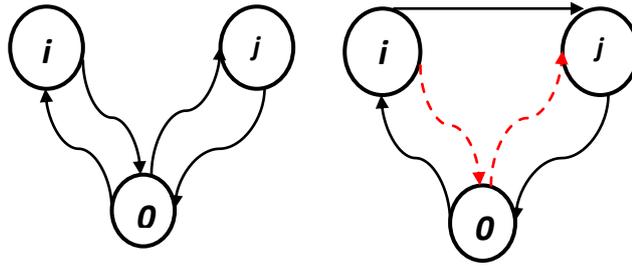


Figura 3.2 Método de los ahorros

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.

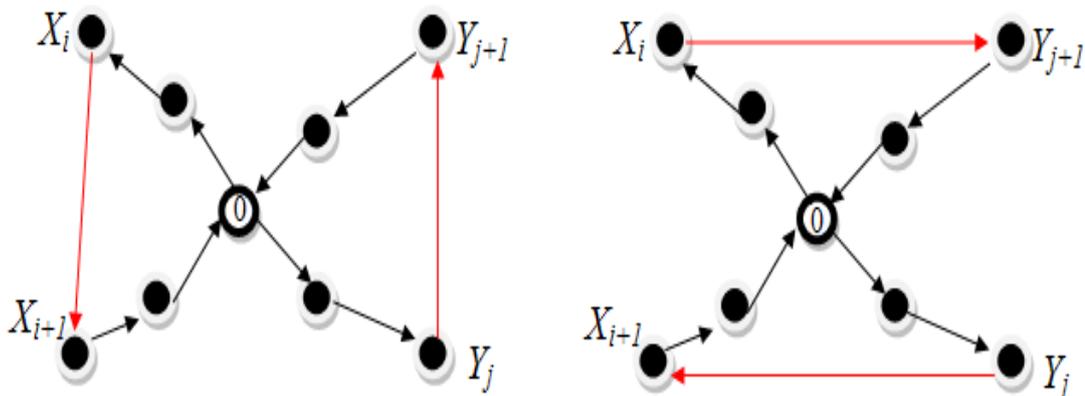


Figura 3.3 Intercambio 2- Opt.

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.

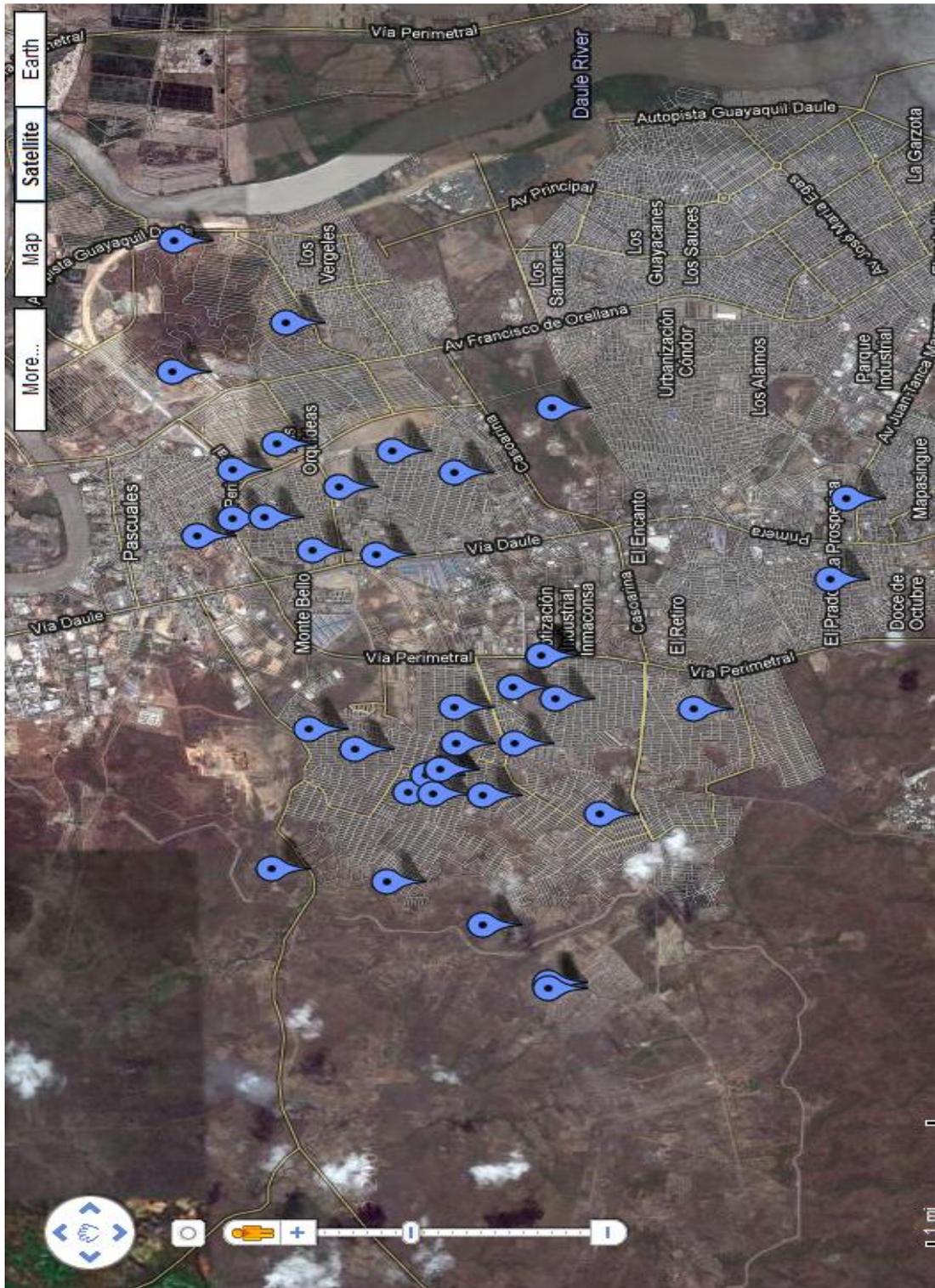


Figura 5.1 Distribución de los clientes en la Zona norte de Guayaquil.

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 cuadras 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.

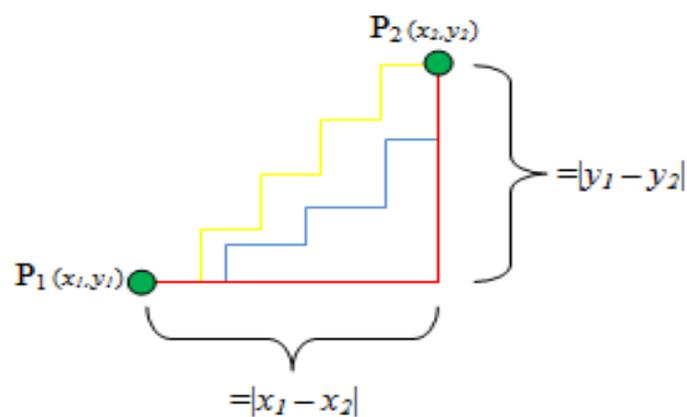


Figura 5.2 Cálculo de la distancia de Manhattan

1	0	222	240	215	196	192	222	251	209	209	229	254	265	250	216	212	209	236	228	237	233	174	250	219	232	209	198	240	218	224	207	222	208	242	191	154	167	193
2	222	0	18	08	52	103	18	56	39	86	62	32	43	55	67	10	13	14	06	15	11	48	28	57	10	13	24	18	47	11	53	60	55	24	80	68	55	42
3	240	18	00	25	44	87	35	52	31	69	45	31	25	51	50	28	31	11	12	14	12	66	37	40	20	31	42	11	31	16	37	44	49	08	64	86	73	47
4	215	08	25	00	44	95	26	44	32	78	54	39	50	43	59	06	05	21	14	23	19	41	35	49	18	06	22	25	39	09	45	52	58	27	72	61	48	35
5	196	52	44	44	00	51	70	88	13	94	33	58	68	87	20	50	45	47	46	50	47	23	72	22	55	44	66	47	22	41	10	26	13	46	28	55	64	10
6	192	103	87	95	51	00	121	139	64	17	41	108	94	138	37	102	96	98	97	101	99	62	123	46	106	95	118	98	56	92	50	43	38	79	23	106	116	61
7	222	18	35	26	70	121	00	29	58	104	80	32	42	28	85	20	25	24	25	20	23	59	27	75	15	26	24	23	65	30	71	78	84	42	98	68	56	61
8	251	36	52	44	88	139	29	00	75	132	98	32	45	01	103	39	43	42	42	38	41	77	16	93	33	44	53	41	83	47	89	96	101	60	116	97	84	78
9	209	39	31	32	13	64	58	75	00	46	22	45	56	74	27	38	32	34	33	37	35	35	60	17	43	32	54	34	09	28	14	21	26	33	41	55	52	16
10	209	86	69	78	34	17	104	122	46	00	24	90	76	121	19	84	79	80	79	84	81	45	106	29	89	78	100	81	39	75	33	26	20	62	19	89	98	43
11	229	62	45	54	33	41	80	98	22	24	00	68	52	97	13	60	55	56	55	60	57	56	82	10	65	54	76	57	14	50	22	07	21	38	39	75	74	37
12	254	32	21	39	58	108	32	32	45	90	66	00	14	31	71	42	45	18	26	17	21	80	16	61	22	46	56	14	52	30	57	65	70	28	85	100	88	62
13	265	43	25	50	68	94	42	45	56	76	52	14	00	45	57	53	55	29	36	27	31	91	30	47	32	56	66	25	47	41	58	51	57	32	74	110	98	72
14	250	35	51	43	87	138	28	01	74	121	97	31	45	00	102	38	42	41	41	37	40	76	15	92	32	43	52	40	82	46	88	95	100	59	115	96	83	77
15	216	67	50	59	20	37	85	103	27	19	13	71	57	102	00	65	60	61	60	64	62	42	87	10	70	59	81	62	19	55	14	07	08	43	25	69	79	24
16	212	10	28	06	50	102	20	39	38	84	60	42	53	38	65	00	05	24	17	26	22	39	38	55	21	06	16	28	46	12	51	58	64	31	79	58	45	41
17	209	13	31	05	45	98	25	43	32	79	55	45	55	42	60	05	00	26	19	28	24	36	40	50	23	01	21	30	40	14	46	53	58	53	73	55	43	55
18	236	14	11	21	47	98	24	42	34	60	56	18	29	41	61	24	26	00	07	03	02	62	26	51	09	27	37	04	42	12	47	55	60	18	75	82	69	43
19	228	06	12	14	46	97	25	42	33	79	55	26	36	41	60	17	19	07	00	09	05	55	27	50	10	20	30	11	41	05	47	54	59	18	74	74	62	36
20	237	15	14	23	50	101	20	38	37	84	60	17	27	37	64	26	28	03	09	00	04	64	23	55	06	29	39	03	45	14	51	58	53	22	78	83	71	45
21	233	11	12	19	47	99	23	41	35	81	57	21	31	40	62	22	24	02	05	04	00	60	28	52	08	25	35	06	43	10	48	55	61	19	76	79	67	41
22	174	48	66	41	23	62	59	77	35	45	56	80	91	76	42	39	36	62	55	64	60	00	76	45	59	35	55	66	44	50	33	49	34	69	40	44	53	19
23	250	28	37	35	72	133	27	16	60	106	82	16	30	15	87	38	40	26	27	23	25	76	00	77	17	41	51	25	68	32	73	80	86	44	101	95	83	63
24	219	57	40	49	22	46	75	93	17	29	10	61	47	92	10	55	50	51	50	55	52	45	77	00	60	49	71	52	10	46	12	04	11	33	28	65	69	26
25	232	10	20	18	55	106	15	33	43	89	65	22	32	32	70	21	23	09	10	06	08	59	17	60	00	24	34	08	51	15	56	63	59	27	84	78	66	46
26	209	13	31	06	44	95	26	44	32	78	54	46	56	43	59	06	01	27	20	29	25	35	41	49	24	00	22	31	39	15	45	52	57	34	72	54	42	38
27	198	24	42	22	66	118	24	53	54	100	76	56	66	52	81	16	21	37	30	39	35	55	51	71	34	22	00	42	62	26	67	74	80	44	95	44	32	57
28	240	18	11	25	47	98	23	41	34	61	57	14	25	40	62	26	30	04	11	03	06	66	26	52	08	31	42	00	42	16	48	55	60	19	75	86	73	47
29	242	47	31	39	22	56	65	83	09	39	14	52	47	82	19	46	40	42	41	45	43	44	68	10	51	39	62	42	00	36	11	13	18	24	33	64	60	25
30	224	11	16	09	41	92	30	47	28	75	50	30	41	46	55	10	14	12	05	14	00	50	32	46	15	26	15	36	00	42	49	54	18	69	70	57	51	
31	207	53	37	45	10	60	71	89	14	33	22	67	58	88	14	51	46	47	47	51	48	33	73	12	56	45	67	48	11	42	00	16	12	38	27	56	65	14
32	222	60	44	52	26	43	78	96	21	26	07	65	51	95	07	58	53	55	54	58	55	49	80	04	83	52	74	55	13	49	16	00	15	86	32	68	73	30
33	206	65	49	58	13	98	84	101	26	20	21	70	57	100	08	64	58	60	59	63	61	34	86	11	69	57	80	60	16	54	12	15	00	41	17	68	78	33
34	242	40	08	27	46	79	42	60	33	62	38	22	59	43	31	33	18	18	22	19	69	44	33	27	34	44	19	24	18	35	36	41	00	56	88	76	50	
35	191	80	64	72	28	93	98	116	41	19	39	85	74	115	25	79	73	75	74	78	76	40	101	28	84	72	95	73	69	27	32	17	56	00	83	93	58	
36	154	68	86	61	55	106	68	97	55	89	75	100	110	96	69	58	55	82	74	83	79	44	95	65	78	54	44	86	64	70	56	68	68	83	00	13	48	
37	167	55	73	48	64	116	56	84	52	98	74	88	98	83	79	45	43	69	62	71	67	53	83	69	66	42	32	73	60	57	65	73	78	76	93	13	00	55
38	193	42	47	35	10	61	61	78	16	43	37	62	72	77	24	41	35	43	36	45	41	19	63	26	46	35	57	47	25	31	14	30	23	60	38	45	00	

Tabla 5.2 Distancias, en kilómetros, entre los clientes y el operador.

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

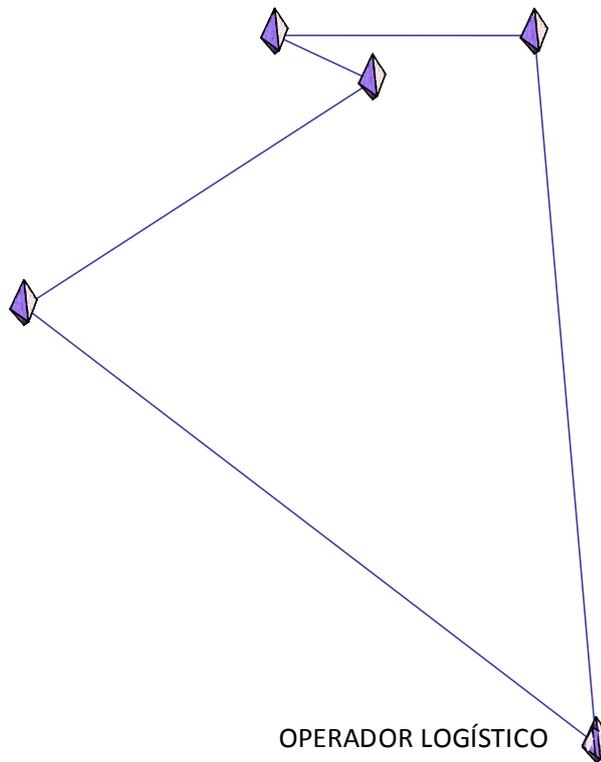


Figura 6.1 Recorrido de la Ruta 1 con Clarke & Wright.

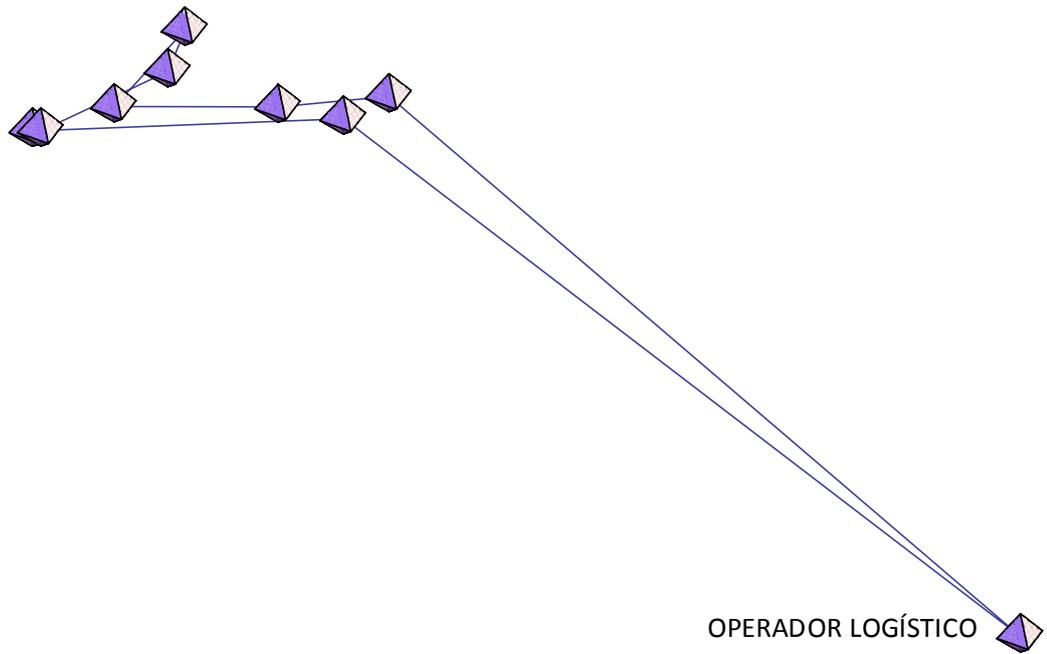


Figura 6.2 Recorrido de la Ruta 2 con Clarke & Wright.

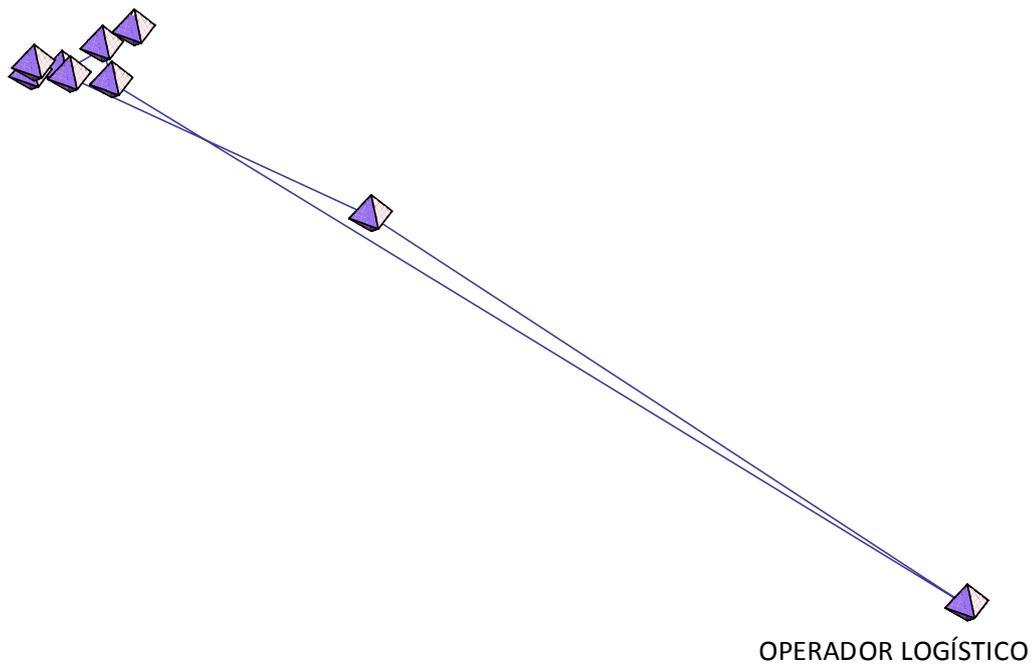


Figura 6.3 Recorrido de la Ruta 3 con Clarke & Wright.

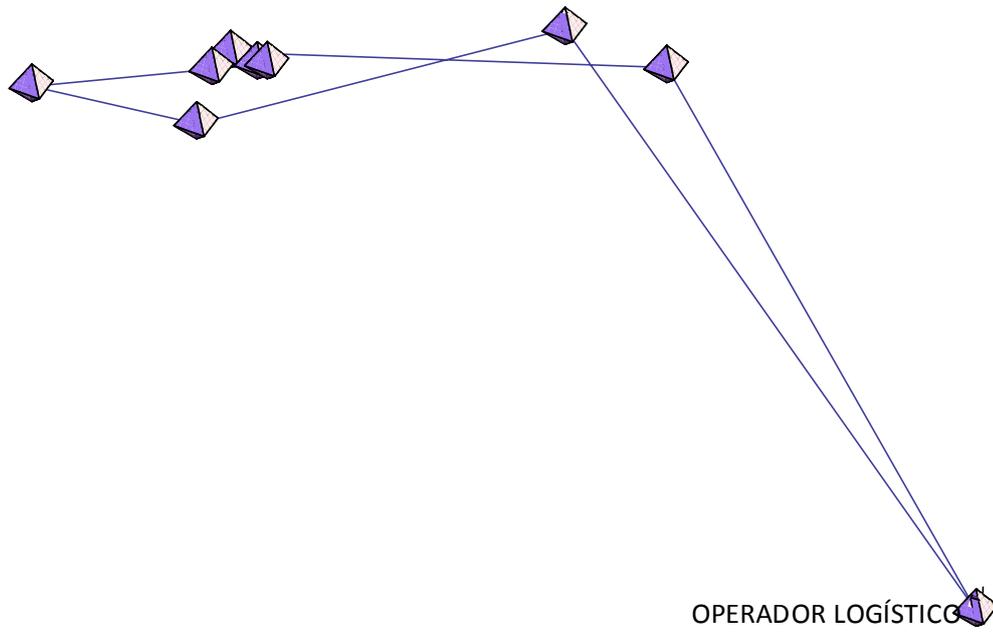


Figura 6.4 Recorrido de la Ruta 4 con Clarke & Wright.

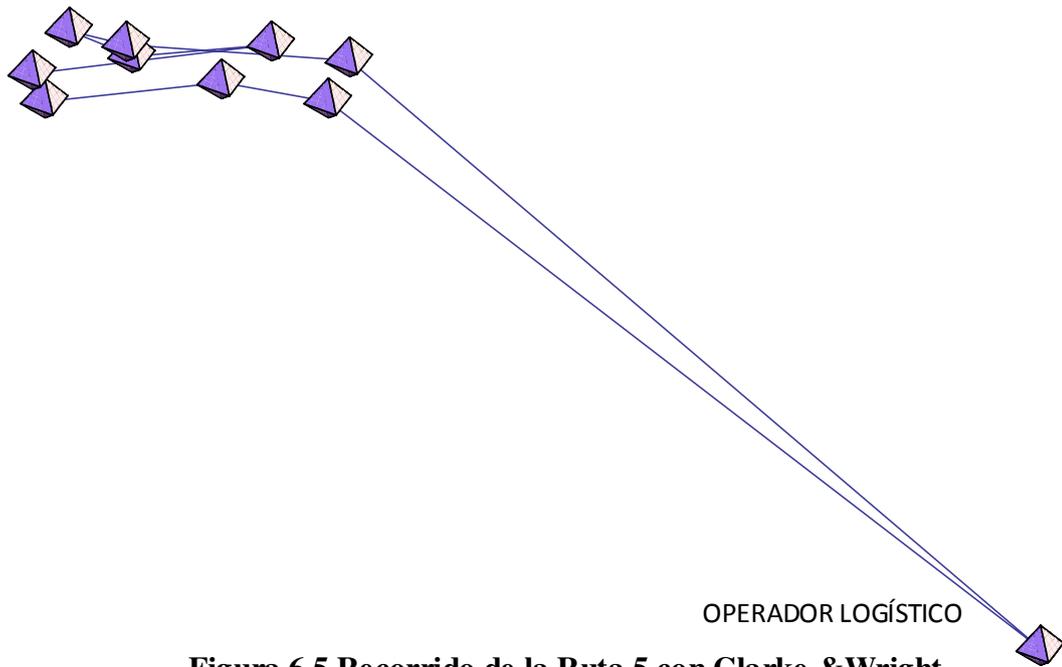


Figura 6.5 Recorrido de la Ruta 5 con Clarke & Wright.

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.

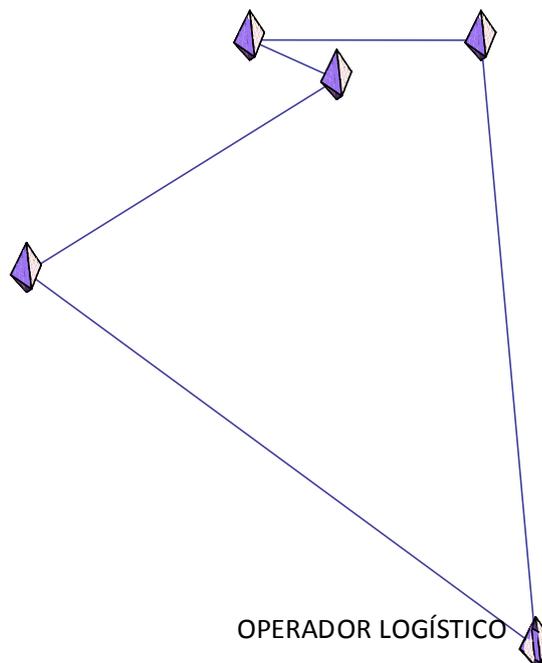


Figura 6.6. Recorrido de la Ruta 1 con 2 - Opt.

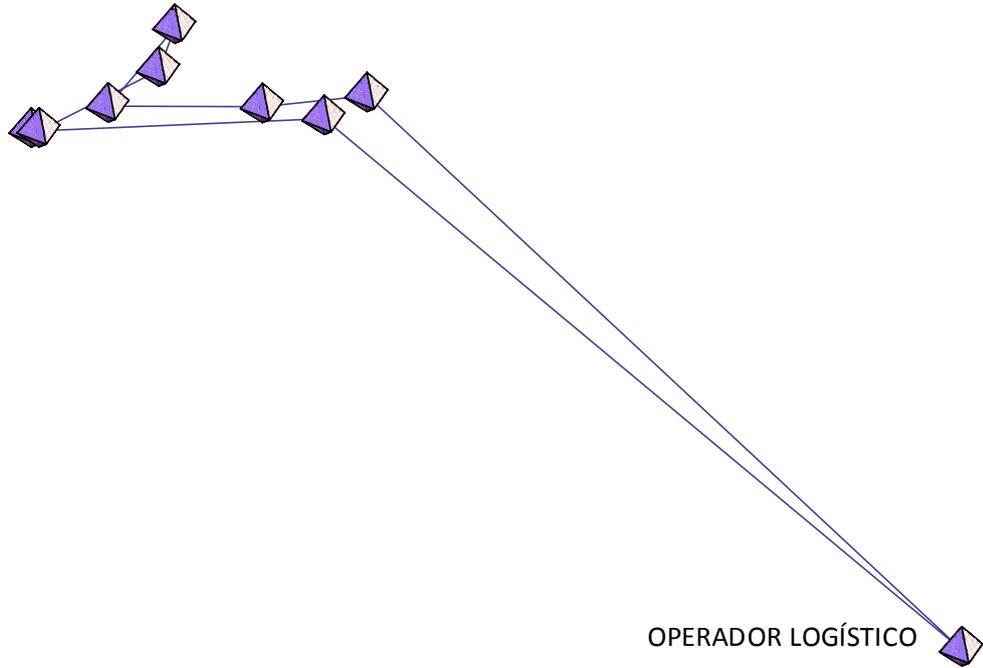


Figura 6.7 Recorrido de la Ruta 2 con 2 – Opt.

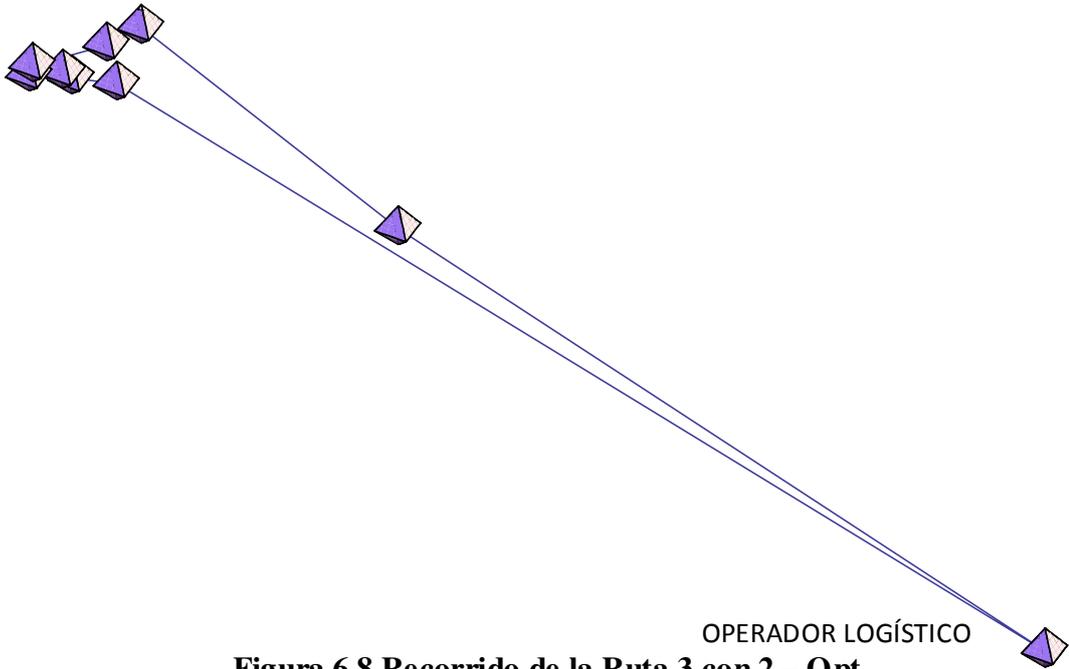


Figura 6.8 Recorrido de la Ruta 3 con 2 – Opt.

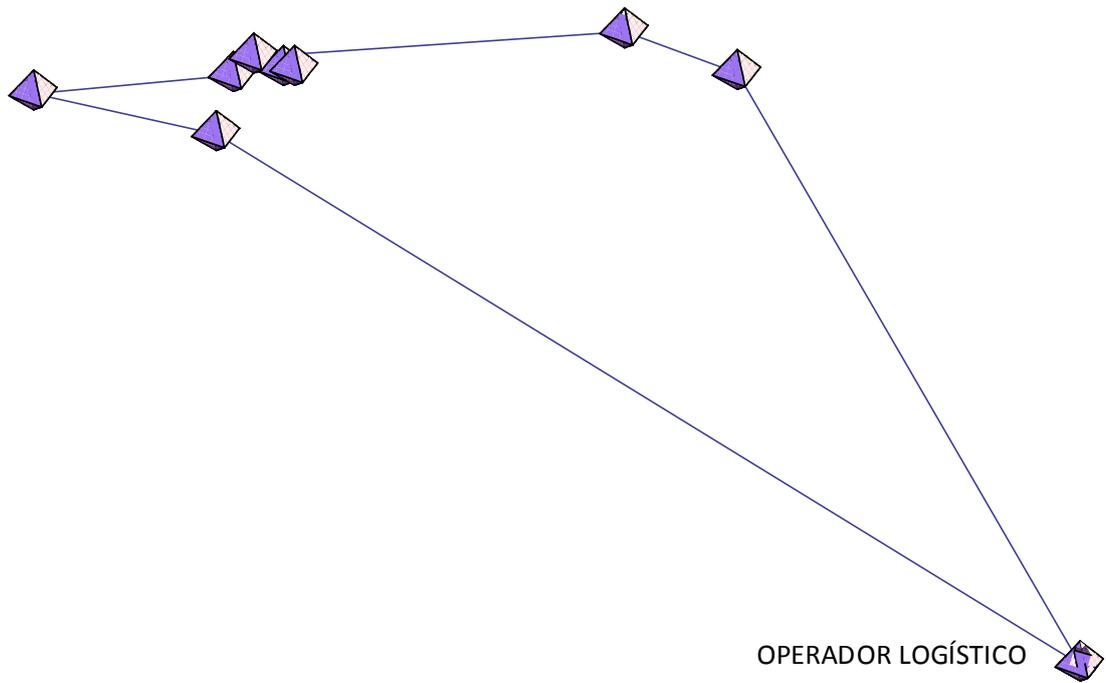


Figura 6.9 Recorrido de la Ruta 4 con 2 - Opt.

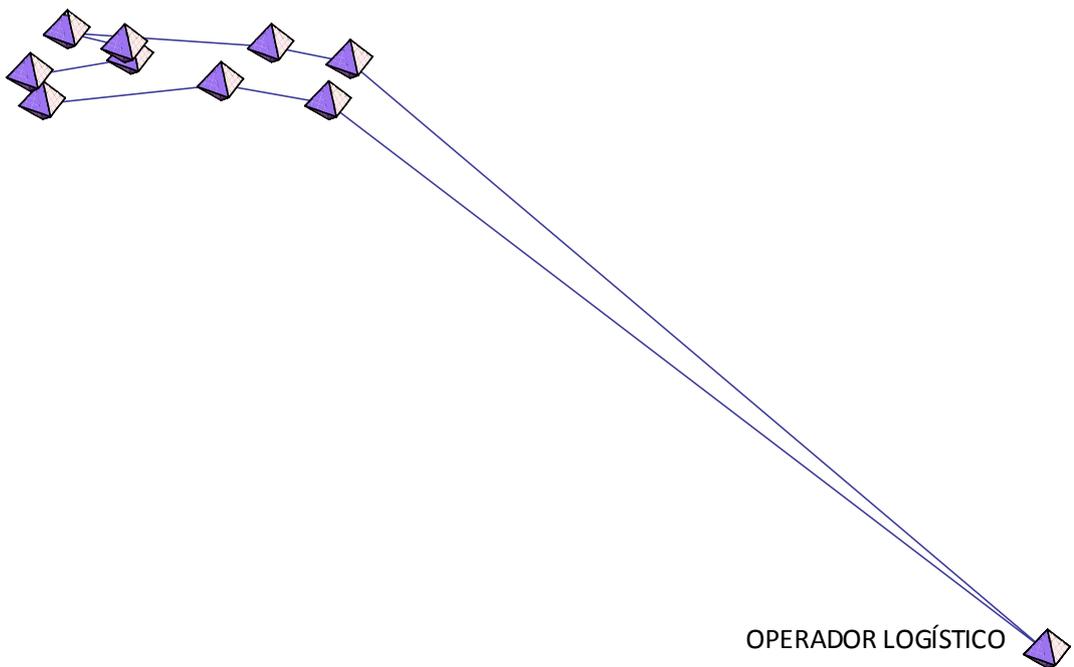


Figura 6.10 Recorrido de la Ruta 5 con 2 - Opt.

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.

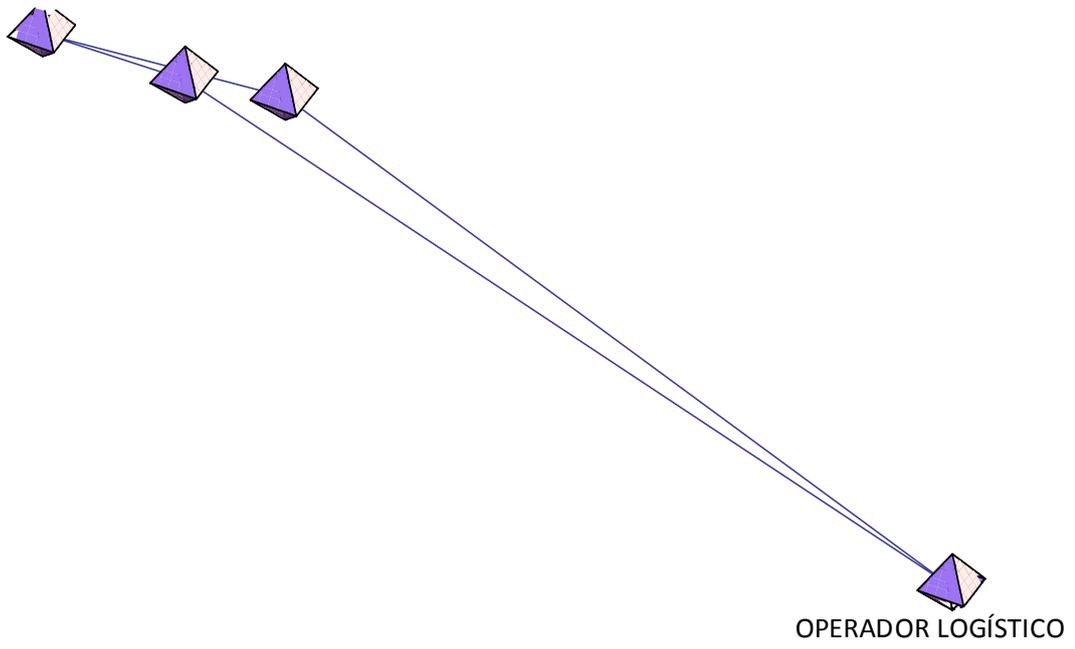
La compra de un software de optimización de rutas que permita evaluar, optimizar y planificar las rutas de la flota obteniendo una mejora en la productividad. Por otro lado en caso de que no se cuente con los recursos económicos suficientes, la aplicación de Google Maps es una alternativa que se puede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

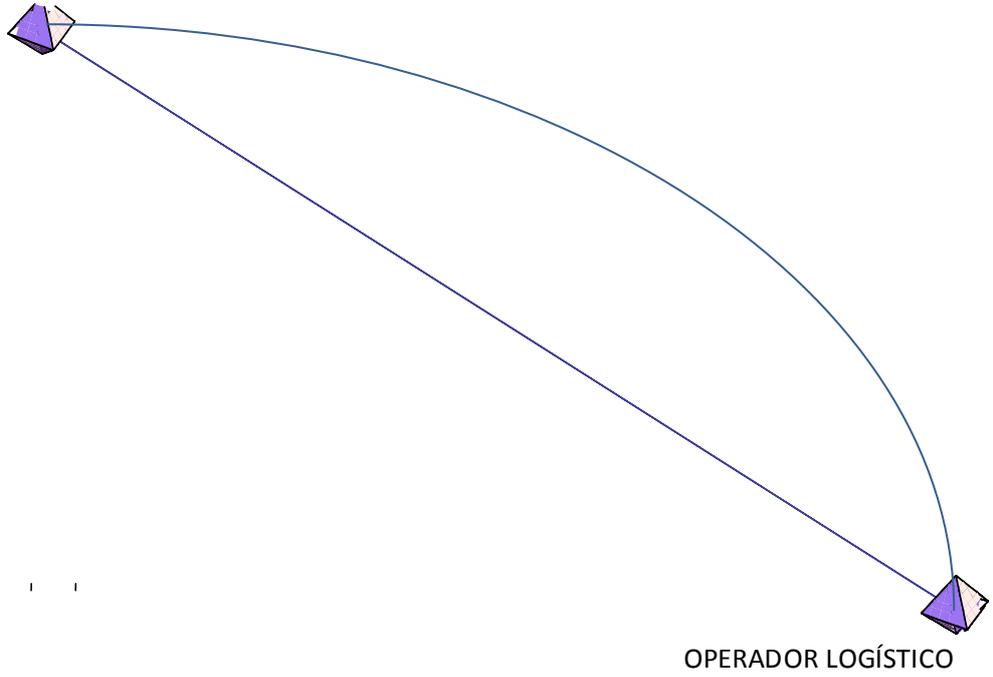
Un operador logístico con gran cantidad de clientes no debe desarrollar sus operaciones empíricamente sino más bien automatizarlas utilizando programas logísticos que se adapten con facilidad a las variantes del negocio.

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