

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE POSTGRADOS**

PROYECTO DE TITULACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

**“MAGÍSTER EN LOGÍSTICA Y TRANSPORTE CON MENCIÓN
EN MODELOS DE OPTIMIZACIÓN”**

TEMA:

OPTIMIZACIÓN DEL RUTEO DE VEHÍCULOS CON VENTANAS
DE TIEMPO DE UNA FLOTA HETEROGENÉA DE
CAMIONES (HFFCVRPTW) PARA LA DISTRIBUCIÓN DE
UNA EMPRESA DE VENTA DE ELECTRODOMÉSTICOS

AUTOR:

JENNIFER EVELIN AREVALO QUIMI

Guayaquil - Ecuador

2018

DEDICATORIA

A Jehová Dios por la gracia inmerecida, a mi esposo Jairo La Rosa por optimizar cada tiempo que duró esta maestría, en conformidad con la creación de nuestros dos hijos ya evolucionados genéticamente y que dieron pasos a la creación de una nueva búsqueda durante este tiempo, mi último hijo Daham. A mis padres por haberme enseñado el esfuerzo y la perseverancia en la obtención del éxito.

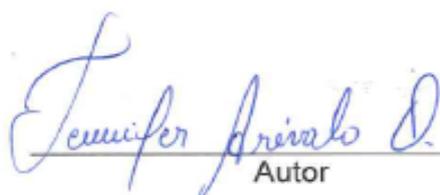
Jennifer Arévalo Quimi

AGRADECIMIENTO

Gracias a Jehová Dios por sus bendiciones, a mí esposo por el apoyo incondicional que siempre me supo dar, a mis padres, hermanos y al Dr. Kleber Barcia Villacreses por su paciencia, esmero y dedicación para que este proyecto se vuelva una realidad.

DECLARACIÓN EXPRESA

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


Autor

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Brenda Cobeña Terán, Mgter.
Presidente



Kleber Barcia Villacreses, Ph.D.
Director



Pedro Ramos De Santis, Mgter.
Vocal del Tribunal 1



Victor Vega Chica, Mgter.
Vocal del Tribunal 2

AUTOR DEL PROYECTO

A handwritten signature in blue ink, reading "Jennifer Arévalo Quiimi". The signature is written in a cursive style with a large initial "J".

Ing. Jennifer Arévalo Quiimi

Autor

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ABREVIATURAS O SIGLAS.....	xiii
PRESENTACIÓN.....	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.4. ALCANCE DEL PROYECTO.....	4
1.5. SITUACIÓN ACTUAL.....	4
1.5.1. CARACTERÍSTICAS DE LA EMPRESA	6
1.5.2. PROCESO DE DISTRIBUCIÓN	7
1.5.3. CLASES DE PRODUCTOS	11
1.5.4. SEGMENTACIÓN DEL NEGOCIO.....	12
1.6. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.6.1. RESTRICCIONES DEL PROBLEMA	16
1.7. METODOLOGÍA	17
1.8. ESTRUCTURA DEL PROYECTO	18
CAPÍTULO 2	20
MARCO TEÓRICO	20
2.1. EL PROBLEMA DE RUTEO CAPACITADO CON VENTANAS DE TIEMPO UTILIZANDO UNA FLOTA FIJA HETEROGÉNEA. (HFFCVRPTW).....	20
2.1.1. DEFINICIÓN DEL HFFCVRPTW	20
2.2. MÉTODOS DE SOLUCIÓN PARA LOS PROBLEMAS DE RUTEO DE VEHÍCULOS.....	24
2.3. MÉTODOS HEURÍSTICOS	27
2.3.1. MÉTODO DE AHORRO CLARKE & WRIGHT	27

2.3.2. MÉTODO DE AGRUPAR PRIMERO Y LUEGO ENRUTAR	30
2.3.3. MÉTODO DE RUTEAR PRIMERO Y AGRUPAR DESPUÉS	30
2.3.4. MÉTODO DE BARRIDO	31
2.3.5. MÉTODO GLOTÓN: ALGORITMO DE GREEDY	32
2.4. MÉTODOS METAHEURÍSTICOS	34
2.4.1. LA BÚSQUEDA TABÚ	34
2.4.2. GRASP (GREEDY RANDOMIZED ADAPTATIVE SEARCH PROCEDURE).....	42
2.4.3. ALGORITMOS GENÉTICO.....	44
2.4.4. RECOCIDO SIMULADO	45
2.5. COMPLEJIDAD ALGORÍTMICA.....	47
 CAPÍTULO 3	 48
IMPLEMENTACIÓN DE HEURÍSTICA Y LA METAHEURÍSTICA	48
3.1. CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LOS ALGORITMOS ...	48
3.2. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA	50
3.2.1. CONDICIÓN DEL SISTEMA A MODELAR	51
3.2.2. FORMULACIÓN DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA DEL HFFCVRPWT	51
3.3. FUNCIÓN OBJETIVO Y RESTRICCIONES DEL PROYECTO	55
3.4. APLICACIÓN DE LA HEURISTICA DE AHORRO	57
3.5. APLICACIÓN DE LA METAHEURÍSTICA TABÚ.....	67
 CAPÍTULO 4	 72
RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	72
4.1. RESULTADOS DE LA HEURÍSTICA	72
4.2. RESULTADOS DE LA METAHEURÍSTICA	84
4.3. ESTUDIO COMPARATIVO: SITUACIÓN ACTUAL Y MODELO PROPUESTO	96
4.4. COSTO DE TRANSPORTE	96
 CAPÍTULO 5	 98
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	98
5.1. CONCLUSIONES	98
5.2. RECOMENDACIONES.....	99
 BIBLIOGRAFÍA	 100

ANEXOS	103
ANEXO A. MATRIZ DE LATITUDES Y LONGITUDES.....	103
ANEXO B. MATRIZ DE DISTANCIA Y TIEMPO DE RECORRIDOS.....	105
ANEXO C. MATRIZ DE M3 POR RUTAS ATENDIDAS POR EL CDD GYE .	108
ANEXO D. MATRIZ DE m ³ DE LOS VEHÍCULOS.....	110

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 FLUJO DE DISTRIBUCIÓN.....	5
FIGURA 1.2 CICLO DE ABASTECIMIENTO	9
FIGURA 1.3 ALMACENES ÚBICADOS EN LA COSTA DEL ECUADOR	13
FIGURA 2.1 DOS RUTAS ANTES Y DESPUÉS DE SER UNIDAS.....	28
FIGURA 2.2 APLICACIÓN DEL ALGORITMO RUTEAR PRIMERO – ASIGNAR DESPUÉS.....	31
FUENTE: OLIVERA, 2004	31
FIGURA 2.3 UNA SOLUCIÓN OBTENIDA MENDIANTE AL ALGORITRMO DE BARRIDO	32
FIGURA 2.4 SEUDOCÓDIGO DEL ALGORITMO DE BÚSQUEDA TABÚ SIMPLE	35
FIGURA 2.5 GRÁFICO CON 200 ITERACIONES	41
FIGURA 2.6 SEUDOCÓDIGO DEL ALGORITMO GRASP.....	43
FIGURA 2.7 SEUDOCÓDIGO DEL ALGORITMO GENÉRICO GRASP	44
FIGURA 2.8 SEUDOCÓDIGO DEL ALGORITMO GENÉTICO SIMPLE	45
FIGURA 2.9 SEUDOCÓDIGO DEL ALGORITMO RECOCIDO SIMULADO ...	46
FIGURA 3.1 GRÁFICO DE UNA RUTA	53
FIGURA 3.2 ALGORITMO CLARKE AND WRIGHT	57
FIGURA 4.1 RUTA LOCAL 1	74
FIGURA 4.2 RUTA LOCAL 2	74
FIGURA 4.3 RUTA LOCAL 3	75
FIGURA 4.4 RUTA LOCAL 4	75
FIGURA 4.5 RUTA LOCAL 5	76
FIGURA 4.6 RUTA LOCAL 6	76
FIGURA 4.7 RUTA FORÁNEA 1.....	79
FIGURA 4.8 RUTA FORÁNEA 2.....	79
FIGURA 4.9 RUTA FORÁNEA 3.....	80
FIGURA 4.10 RUTA FORÁNEA 4.....	80
FIGURA 4.11 RUTA FORÁNEA 5.....	81
FIGURA 4.12 RUTA FORÁNEA 6.....	81
FIGURA 4.13 RUTA FORÁNEA 7.....	82

FIGURA 4.14 RUTA FORÁNEA 8.....	82
FIGURA 4.15 RUTA FORÁNEA 9.....	83
FIGURA 4.16 RUTA FORÁNEA 10.....	83
FIGURA 4.17 RUTA LOCAL 1	86
FIGURA 4.18 RUTA LOCAL 2	86
FIGURA 4.19 RUTA LOCAL 3	87
FIGURA 4.20 RUTA LOCAL 4	87
FIGURA 4.21 RUTA LOCAL 5	88
FIGURA 4.22 RUTA LOCAL 6	88
FIGURA 4.23 RUTA FORÁNEA 1.....	91
FIGURA 4.24 RUTA FORÁNEA 2.....	91
FIGURA 4.25 RUTA FORÁNEA 3.....	92
FIGURA 4.26 RUTA FORÁNEA 4.....	92
FIGURA 4.27 RUTA FORÁNEA 5.....	93
FIGURA 4.28 RUTA FORÁNEA 6.....	93
FIGURA 4.29 RUTA FORÁNEA 7.....	94
FIGURA 4.30 RUTA FORÁNEA 8.....	94
FIGURA 4.31 RUTA FORÁNEA 9.....	95
FIGURA 4.32 RUTA FORÁNEA 10.....	95

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1 NÚMERO DE ALMACENES Y BODEGAS POR SECTOR	6
TABLA 1.2 CRECIMIENTO DE ALMACENES.....	6
TABLA 1.3 VENTAS ANUALES.....	7
TABLA 1.4 GASTO DE TRANSPORTE.....	7
TABLA 1.5 RUTAS ATENDIDAS POR EL CDD GUAYAQUIL.....	10
TABLA 1.6 TRANSPORTES DISPONIBLE EN CDD GUAYAQUIL	14
TABLA 2.1 MATRIZ DE DISTANCIAS	36
TABLA 2.2 PERMUTACIÓN INICIAL.....	37
TABLA 2.3 PERMUTACIONES DE LA ITERACIÓN 1	38
TABLA 2.4 MATRIZ TABÚ.....	38
TABLA 2.5 MATRIZ DE FRECUENCIAS (MEMORIA DE LARGO PLAZO)	38
TABLA 2.6 ITERACIÓN 2	39
TABLA 2.7 ITERACIÓN 33	39
TABLA 2.8 MATRIZ DE FRECUENCIAS.....	40
TABLA 2.9 ITERACIÓN 34 DESPUÉS DE LA DIVERSIFICACIÓN.....	40
TABLA 2.10 ITERACIÓN 144	41
TABLA 3.1 FLOTA DE TRANSPORTE CON CAPACIDADES	48
TABLA 3.2 COSTO EN DÓLARES DE VEHÍCULOS POR CAPACIDAD	49
TABLA 3.3 GASTO DE TRANSPORTE DE LA EMPRESA	50
TABLA 3.4 ALMACENES DE LA RUTA CUENCA.....	58
TABLA 3.5 COSTO EN DÓLARES DE TRANSPORTE DESDE EL CDD A CADA NODO.....	58
TABLA 3.6 DISTANCIA DE LOS NODOS EN KM	59
TABLA 3.7 MATRIZ DE AHORRO DE LOS NODOS DEL CLÚSTER	59
TABLA 4.1 SOLUCIÓN DE NODOS LOCALES CON MÉTODO CLARKE AND WRIGHT	72
TABLA 4.2 SECUENCIA DE LOS NODOS LOCALES CON MÉTODO CLARKE AND WRIGHT	73
TABLA 4.3 SOLUCIÓN DE NODOS FORÁNEOS CON MÉTODO CLARKE AND WRIGHT.....	77

TABLA 4.4 SECUENCIA DE NODOS FORÁNEOS CON MÉTODO CLARKE AND WRIGHT.....	78
TABLA 4.5 SOLUCIÓN DE NODOS LOCALES CON ALGORITMO TABÚ....	84
TABLA 4.6 SECUENCIAS DE LOS NODOS LOCALES CON ALGORITMO TABÚ	85
TABLA 4.7 SOLUCIÓN DE NODOS FORÁNEOS CON ALGORITMO TABÚ	89
TABLA 4.8 SECUENCIA DE NODOS FORÁNEOS CON ALGORITMO TABÚ	90
TABLA 4.9 COMPARACIÓN DE MODELOS.....	97

ABREVIATURAS O SIGLAS

VRP	Problema de ruteo de vehículo, (Vehicle Routing Problem).
CDD	Centro de distribución.
KPI	Medidor de desempeño, (Key Performance Indicator).
HFFCVRPTW	VRP con flota fija heterogénea capacitada y ventanas de tiempo, (Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Problem and Time Windows).
NP-HARD	No polinomiales – duro.
OPL	Operador Logístico.
RFID	Identificación por radio frecuencia, (Radio Frequency Identification).
ERP	Planificación de recursos empresariales, (Enterprise Resource Planning).
WMS	Sistema de administración de almacenamiento, (Warehouse Management Systems).
PDA	Ayudante personal digital, (Personal Digital Assistant).

PRESENTACIÓN

El presente proyecto se enfoca en el estudio del problema de ruteo de vehículos con flota fija heterogénea con sus principales restricciones de ventanas de tiempo y la capacidad, denotado por su siglas en inglés HFFCVRPTW (Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Problem with time Windows), en el cual se debe establecer un conjunto de rutas al mínimo costo, utilizando una flota fija heterogénea pero a la vez cumpliendo las restricciones de cada transporte con sus rutas asignadas, asegurando su llegada a cada nodo en su ventana de tiempo. Siendo este, uno de los mayores problemas logísticos, y uno de los más comunes, en las empresas de economías de escala.

Una de las principales características del HFFCVRPTW es que se trata de un problema NP-Hard, es decir un problema difícil de optimización cuya solución requiere un mayor esfuerzo computacional para su desarrollo. Para esto se debe resolver por medio de los algoritmos y métodos de resolución que brinda la optimización combinatoria.

El desarrollo de este estudio es la aportación de información, de solución y la adquisición de sistemas útiles en la solución del problema de ruteo, utilizando la metaheurística Tabú como técnica de solución, con lo cual se podría ofrecer a las empresas, la optimización de los costos por la trasportación de sus productos, obteniendo una mejor calidad de servicio y a la vez que sus resultados se vean reflejados en las ganancias, mejorando competitivamente sus procesos de la distribución y transporte de la empresa.

Para la solución de esta problemática se han tomado datos de una empresa multinacional comercial, posicionada en la región costa del Ecuador, la misma que cuenta con 1 centro de distribución (CDD) principal, 2 CDD secundarios y 100 tiendas de Retail (comercialización de productos al por menor).

ABSTRACT

This project focuses on the study of the problem of vehicle routing with a heterogeneous fixed fleet with its main time window restrictions and capacity, denoted by its acronym in English HFFCVRPTW (Heterogeneous Fixed Vehicle Fleet Vehicle Routing Problem with Time Windows), in which must establish a set of routes at minimum cost, using a heterogeneous fixed fleet but at the same time complying with the restrictions of each transport with its assigned routes, ensuring its arrival at each node in its time window. Being this, one of the biggest logistical problems, and one of the most common, in companies with economies of scale.

One of the main characteristics of the HFFCVRPTW is that it is a NP-Hard problem, that is, a difficult optimization problem whose solution requires a greater computational effort for its development. For this it must be solved by means of the algorithms and resolution methods provided by the combinatorial optimization.

The development of this study is the contribution of information, of solution and the acquisition of useful systems in the solution of the problem of routing, using the Tabú metaheuristic as a solution technique, with which it could be offered to the companies, the optimization of the costs for the transportation of their products, obtaining a better quality of service and at the same time that their results are reflected in the profits, competitively improving their processes of distribution and transportation of the company.

For the solution of this problem we have taken data from a commercial multinational company, positioned in the coastal region of Ecuador, which has 1 main distribution center (CDD), 2 secondary CDD and 100 retail stores (product marketing retail).

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS

1.1. INTRODUCCIÓN

El problema del ruteo de vehículos (VRP por sus siglas en inglés Vehicle Routing Problem) ha sido el motor principal en numerosos casos de estudio en las últimas décadas debido a la gran practicidad en el área logística, en el VRP se encuentran restricciones que deben ser cumplidas dentro de la distribución, pero a la vez hay demandantes que esperan por sus productos en el momento indicado, de tal manera que toda la operación de distribución, ejecuta su trabajo en función de los clientes, ofreciendo un excelente servicio al menor costo posible.

Para la resolución de los problemas de la planificación de rutas, se han desarrollado en el campo de la investigación de operaciones, los modelos matemáticos para la toma de las decisiones, con el objetivo de minimizar los costos y obtener un ahorro en la nueva planificación de rutas, logrando resultados más fiables para su utilización por medio de métodos exactos como las heurísticas y las metaheurísticas.

La primera mención al VRP fue en 1930, con el problema del agente viajero, su nombre es el TSP por sus siglas en inglés Travelling Salesman Problem, cuya principal función, es la formulación de la planificación y la logística, teniendo la misma generalización y objetivos de minimizar los costos de las rutas en su resolución, sin embargo el TSP es un estudio de optimización combinatoria cuyo objetivo es encontrar una ruta que conecte todos los nodos a una red y

sean visitados una sola vez, partiendo de un punto inicial y a su vez retornando al punto de origen [1].

La investigación de operaciones es la teoría de la toma de decisiones que consiste en la resolución de problemas de optimización por medio de los modelos matemáticos, uno de los cuales es la planificación de rutas, que es a su vez parte de la rama de la optimización combinatoria por ser un problema de NP-Hard, cuya solución no se puede encontrar en tiempos polinomiales [2].

Siendo Dantzig y Ramser en 1959 quienes introdujeron el problema clásico del VRP, mediante una formulación para la aplicación de distribución de combustible, el VRP ha generado múltiples investigaciones para encontrar una solución, con el objetivo de realizar una planificación de enrutamiento óptimo, cumpliendo las restricciones para que el cliente sea visitado una sola vez por el vehículo, satisfaciendo su necesidad [3].

En 1964 Clarke & Wright, estableció el desarrollo de un algoritmo llamado glotón, también conocido como el método de los ahorros, el mismo que consiste en el intercambio de conjuntos de rutas en cada punto de llegada y si es factible se determina la ruta más cercana entre dos puntos, para mejorar su rendimiento. Este algoritmo es frecuentemente utilizado en la práctica por su rápida ejecución y facilidad en su aplicación para flotas homogéneas, sin estar relacionada en la capacidad de flotas heterogéneas, tampoco considera los costos fijos y directos [4].

El desarrollo continuo que ha tenido el problema del VRP, mediante estudios realizados en conjunto con sistemas informáticos, ha permitido incluir la información y a la vez rebajar los tiempos al momento de su ejecución. Es importante lo que detalla (Koc, Bektas, Tolga., Jabali & Laporte, Gilbert, 2015), quienes consideraron al problema del VRP una flota heterogénea, conocido también como HVRP (Heterogeneous Vehicle Routing Problems). En lo descrito en este estudio hace tres contribuciones, la primera es la clasificación

del problema heterogéneo, segundo es la revisión actualizada de los estudios ya realizados y tercero es comparar los rendimientos de los algoritmos con metaheurísticas [5].

Para el problema de flota fija heterogénea con ventanas de tiempo se ha adoptado las siglas HFFVRPTW (Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Problem) siendo todas las soluciones algoritmos basados con métodos metaheurísticos, aún no se ha propuesto un algoritmo exacto para su solución.

1.2. OBJETIVO GENERAL

Optimizar la gestión de la flota de transporte de una empresa de venta de electrodomésticos, enfocándose en la minimización de los costos de transportación hacia sus almacenes de ventas por medio de modelos matemáticos de optimización, y respetando todas las restricciones reales del sistema.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la zonificación de la región por provincias y cantones cercanos de los clientes de la empresa (almacenes de venta), para formar clústers de clientes que van a ser servidos dentro de una misma ruta.
- Elaborar un modelo matemático de optimización que resuelva las restricciones del sistema, para asignar los vehículos necesarios según la necesidad de los almacenes, la capacidad del vehículo y respetando las ventanas de tiempo.
- Implementar una heurística para obtener rutas óptimas, mejorando sus resultados con una metaheurística.

- Determinar un sistema de gestión óptimo de transporte para la empresa.

- Comparar los resultados con la situación actual de la empresa.

1.4. ALCANCE DEL PROYECTO

El proyecto se enfoca en la necesidad de la empresa, en el área de distribución de los productos desde el centro de distribución nacional hacia los almacenes de la región costa del Ecuador, por medio de una flota heterogénea de camiones.

1.5. SITUACIÓN ACTUAL

La empresa que está siendo motivo de estudio para el mejoramiento del problema de ruteo, actualmente maneja el transporte primario y el transporte secundario, realizando sus operaciones logísticas con 2 OPLs (operadores logísticos) en la región costa para el abastecimiento de tiendas provincial y local dentro de la ciudad de Guayaquil.

El proyecto se enfoca en el abastecimiento de los productos desde un centro de distribución nacional, ubicado en Guayaquil.

Las unidades de negocio también llamados almacenes, deben tener stock de los productos para comercializar los electrodomésticos con el cliente final y no tener ventas perdidas. Por tal motivo, se considera un lead time (plazo de entrega) de 3 días para el aprovisionamiento de los almacenes provinciales y 1 día dentro de la ciudad de Guayaquil, abasteciéndose según corresponde 2 veces por semana y diariamente.

El CDD de Guayaquil actualmente atiende la demanda de 3 centros de distribuciones secundarias, conformados de la siguiente manera: 1 bodega en la ciudad de Quito con las necesidades correspondientes a 66 almacenes, 1 bodega en Milagro y otra en Quevedo cada una con 3 almacenes, y los 96 almacenes de la región costa.

La figura 1.1 presenta el flujo de distribución de la región costa, desde el CDD principal hacia las bodegas secundarias y almacenes.

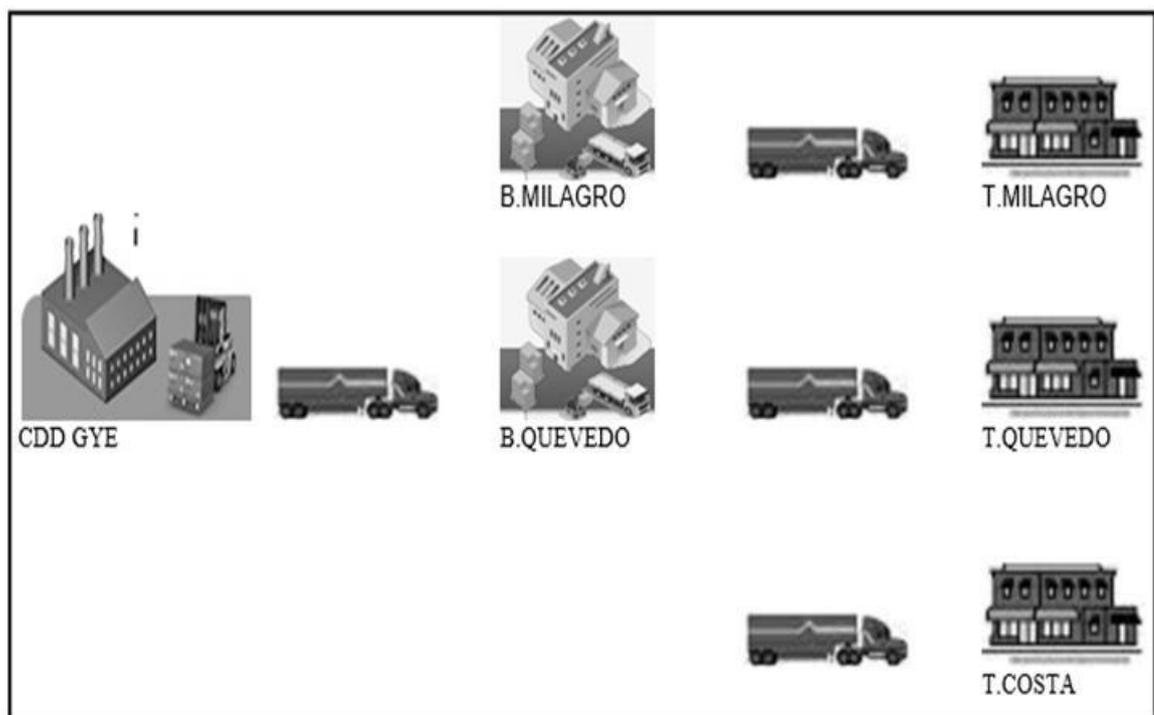


Figura 1.1 Flujo de distribución

Fuente: Elaboración propia

Las tiendas de la región costa se encuentran sectorizadas según su cercanía entre ellas para una mejor distribución y consideración del lead time referente al abastecimiento de sus productos.

En la tabla 1.1 se muestra como están sectorizadas las tiendas, según el CDD Guayaquil.

Tabla 1.1 Número de almacenes y bodegas por sector

CDD DE GUAYAQUIL	
SECTORES	ALMACENES
MANABI	17
QUEVEDO	7
BABA	10
MANA – MOCACHE	2
PENINSULA	6
CUENCA	7
MILAGRO	10
VINCES	5
EL ORO	11
GUAYAQUIL	29
CDD DE QUITO	1
TOTAL	105

Fuente: Empresa de estudio

1.5.1. CARACTERÍSTICAS DE LA EMPRESA

La empresa está dedicada a la venta de electrodomésticos, motos, muebles y enseres, teniendo una gran gama en productos para el hogar, con la finalidad de satisfacer la demanda del cliente de acuerdo a su necesidad. Por tal motivo la empresa se ha expandido en algunas ciudades del Ecuador.

La tabla 1.2 detalla el crecimiento por año y los puntos de ventas que han quedado activos y el cierre de alguna unidad de negocio.

Tabla 1.2 Crecimiento de almacenes

AÑO	2013	2014	2015	2016	2017
PUNTOS DE VENTAS CERRADOS		2	1	13	16
PUNTOS DE VENTAS NUEVOS		21	33	17	30
PUNTOS DE VENTAS ACTIVOS	122	141	173	177	191

Fuente: Empresa de estudio

Las ventas de la empresa en la región costa por año, sin considerar algún gasto administrativo como operativo, se ven reflejan en la tabla 1.3.

Tabla 1.3 Ventas anuales

AÑO	2013	2014	2015	2016	2017
VENTAS ANUALES (en dólares)	78.802.424,46	93.307.459,02	93.717.618,62	78.750.916,62	87.171.649,00

Fuente: Empresa de estudio

El gasto de transporte que se origina desde el CDD hacía los almacenes, está representado en la tabla 1.4.

Tabla 1.4 Gasto de transporte

AÑO	2013	2014	2015	2016	2017
GASTO DE TRANSPORTE (en dólares)	570.529,55	675.546,00	678.515,56	570.156,64	631.122,74

Fuente: Empresa de estudio

1.5.2. PROCESO DE DISTRIBUCIÓN

El proceso de distribución funciona por medio de un conjunto de sistemas de información que integra las operaciones de la empresa, por sus siglas en inglés llamado ERP (Enterprise Resource Planning), el mismo que mediante la implementación del sistema Warehouse Management Systems por sus siglas WMS, permite la obtención de toda la trazabilidad de cada producto, desde su ingreso al CDD hasta su respectiva salida por medio de un despacho de orden.

El sistema obliga a que se ejecuten todos los pasos consecutivamente, para el despacho de abastecimiento de stock de un almacén, mediante la generación

de una orden por cada tienda, la misma que contiene una lista de productos a despacharse.

Los siguientes puntos son actualmente los pasos para el proceso de salida de mercadería por abastecimiento de stock:

- Se crea una orden de reposición por cada almacén a despachar.
- Se lanza a ola las órdenes por rutas: es decir se crea un código interno por ruta, permitiendo la visualización de las órdenes en las PDA (ayudante personal digital que permite leer la información del ingreso o salida de un producto de forma rápida) y a la vez se pueda combinar con el siguiente paso.
- Se realiza el picking en cada ubicación: es decir, con la PDA se pistolea al producto detallado en la orden.
Se envía al muelle los productos a despacharse: es decir, se traslada el producto desde su ubicación al área asignada donde se recopilan todos los productos de una orden.
- Se asigna un transporte según la ruta.
- Se carga al vehículo, estibando según su llegada hacia los almacenes.
- Se realiza la anotación de los productos por parte del transportista para el respectivo cuadro.
- Se hace el cierre del vehículo: es decir, se procede a cerrar el vehículo con los candados de seguridad que posee cada uno.
- Se imprimen las guías por cada almacén.
- Se firman los documentos por parte de los supervisores Outbound (productos de salida): es decir, los supervisores de salida que realizaron el despacho deben firmar las guías.
- Se revisan las guías para generar una orden de salida por parte del jefe del CDD.
- Se procede con la salida del vehículo y su posterior trayecto hacia sus rutas.

- Los almacenes realizan la recepción y respectivo ingreso al sistema. Culminando con la firma en las guías.

La figura 1.2 presenta el ciclo de abastecimiento de los productos para atender a un almacén desde que se realiza la compra hasta el abastecimiento de las tiendas.



Figura 1.2 Ciclo de abastecimiento

Fuente: Elaboración propia

La empresa distribuye los electrodomésticos hacía las siguientes ciudades del país, clasificadas en costa y sierra, atendidas por su CDD principal más cercano, según las rutas establecidas.

La tabla 1.5 muestra las rutas que son atendidas desde el CDD Guayaquil hacia todas las tiendas y bodegas secundarias de la región costa.

Tabla 1.5 Rutas atendidas por el CDD Guayaquil

REGION	EMISOR	TIENDA	REGION	EMISOR	TIENDA	
MANABI	1038	TIENDA SATELITE PEDRO CARBO 1038	MILAGRO	955	BODEGA 955 MLAGRO	
	1337	TIENDA SATELITE PUERTO LOPEZ 1337		952	TIENDA MLAGRO 952	
	1341	TIENDA SATELITE MONTECRISTI 1341		959	TIENDA MLAGRO 959	
	1335	TIENDA SATELITE JIPLUA PA 1335		954	TIENDA PASEO SHOPING MLAGRO 954	
	1322	TIENDA CHONE 1322		1046	TIENDA SATELITE BUCA Y 1046	
	1320	TIENDA BAHIA DE CARAQUEZ 1320		1042	TIENDA SATELITE NARANJITO 1042	
	1327	TIENDA BARA TODO PORTOVIEJO 1327		1055	TIENDA TROPIMOTOS MLAGRO 1055	
	1318	TIENDA PORTOVIEJO 1318		2046	TIENDA SATELITE SIMON BOLIVAR 2046	
	1311	TIENDA PORTOVIEJO 1311	1045	TIENDA BARA TODO MLAGRO 1045		
	1319	TIENDA PORTOVIEJO 1319	VINCES	816	TIENDA VINCES 816	
	1323	TIENDA PORTOVIEJO 1323		827	TIENDA TROPIMOTOS VINCES 827	
	1339	TIENDA TROPIMOTOS PORTOVIEJO 1339		938	TIENDA DAULE 938	
	1316	TIENDA TARIQUI 1316		1057	TIENDA TROPIMOTOS DAULE 1057	
	1328	TIENDA BARA TODO MANTA 1328		1085	TIENDA SAMBORONDON 1085	
	1324	TIENDA MANTA 1324		EL ORO	730	TIENDA SATELITE PINAS 730
	1342	TIENDA TROPIMOTOS MANTA 1342	717		TIENDA SANTA ROSA 717	
	1313	TIENDA MANTA 1313	718		TIENDA PASAJE 718	
	QUEVEDO	814	BODEGA 814 QUEVEDO		719	TIENDA BARA TODO MACHALA 719
		817	TIENDA BUENA FE 817		711	TIENDA MACHALA 711
818		TIENDA EMPALME 818	970		TIENDA TRONCAL 970	
1039		TIENDA SATELITE BALZAR 1039	716		TIENDA NARANJAL 716	
811		TIENDA QUEVEDO 811	124		TIENDA SATELITE CAMILO PONCE 124	
821		TIENDA QUEVEDO 821	731		TIENDA SATELITE GUABO 731	
815		TIENDA QUEVEDO MOTOS 815	714		TIENDA MACHALA 714	
MANTA	2034	TIENDA SATELITE MOCACHE 2034	713	TIENDA MACHALA 713		
	822	TIENDA SATELITE MANTA 822	1782	BODEGA CENTRAL QUITO		
PENINSULA	940	TIENDA LIBERTAD 940	UIH	911	TIENDA 9 DE OCTUBRE 911	
	2625	TIENDA BARA TODO LIBERTAD 2625		1029	TIENDA BARA TODO 9 DE OCTUBRE 1029	
	2801	TIENDA TROPIMOTOS LA LIBERTAD 2801		1022	TIENDA CENTENARIO 1022	
	2108	TIENDA LIBERTAD 2108		1024	TIENDA ESCOBEDO 1024	
	1002	TIENDA SANTA ELENA 1002		923	TIENDA MALL DEL SOL 923	
	945	TIENDA PLAYAS 945		924	TIENDA ALBORADA 924	
CUENCA	727	TIENDA LOJA 727		1063	TIENDA CITY MALL 1063	
	726	TIENDA LOJA 726		921	TIENDA MALL DEL SUR 921	
	725	TIENDA LOJA 725		1026	TIENDA RIOCENTRO SUR 1026	
	115	TIENDA CUENCA LA MAR 115		964	TIENDA PEDREGAL 964	
	122	TIENDA CUENCA 122		909	TIENDA ESCLUSAS 909	
	111	TIENDA CUENCA 111		918	TIENDA DURAN 918	
	729	TIENDA CATAMAYO 729		1032	TIENDA BARA TODO DURAN 1032	
BABA	1061	TIENDA SATELITE SALTRE 1061		917	TIENDA DURAN OUTLET 917	
	824	TIENDA SATELITE SAN JUAN 824		2019	TIENDA FLOR DE BASTION 2019	
	1048	TIENDA SATELITE BABA 1048		2025	TIENDA SATELITE EL RECREO DURAN 2025	
	820	TIENDA VENTANAS 820		2048	TIENDA ESPECIALIZADA PARQUE CALIFORNIA 2048	
	960	TIENDA BABA HOYO 960		2805	TIENDA TROPIMOTOS GUASMO 2805	
	2040	TIENDA SATELITE MONTALVO 2040		1059	TIENDA RIOCENTRO EL DORADO 1059	
	2045	TIENDA SATELITE RICARTE 2045	937	TIENDA 38 Y PORTETE 937		
	2058	TIENDA SATELITE CALUMA 2058	936	TIENDA PORTETE 936		
	1058	TIENDA TROPIMOTOS BABA HOYO 1058	967	TIENDA FLORIDA 967		
	1033	TIENDA BARA TODO BABA HOYO 1033	965	TIENDA PASCUALES 965		
			932	TIENDA PARQUE CALIFORNIA 932		
		1025	TIENDA BARA TODO CALIFORNIA 1025			
		1054	TIENDA TROPIMOTOS CALIFORNIA 1054			
		1086	TIENDA AKT 3S 1086			
		968	TIENDA FORTIN 968			

Fuente: Empresa de estudio

1.5.3. CLASES DE PRODUCTOS

La empresa comercializa electrodomésticos de distintas sub-líneas, dentro de su gama de productos se encuentran las siguientes clasificaciones:

- Línea blanca.
- Línea café.
- Línea de audio.
- Línea de video.
- Línea de juegos de comedores.
- Línea de juegos de salas.
- Línea de estantes y centros de entretenimientos.
- Línea de cómodas y roperos.
- Línea de cómputo y tecnología.
- Línea de camas y colchones.
- Línea de celulares y tabletas.
- Pequeños electrodomésticos.
- Línea de motocicletas y llantas.
- Línea de aires acondicionado.
- Línea de motores fuera de borda.
- Línea de herramientas.
- Línea de construcción.
- Línea de productos peds.
- Línea de pequeños accesorios.
- Línea de máquinas de coser industriales y caseras.
- Regalos.
- Etc.

1.5.4. SEGMENTACIÓN DEL NEGOCIO

La compañía está dividida en estrategias de negocios, para poder atender el mercado ecuatoriano según la necesidad del consumidor, segmentada en las siguientes divisiones comerciales detalladas a continuación:

- Punto de venta de pequeños y grandes electrodomésticos.
- Punto de venta de muebles de sala, comedores, estantes, roperos, centro de entretenimiento, butacas, camas, etc.
- Punto de venta de motocicletas y sus repuestos.

Para canalizar las ventas, las tiendas se encuentran dimensionadas según el lugar estratégico de la zona donde se encuentran ubicadas, a continuación, las tiendas de ventas están divididas en las siguientes categorías:

- Almacenes grandes.
- Almacenes pequeños.
- Televentas (ventas por llamadas).
- Tiendas móviles.

1.6. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad todas las empresas en el Ecuador hacen uso de la logística, muchas de ellas transportan electrodomésticos, teniendo como dificultad la distribución de sus productos por tener dimensiones variables entre sí.

De tal manera, las asignaciones de los vehículos se realizan bajo estrategias empíricas por parte de las jefaturas, reflejándose soluciones deficientes, que a su vez están alejadas de su optimalidad, obteniendo como resultado una logística encarecida en el costo de la transportación de sus productos, con KPI

(Key Performance Indicator) en calidad de servicios al cliente que descienden cada vez más.

La empresa que está siendo objeto en este proyecto, está dedicada a la compra de productos de importación y productos nacionales, para luego comercializar los electrodomésticos en sus puntos de ventas localizados en el Ecuador, con más de 162 tiendas a Nivel Nacional, 1 CDD en Guayaquil y otro de menor escala en Quito. En la actualidad se tiene 2 bodegas secundarias en la región costa, atendiendo de esta forma la demanda existente del mercado.

La figura 1.3 muestra la cobertura de los almacenes que tiene la empresa a nivel nacional en la región costa.

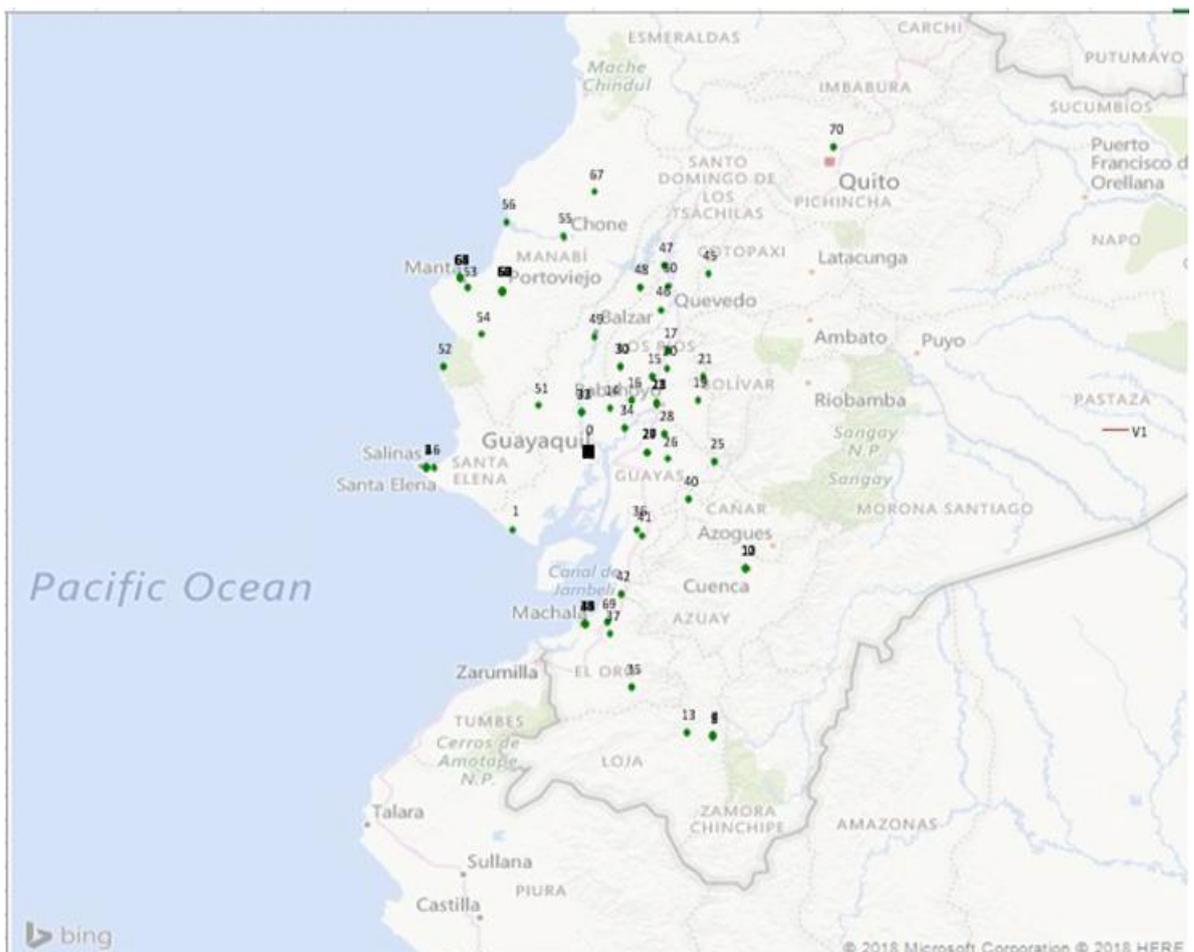


Figura 1.3 Almacenes ubicados en la costa del Ecuador

Fuente: Elaboración propia

El departamento de distribución tiene adicional a las entregas una logística inversa, dada por el retorno de los electrodomésticos de los almacenes hacia el centro de distribución principal. Originándose porque el transportista no llegó a tiempo dentro de los horarios de entrega en el almacén, según las ordenanzas municipales y/o centros comerciales.

El CDD principal funciona también como cross docking (sistema de distribución donde las unidades logísticas son recibidas en un área determinada momentáneamente para luego ser preparadas y enviadas a su lugar de destino), realizando las recolecciones de los productos facturados de cada almacén para después entregar en las ciudades solicitadas por los clientes finales.

La empresa cuenta con dos OPLs (operadores logísticos) de flota fija heterogénea para hacer viajes locales y los viajes extensos, las empresas que facilitan los vehículos de carga, suman 31 unidades, teniendo problemas de abastecimiento y de insatisfacción con el cliente, por incumplimiento en los horarios, sumándose una larga carga horaria al transportista, disminuyendo su efectividad en las entregas.

A su vez, se desencadena la espera del supervisor al transportista para cargar de nuevo al vehículo de transporte en el centro de distribución (CDD), teniendo como consecuencias las horas extras innecesarias de los operarios, mermando su productividad laboral y su rentabilidad en la operación.

La tabla 1.6 detalla las unidades de vehículos disponibles por CDD Guayaquil

Tabla 1.6 Transportes disponible en CDD Guayaquil

OPLs	PROVINCIALES	LOCALES
A	20	7
B	3	1

Fuente: Empresa de estudio

Además de lo mencionado, se citan las siguientes problemáticas para la distribución de los electrodomésticos de la empresa:

- a. Los días de abastecimientos están dados por un tiempo de espera (lead time) de 3 días para los viajes extensos y de 1 día para los viajes locales.
- b. Las rutas están definidas a priori.
- c. Los supervisores Outbound (salida) son quienes eligen el transportista a cargar la mercadería.
- d. No hay información referente a la cantidad de m³ cargados de cada vehículo vs su capacidad.
- e. No existe un KPI donde se refleje el costo de la transportación referente al costo de la mercadería enviada.
- f. Existe una gran variabilidad referente a las sub-líneas a despacharse en relación a productos grandes y pequeños.
- g. No se tienen las dimensiones de todos los productos.
- h. No se tiene definido las cargas horarias de un conductor.
- i. No hay un indicador que demuestre la productividad de los empleados.
- j. Vehículos de carga, utilizados para realizar más de un viaje.

Descritos los problemas que impiden a la empresa un alto rendimiento en sus operaciones logísticas, referente a la distribución de la mercadería, se denota la inexistencia de un software con métodos que permitan una mejor planificación en seleccionar los vehículos correctos.

Para encontrar la respuesta, se desarrolló una heurística de Clarke & Wright para luego implementar un algoritmo basado en la metaheurística Tabú, cuyo resultado fue la obtención de las mejores rutas dentro del óptimo para el problema HFFCVRPTW.

De esta forma se logra un alto rendimiento en la eficiencia con respecto a la capacidad y la operación en el departamento de distribución, y a la vez, bajando sus costos que permitan escalar un margen adicional a los indicadores claves de rendimientos en logística.

1.6.1. RESTRICCIONES DEL PROBLEMA

La empresa de electrodomésticos considerada en este proyecto tiene restricciones del problema de ruteo de vehículos que están sujetas a múltiples condiciones, una de ellas son las dimensiones de los productos y la forma del cargue de la mercadería, para la entrega consecutiva en los almacenes.

Los despachos realizados, están basados en los siguientes puntos:

- Demanda de los almacenes es conocida, es decir por medio del sistema se conoce con exactitud las cantidades de los electrodomésticos necesitadas por el almacén, según el stock disponible en el CDD.
- Limitación de la flota vehicular con capacidad heterogénea, es decir se tiene un número reducido de vehículos.
- Cantidad de operarios reducidos.
- Productos con dimensiones heterogéneas, es decir que cada producto tiene dimensiones diferentes.
- Pequeños y grandes electrodomésticos, es decir la empresa clasifica en dos categorías las dimensiones de los productos.
- Transportación de motos en una sola planta del vehículo, se refiere al condicionamiento del vehículo en transportar las motos, el vehículo no dispone de un segundo piso para aprovechar la capacidad vehicular.
- Horarios especiales en los cascos comerciales del país, es decir en ciertos lugares como Guayaquil, Cuenca y Milagro, hay restricciones de horarios que deben ser cumplidos.
- Capacidad finita de carga en cada vehículo.

- El vehículo de carga contempla una hora de salida y a la vez una hora de retorno al CDD, es decir se estima la hora de salida del CDD para realizar las entregas hacia los almacenes, considerándose un tiempo estimado en el recorrido para que retorne de nuevo al CDD.
- En cada visita realizada se debe de cumplir una operación de descarga, es decir cumplir con un protocolo en la entrega de la mercadería en el almacén.
- Cada cliente debe ser visitado una sola vez por cada vehículo, es decir no se pueden enviar productos para el mismo almacén en dos vehículos con diferentes rutas.

1.7. METODOLOGÍA

La metodología que se aplica para la resolución del problema de ruteo con flota fija heterogénea, teniendo como restricciones las ventanas de tiempo y la capacidad de cada vehículo, es la aplicación de métodos de optimización combinatoria por ser un problema NP-Hard por su complejidad computacional. Se desarrolla un modelo que permita cumplir con las restricciones en tiempos óptimos de ejecución, usando como métodos: la heurística y la metaheurística.

La heurística: exclamación de Arquímedes, proviene del vocablo griego eureka que significa encontrar o inventar algo, son técnicas que permiten resolver problemas reales inteligentemente [6].

La metaheurística: son métodos cuyas soluciones se aproximan al óptimo, diseñados para la resolución de problemas NP-Hard de optimización combinatoria, donde las heurísticas clásicas no son tan eficientes. La combinación de la inteligencia artificial, la mecánica estadística y la evolución biológica proporciona la creación de nuevos algoritmos híbridos [7].

En este proyecto se aplica la heurística de ahorro Clarke and Wright y la metaheurística de algoritmo Tabú.

➤ **Heurística de ahorro Clarke and Wright**

Es uno de los algoritmos con mayor frecuencia en su utilización para la resolución del VRP, buscando minimizar las distancias a recorrer y la utilización de vehículos. Consiste en la exploración dentro de un límite de espacio y entregando un resultado bastante aceptable en un tiempo moderado [8].

➤ **Metaheurística de algoritmo Tabú**

El algoritmo de búsqueda Tabú puede ser utilizado para resolver problemas NP-Hard de optimización combinatoria, entre ellos el TSP, del inglés Travelling Salesman Problem, utilizando procedimientos que le permita realizar múltiples iteraciones o movimientos prohibidos para la solución, navegando en un espacio mucho más amplio, permitiendo establecer una memoria a corto y largo plazo, considerada una búsqueda inteligente [9].

1.8. ESTRUCTURA DEL PROYECTO

El proyecto tiene una estructura de 5 capítulos, en los cuales se plantea el problema del CVRPTW con flota fija heterogénea de una empresa de electrodoméstico, aplicando una heurística para obtener una solución local y posteriormente una metaheurística para obtener una solución en un espacio mucho más amplio hasta lograr los resultados para poder emitir las conclusiones y recomendaciones.

En el capítulo uno: se detalla la introducción del proyecto, definiendo el tipo de negocio de la empresa, a la vez se describen los antecedentes y sus características para tener un enfoque mucho más claro sobre el desarrollo del proyecto, también se detalla el proceso de abastecimiento desde el CDD

principal hacia los almacenes, haciendo énfasis en la forma como se realiza la distribución de los productos que se comercializan con los vehículos heterogéneos.

En el capítulo dos: se hace una revisión del estado del arte, detallando los componentes para luego definir el problema CVRPTW con la utilización de una flota fija heterogénea, dando alternativas sobre los métodos de soluciones que se pueden utilizar según el alcance en las soluciones de cada uno de ellos.

En el capítulo tres: se define los parámetros a utilizar para la solución del problema planteado, considerando el método de la heurística de Clarke & Wright y el algoritmo de la metaheurística de búsqueda Tabú.

En el capítulo cuatro: se realiza el diseño de la implementación de la propuesta en función al objetivo planteado, considerando todas las restricciones del sistema para su ejecución y la obtención de los resultados.

En el capítulo cinco: se emite las conclusiones y recomendaciones en base al resultado obtenido en la implementación del diseño como mejor solución para el problema de ruteo del HFFCVRPTW en este proyecto.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. EL PROBLEMA DE RUTEO CAPACITADO CON VENTANAS DE TIEMPO UTILIZANDO UNA FLOTA FIJA HETEROGÉNEA. (HFFCVRPTW)

En el presente capítulo se expone el problema de ruteo capacitado con ventanas de tiempo utilizando una flota fija heterogénea, definiendo cada restricción del problema a resolver, a la vez se detallan varios métodos que se aplican para su resolución y su respectiva formulación matemática.

2.1.1. DEFINICIÓN DEL HFFCVRPTW

En la aplicación real, el uso de vehículos de transportación de carga es raramente homogéneo. Las empresas para asegurar su crecimiento, deben estar presente en muchos lugares con diferentes segmentos de mercado, obligando a que las empresas obtengan una flota de vehículos heterogéneos para la transportación de sus productos, permitiendo de esta forma la satisfacción de la demanda del mercado.

El VRP con flota heterogénea (HFVRP, Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem) se hace presente cuando los vehículos de transporte de mercancía

son diferentes unos a otros, considerando su estructura, antigüedad, capacidad de peso y volumen etc.

La capacidad es una variante dentro del VRP, la misma que se hace presente cuando la demanda de los clientes excede la capacidad del vehículo de carga, sea en peso o volumen [10].

El CVRP (Capacited Vehicle Routing Problem), consiste en armar rutas hamiltonianas, de tal manera que el cliente sea visitado una sola vez por un solo vehículo y todas las rutas han de empezar y terminar en un centro de distribución.

Las ventanas de tiempo VRPTW (Vehicle Routing Problem With Time Windows) es otra variante del problema de ruteo vehicular, la misma que ha recibido mayor énfasis por la importancia práctica en la realidad de las empresas. Las ventanas de tiempo pueden diferenciarse como duras y suaves. Se consideran ventanas de tiempo duras, sí un vehículo llega antes de la hora indicada, permitiendo esperar hasta que pueda ser atendido por el cliente, pero no tiene permitido llegar tarde al horario establecido. Por otro lado, si hay flexibilidad en la recepción de la mercancía es un caso de ventanas de tiempo suaves [10].

El problema de ruteo vehicular de flota fija heterogénea con ventanas de tiempo, tiene como principal característica la utilización de una flota heterogénea, por los múltiples vehículos que se utilizan en la transportación de los productos para satisfacer las necesidades demandadas de los clientes, pero a la vez aprovechando la capacidad de cada vehículo.

Otra complejidad es la ventana de tiempo, cuyas industrias para asegurar la fidelidad de sus clientes, necesitan mejorar la calidad de sus servicios, enfocándose en cumplir los horarios que se adapten al consumidor o en las tiendas retail donde se encuentran ubicadas.

El objetivo del problema de ruteo vehicular (VRP) es encontrar las rutas más cercanas entre dos puntos, al menor costo posible en la transportación de los productos, utilizando métodos que permitan la obtención de las rutas en el menor tiempo, satisfaciendo las demandas de los clientes y las restricciones del sistema.

Una ruta se define como la secuencia de visitas que debe realizarse a los clientes, saliendo desde un centro de distribución principal llamado CDD y retornando al mismo una vez culminado todas las entregas; una ruta óptima es aquella que cumple con todas las restricciones de la empresa.

En la actualidad hay múltiples problemas de VRP, cuya finalidad es adaptarse a la realidad, con diferentes variables y restricciones del sistema actual, una de ellas es el problema de ruteo de vehículos heterogéneos HVRP (Vehicle Routing Problem Heterogeneous) por su número limitado de una flota; otro es el tamaño de flota mixta FSM (Fleet Size and Mix) en la versión ilimitada. Adicionándose para ambos casos “F” si tiene costo fijo y “D” si tiene costo variable [11].

Los siguientes problemas son derivados del VRP [3] [12] [13].

1. CVRP “Capacited vehicle routing problem”
Problema de ruteo de vehículo capacitado.
2. VRPTW “Vehicle routing problem with time windows”
Problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo.
3. MDVRP “Multiple depot vehicle routing problem”
Problema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos.
4. VRPSD “Vehicle routing problem stochastic demands”
Problema de ruteo de vehículos con demanda conocida.
5. VRPSC “Vehicle routing problem stochastic customers”
Problema de ruteo de vehículos con clientes conocido.

6. VRPST “Vehicle routing problem stochastic time”
Problema de ruteo de vehículos con tiempo estocásticos.
7. HVRPD “Heterogeneous vehicle routing problem with variable costs depending on the routes”
Problema de ruteo de vehículos heterogéneo limitados con costos variables dependientes de las rutas.
8. HVRPFD “ Heterogeneous vehicle routing problem with fixed and variable costs”
Problema de ruteo de vehículos heterogéneo limitados con costos fijos y variables.
9. FSMD “Fleet size and mix vehicle routing problem with variable cost”
Problema de ruteo de vehículos de flota mixta ilimitada con costos variables.
10. FSMF “Fleet size and mix vehicle routing problem with costs fixed”
Problema de ruteo de vehículos de flota mixta ilimitada con costos fijos.
11. FSMFD “Fleet size and mix vehicle routing problem with fixed and variable cost”
Problema de ruteo de vehículos de flota mixta ilimitada con costos fijos y variables.
12. SDVRP “Split delivery vehicle routing problem”
Varios vehículos atienden a un cliente.
13. VRPB “Vehicle routing problem backhauls”
Problema de ruteo de vehículos con recolección.
14. VRPPD “Vehicle routing problem picking & delivery”
Problema de ruteo de vehículos con recolección y entrega.
15. PVRP “Period vehicle routing problem”

- Cliente visitado una sola vez en el problema de ruteo de vehículos.
16. MFVRP “Mix fleet vehicle routing problem”
Problema de ruteo de vehículos con flota mixta.
17. MFSVRP “Fleet size & mix vehicle routing problem”
Problema de ruteo de vehículos con tamaño de flota mixta.
18. CVRPTW “Capacitated vehicle routing problem with time windows”
Problema de ruteo de vehículos capacitado con ventanas de tiempo.
19. HFFCVRPTW “Heterogeneous fixed fleet capacitated vehicle routing problem with time windows”
Problema de ruteo de vehículos capacitado con flota fija heterogénea y ventanas de tiempo.

2.2. MÉTODOS DE SOLUCIÓN PARA LOS PROBLEMAS DE RUTEO DE VEHÍCULOS

Actualmente la solución del VRP se ha centrado en técnicas de la optimización combinatoria, debido a que son problemas de tipo de NP-Hard que buscan encontrar una solución en tiempos polinomiales según su problemática, En ese sentido los métodos más prácticos para encontrar una solución de calidad en tiempos computacionalmente razonables, han sido los algoritmos heurísticos y metaheurísticos [3].

A continuación, se detallan algunos de los métodos más usados en la solución del problema VRP, considerando que los tiempos computacionales en su resolución dependerán del algoritmo utilizado y de las características del problema.

Heurísticas: son métodos de optimización local convencional, no reflejan una solución óptima por la exploración limitada del espacio, se desarrolla con una complejidad algorítmica baja cuyos tiempos en la solución se ven reducidos considerablemente. Los resultados obtenidos, pueden ser mejorados, utilizando métodos de búsquedas más sofisticados, de tal manera que se incurren en tiempos muchos más elevados en su ejecución [6].

Las heurísticas usadas para resolver problemas de VRP, pueden clasificarse en las siguientes categorías [9].

- Algoritmos constructivos: no parte de una solución, a medida que avanza, se va dando forma a la construcción de soluciones factibles, optimizando la función objetivo.
- Algoritmos de mejoras: la solución factible se da desde el inicio, posteriormente se realiza el intercambio de los nodos. hay dos tipos de rutas; intra-ruta y extra-ruta. En la primera se hacen variaciones entre los arcos de una misma ruta, en la segunda se intercambian entre dos o más rutas.
- Técnicas de relajación: son modelos lineales enteros con restricciones difíciles y fáciles. En las difíciles se pueden reducir el tiempo de resolución, ubicando las restricciones en la función objetivo, multiplicándolas por un factor de penalización, la más conocida es la técnica de relajación lagrangeana.
- Algoritmos de dos fases: descomponen el problema en dos etapas, la primera es la agrupación de los nodos y la segunda es la construcción de las rutas.

Entre estos métodos se citan [14]:

- Método de ahorro Clarke & Wright
- Método de agrupar primero y enrutar después
- Método de enrutar primero y agrupar después
- Método de barrido
- Método glotón de Greedy

Metaheurísticas: son los métodos para la resolución de problemas con gran complejidad de optimización combinatoria, su tiempo de solución es mayor en comparación con una heurística clásica, aun así, tarda menor tiempo que un método exacto. La metaheurística combina el prefijo griego “*meta* = más allá” y heurístico (*heuriskein* = encontrar). Este método permite obtener excelentes resultados, lo que una heurística no es capaz de hacer. Usa técnicas de optimización local inteligente, con procedimientos complejos, ejecutando heurísticas locales de búsquedas para después mejorar la solución, con tiempos muchos más elevados [15].

Los métodos metaheurísticos se clasifican en las siguientes categorías [15].

- Constructivos: se define por tener un conjunto vacío de soluciones, en el que se va introduciendo elementos como el algoritmo de GRASP (Greedy Randomized Adaptative Search Procedurey).
- Evolutivos: se ejecutan varios grupos para dar soluciones completas, seleccionando una de ellas, combinándose entre sí las soluciones escogidas y creando una nueva solución evolutiva. Ejemplo el Algoritmo Genético.
- De búsqueda: su solución es considerada óptima, ejecutando una serie de pasos, aunque no se logre terminar el proceso, su resultado es muy cercano al óptimo. En este método su solución queda atrapado en un óptimo local, por eso es necesario escoger una de estas formas:

- Empezar, volver nuevamente el algoritmo surgiendo una solución inicial distinta. Ejemplo la metaheurística multi-start o de arranque múltiple.
- Modificar, con la obtención del óptimo alcanzado, se realiza cambios en la variación de su estructura en entorno a la Solución. Ejemplo la metaheurística de entornos variables.
- Permitir, de la solución de búsqueda que no sean de mejoras, hacer movimientos o transformaciones. ejemplo: metaheurística de búsqueda no monótona.

Entre estos métodos metaheurísticos se pueden encontrar los siguientes [16]:

- Búsqueda Tabú (TS-Tabú Search).
- GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure).
- Algoritmos genéticos.
- Recorrido simulado (SA_Simulated Annealing).

2.3. MÉTODOS HEURÍSTICOS

Estas heurísticas se realizan mediante procedimientos simples en un espacio limitado para su resolución, dando soluciones aceptables con tiempos moderados.

Se presenta algunos de los métodos heurísticos clásicos del VRP.

2.3.1. MÉTODO DE AHORRO CLARKE & WRIGHT

Es uno de los algoritmos más utilizados para la resolución del VRP, el cual consiste en explorar la solución en un espacio limitado de búsqueda con un

tiempo moderado. El desarrollo de la solución se realiza mediante dos rutas $(0, \dots, i, \dots, 0)$ y $(0, \dots, j, \dots, 0)$, las cuales se pueden combinar generando una sola ruta $(0, \dots, i, j, \dots, 0)$ [6].

Ejecuta el intercambio de conjuntos de rutas en cada punto de llegada. Si es factible, determina la ruta más cercana entre dos puntos para luego mejorar su rendimiento siempre que las restricciones del sistema se cumplan.

La figura 2.1 representa el grafo de dos rutas que marcan un antes y un después de la utilización de Clarke & Wright.

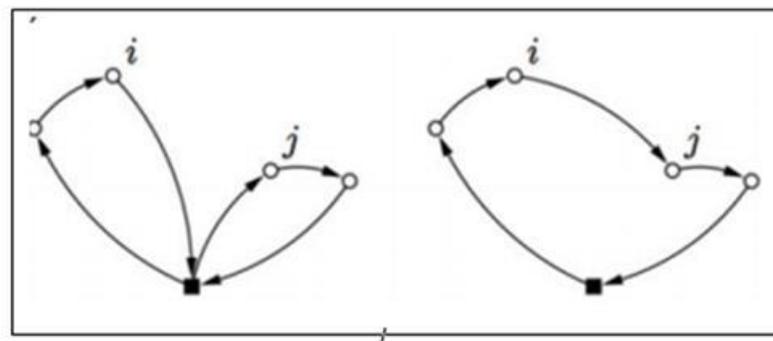


Figura 2.1 Dos rutas antes y después de ser unidas

Fuente: Olivera, 2004

El ahorro en las distancias obtenidas de la figura 2.1 está representado por la siguiente ecuación:

$$S_{ij} = C_{i0} + C_{0j} - C_{ij}.$$

Al utilizar este método se debe de conocer el peso del arco sean estos los costos o las distancias entre cada nodo.

El algoritmo de ahorro puede ser implementado de dos formas: una paralela y otra de forma secuencial, en la primera se utiliza todos los nodos en reconstrucción de las rutas y en la segunda se procede con la construcción de las rutas una por una.

➤ **Algoritmo de ahorro en versión paralela [6]**

Esquema para encontrar la solución:

Paso 1: Inicialización. Para cada cliente i construir una ruta $[0,i,0]$.

Paso 2: Cálculo de ahorros. Calcular el ahorro S_{ij} para cada par de cliente i,j

Paso 3: Mejor unión. Se toma el máximo de los ahorros, es decir $S_{i^*j^*} = \max S_{ij}$, el máximo se escoge entre los ahorros que no han sido considerados. Sean r_{i^*} y r_{j^*} las rutas que contiene a los clientes i^* y j^* respectivamente. Si i^* es el último cliente de r_{i^*} y j^* es el primer cliente de r_{j^*} y las combinaciones de r_{i^*} y r_{j^*} es factible, combinarlas.

Paso 4: Eliminación. Se elimina $S_{i^*j^*}$ de futuras consideraciones. Si quedan ahorros por examinar ir al paso 3, caso contrario terminar.

➤ **Algoritmo de ahorro en versión secuencial [6]**

Esquema para encontrar la solución:

Paso 1: Inicialización. Para cada cliente i construir una ruta $[0,i,0]$.

Paso 2: Cálculo de ahorros. Calcular el ahorro S_{ij} para cada par de cliente i y j .

Paso 3: Selección. Escoger un arco (i,j) que no haya sido considerado antes a la ruta actual a la vez que cumple con las restricciones, caso contrario terminar.

Paso 4: Extensión. Sea $(0, \dots, i, j, \dots, 0)$ la ruta actual. Si no hay ahorro entre (i,j) volver al paso 3 hasta que se puedan agregar más arcos a la ruta, si existe unir los arcos escogiendo el que obtenga mayor ahorro.

Paso 5: Repetición. Realizar el paso 3 y 4 hasta que no sea pueda agregar más arcos a la ruta.

2.3.2. MÉTODO DE AGRUPAR PRIMERO Y LUEGO ENRUTAR

Clustering First, Routing Second, es el método que permite asignar primero y rutear después. Se deriva en dos fases, la primera es armar rutas para un grupo de clientes denominado clúster, considerando la capacidad del vehículo. La segunda es armar una ruta que visiten a todos los clientes dentro del clúster creado. El resolver un clúster puede tener una resolución exacta o aproximada al óptimo [17].

2.3.3. MÉTODO DE RUTEAR PRIMERO Y AGRUPAR DESPUÉS

El método de Routing First Clustering Second, puede ser adaptado a cualquier heurística, desarrollándose en dos fases. En la primera fase se incluye a todos los nodos del problema, sin considerar ninguna restricción, dando una solución óptima. En la segunda fase se procede con la agrupación de los nodos de tal forma que no exceda la capacidad del vehículo [17].

Dado un conjunto $r = (0, v_1, \dots, v_n, 0)$ se determina la ruta r en la primera fase por medio del TSP, respetando la capacidad del vehículo.

El objetivo de su formulación es hallar el camino mínimo en un grafo dirigido y acíclico, construyendo un grafo $G=(X, V, W)$, dado que G conecta todo par de clientes, $X=(0, V_1, \dots, V_n)$ y $V=(V_i, V_j)$ es la capacidad del vehículo, ponderándose un costo a cada arco dentro de la ruta, quedando se la siguiente forma:

$$w((v_i, v_j)) = c_{0, v_{i+1}} + c_{v_j, 0} + \sum_{k=i+1}^{j-1} c_{v_k, v_{k+1}}$$

La figura 2.2 representa el posible ordenamiento de una ruta de un grafo asociado, cuya resolución es (0,1,2,0) y (0,3,5,4,0).

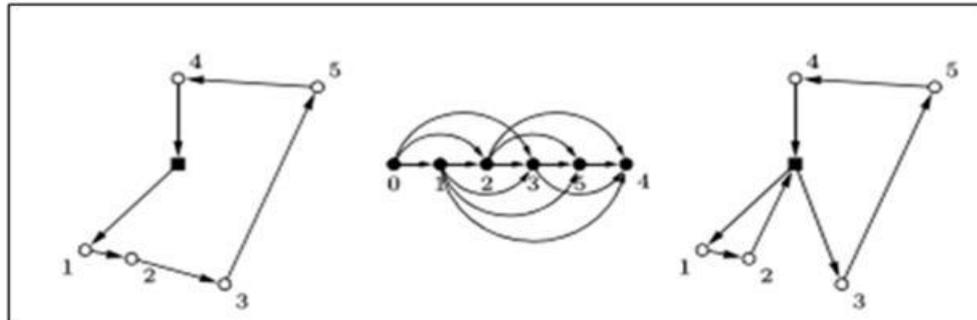


Figura 2.2 Aplicación del algoritmo rutear primero – asignar después

Fuente: Olivera, 2004

2.3.4. MÉTODO DE BARRIDO

Es un método sencillo y puede aplicarse en problemas planos y sus distancias están definidas como Euclidianas. En cada cliente i sus coordenadas están dadas por (p_i, θ_i) teniendo al depósito como origen [17].

Su resolución se ejecuta en un tiempo corto, aun realizándolo por medio de cálculos manuales, sea el problema de gran magnitud en datos. Por la facilidad que tiene el método de barrido y sus excelentes resultados, es muy utilizado.

Los clústeres se originan girando una semirrecta que inicia en el depósito e incorpora a los clientes “barridos” por la semirrecta hasta que se viole las restricciones de capacidad.

Esquema para encontrar la solución:

Paso 1: Inicialización. Ordenar los clientes según θ de manera creciente. Si dos clientes tienen igual valor de θ , colocar primero el de valor de p . seleccionar un cliente w para comenzar y hacer $k=1$ y $C_k=\{w\}$.

Paso 2: Selección. Si todos los clientes pertenecen a algún clúster, ir al paso 3.

Si no, seleccionar el siguiente cliente W_i . Si W_i puede ser agregado a C_k sin violar las restricciones de capacidad, hacer $C_k = C_k \cup \{W_i\}$. Si no, hacer $k = k + 1$ y crear un nuevo clúster $C_k = \{w\}$. Ir al paso 2.

Paso 3: Optimización. Para cada clúster C_k para $t=1, \dots, K$, resolver un TSP con sus clientes.

Se ilustra la figura 2.3 donde los clúster se encuentran limitados por las líneas punteadas.

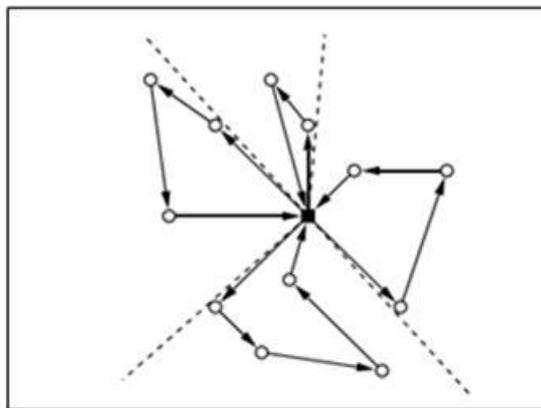


Figura 2.3 Una solución obtenida mediante el Algoritmo de Barrido

Fuente: Olivera, 2004

2.3.5. MÉTODO GLOTÓN: ALGORITMO DE GREEDY

El algoritmo de Greedy es conocido también como voraz, proporciona la solución óptima del problema de la mochila cuando se puede fraccionar los objetos. Sin embargo, se hace difícil cuando no se pueden fraccionar [18].

El algoritmo puede proporcionar resultados muy alejados del óptimo global, esto se da cuando desecha alternativas para obtener un óptimo local.

Características:

- Fáciles de implementar y rápido en obtener solución.
- No garantizan tener una solución óptima global.
- Considera su solución en base a la información que tiene disponible.

Elementos:

Se consideran 6 elementos claves para su utilización:

- Conjunto de candidatos (elementos para una solución).
- Función solución (se forma un subconjunto de los elementos para formar una solución).
- Función de selección (determina el mejor candidato de todos los elementos posibles, considerándose una sola vez).
- Función de factibilidad (determina si se es posible alcanzar la solución global con las soluciones parciales).
- Criterio que define una solución (informa sí la solución parcial resuelve el problema).
- Función objetivo (resultado de la solución, sea maximizar o minimizar).

Esquema:

- Se parte de un conjunto vacío.
- De la lista de candidatos se elige el mejor.
- Comprueba si puede llegar a la solución con el candidato seleccionado (de no ser posible, se elimina y no es considerado nunca más).
- Se selecciona a otro candidato para poder llegar a la solución (se repite el proceso hasta obtener o quedarnos sin solución).

Para obtener una primera solución, el algoritmo de Greedy es clave para dar paso a la utilización de una metaheurística.

2.4. MÉTODOS METAHEURÍSTICOS

Los métodos metaheurísticos son algoritmos para la resolución de problemas de optimización combinatoria cuyo procedimiento permite encontrar la solución en un espacio mucho más amplio, obteniendo mejores resultados con un tiempo mayor en su ejecución.

Se detallan algunos de los métodos metaheurísticos:

2.4.1. LA BÚSQUEDA TABÚ

La metaheurística Tabú es una de las técnicas inteligentes más importantes para obtener soluciones a los problemas de optimización combinatoria. Consigue los mejores resultados en la resolución del VRP.

Su objetivo es continuar con una serie de iteraciones con movimientos Tabú (movimientos prohibidos) en la búsqueda de soluciones de alta calidad [19].

Su característica principal es emplear estructuras de memorias a corto y largo plazo, almacenando toda la información necesaria en búsqueda de la mejor solución. Tratando de evitar la solución en óptimo local y buscar en una zona amplia la solución óptima.

El algoritmo Tabú ha sido aplicado por Osman and Salhi (1996) en los 20 problemas propuestos por Golden et al. (1984) [19].

Factores a considerarse en la búsqueda Tabú:

- Solución Inicial
- Elección del entorno

- La Subrutina

Su metodología está dada por una solución X definida en un entorno $N(x)$, cuyos movimientos se evalúan para una mejor solución definiendo un entorno reducido $N^*(x)$ como soluciones no Tabú del entorno x .

```
Generar solución inicial  $x_0$ 
 $k := 1$ .
 $x = x_0$ .                                     (x es la solución actual)

MIENTRAS la condición de finalización no se encuentre
HACER:
  Identificar  $N(x)$ .                               (Vecindario de x)
  Identificar  $T(x,k)$ .                             (Lista Tabú )
  Identificar  $A(s,k)$ .                             (Conjunto de Aspirantes)
  Determinar  $N^*(x,k) = \{N(x) - T(x,k)\} \cup A(x,k)$ . (Vecindario reducido)
  Escoger la mejor  $x \in N^*(x,k)$ 
  "Guardar" x si mejora la mejor solución conocida    $x_k := x$ .
  Actualizar la lista tabú
   $k := k+1$ .

FIN MIENTRAS
```

En la figura 2.4 se muestra el seudocódigo del algoritmo Tabú.

Figura 2.4 Seudocódigo del algoritmo de búsqueda Tabú Simple

Fuente: Alicia Rioja

Sí después de un número determinado de iteraciones basadas en la memoria de corto plazo la función objetivo no mejora, es necesario emplear una diversificación con memoria de largo plazo basado en frecuencia. Su estrategia es un vector ordenado ascendentemente según el número de cambios de un evento. En la programación los eventos seleccionados se cambian forzosamente, direccionando la búsqueda en las regiones que no hayan sido visitadas o menos frecuentadas [20]. Se describen los pasos del algoritmo:

1. Ingrese: MatrizDistancia, longitudTabu, Maxiter, ciclosdiver, listatabu.
2. Generar solución inicial (Clarke and Wright) x , y longitudtour $d(x)$.

3. Mientras Iter < Maxiter.

3.1 Actualice matriztabu.

3.2 $d(x)$ = Menor distancia.

3.3 Generar las $n-1$ permutaciones de dos nodos consecutivos.

3.4 Determinar la distancia de cada permutación.

3.5 Clasifique los movimientos en prohibidos y no prohibidos.

3.6 Determinar la menor distancia de los movimientos no prohibidos y seleccione la permutación.

3.7 Si todos los movimientos son prohibidos, aplique el criterio de aspiración, sino pare.

3.8 Actualice $d(x)$.

3.9 Si $d(x) < Op(x)$, entonces actualice $Op(x)$. Regresar a 3.1.

3.10 Si en K iteraciones no se actualiza $Op(x)$, entonces diversifique, regrese a 3.1.

4. El óptimo encontrado es $Op(x)$.

A continuación, se detalla con un ejemplo el desarrollo del funcionamiento de la metaheurística Tabú [20] con 10 nodos, según se muestra la matriz de distancia en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Matriz de distancias

d_{ij}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	11,85	6,15	9,11	3,13	5,09	3,35	10,60	7,62	11,72
2	11,85	0	9,22	9,13	11,93	11,53	10,86	3,89	10,34	4,37
3	6,15	9,22	0	11,83	8,62	9,94	3,03	6,23	11,29	11,38
4	9,11	9,13	11,83	0	6,77	4,95	10,93	11,16	2,08	5,66
5	3,13	11,93	8,62	6,77	0	2,08	6,24	11,70	4,94	10,64
6	5,09	11,53	9,94	4,95	2,08	0	7,92	11,98	2,97	9,52
7	3,35	10,86	3,03	10,93	6,24	7,92	0	8,62	9,91	11,97
8	10,60	3,89	6,23	11,16	11,70	11,98	8,62	0	11,76	7,76
9	7,62	10,34	11,29	2,08	4,94	2,97	9,91	11,76	0	7,41
10	11,72	4,37	11,38	5,66	10,64	9,52	11,97	7,76	7,41	0

Fuente: Sandoya Fernando

Parámetros:

- Solución inicial: {1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,1}
- Longitudinicial = 89.18
- Maxiter: = 200
- LongitudTabú: = 4
- CicloDiver = 20

Maxiter representa el número de las iteraciones a ejecutarse, longitudTabú se refiere al número máximo de prohibiciones sobre un nodo determinado, y el cicloDiver es el que permite revisar el número de iteraciones para dar paso a la diversificación.

Construir 3 tablas:

- Matriz de las secuencias (tabla 2.2 y 2.3)
- Matriz tabú (tabla 2.4)
- Matriz de frecuencias (2.5)

Tabla 2.2 Permutación inicial

Iter	Permutaciones											Dist	Tabú
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1		

Fuente: Sandoya Fernando

En la tabla 2.3 se muestra la primera iteración con una longitud de 78.76, siendo la mejor solución encontrada, recorriendo la siguiente ruta (2,1,3,4,5,6,7,8,9,10,2), en este proceso el nodos 1 en la posición 1 y el nodo 2 en la posición 2 quedan prohibidos.

Las matrices de memoria Tabú y de frecuencia se detallan en la tabla 2.4 y 2.5 representando las columnas como los nodos y las filas son las posiciones.

Tabla 2.3 Permutaciones de la iteración 1

Iter	Permutaciones											Dist	Tabú
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	89.18	
1	2	1	3	4	5	6	7	8	9	10	2	78.76	
	1	3	2	4	5	6	7	8	9	10	1	80.78	
	1	2	4	3	5	6	7	8	9	10	1	90.94	
	1	2	3	5	4	6	7	8	9	10	1	88.84	
	1	2	3	4	6	5	7	8	9	10	1	85.68	
	1	2	3	4	5	7	6	8	9	10	1	96.70	
	1	2	3	4	5	6	8	7	9	10	1	91.39	
	1	2	3	4	5	6	7	9	8	10	1	90.82	
	1	2	3	4	5	6	7	8	10	9	1	81.08	

Fuente: Sandoya Fernando

Tabla 2.4 Matriz Tabú

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Sandoya Fernando

En la matriz de frecuencia (tabla 2.5), la solución factible es ubicar el nodo1 en la posición 2 y el nodo 2 en la posición 1.

Tabla 2.5 Matriz de frecuencias (memoria de largo plazo)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Sandoya Fernando

La información obtenida es almacenada y se ejecuta la iteración 2, obteniendo los resultados en la tabla 2.6 con una longitud de 89.18, siendo la mejor solución la longitud 73.41.

Tabla 2.6 Iteración 2

Iter	Permutaciones										Dist	Tabú	
1	2	1	3	4	5	6	7	8	9	10	2	78.76	
2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	89.18	1
	2	3	1	4	5	6	7	8	9	10	2	73.41	
	2	1	4	3	5	6	7	8	9	10	2	83.57	
	2	1	3	5	4	6	7	8	9	10	2	78.42	
	2	1	3	4	6	5	7	8	9	10	2	75.26	
	2	1	3	4	5	7	6	8	9	10	2	86.28	
	2	1	3	4	5	6	8	7	9	10	2	80.97	
	2	1	3	4	5	6	7	9	8	10	2	80.40	
	2	1	3	4	5	6	7	8	10	9	2	80.73	

Fuente: Sandoya Fernando

En las últimas 20 iteraciones no se actualiza el óptimo local, por lo que el algoritmo realiza el procedimiento de diversificación para mejorar la búsqueda actualizándose en la iteración 33 que se muestra en la tabla 2.7.

Tabla 2.7 Iteración 33

Iter	Permutaciones										Dist	Tabú	
32	4	2	3	7	1	5	6	9	10	8	4	59.24	
33	2	4	3	7	1	5	6	9	10	8	2	54.58	
	4	3	2	7	1	5	6	9	10	8	4	69.77	
	4	2	7	3	1	5	6	9	10	8	4	63.68	
	4	2	3	1	7	5	6	9	10	8	4	65.47	
	4	2	3	7	5	1	6	9	10	8	4	65.14	
	4	2	3	7	1	6	5	9	10	8	4	63.17	1
	4	2	3	7	1	5	9	6	10	8	4	64.21	1
	4	2	3	7	1	5	6	10	9	8	4	69.79	
	4	2	3	7	1	5	6	9	8	10	4	58.09	1

Fuente: Sandoya Fernando

Se puede visualizar en la tabla 2.7 que la iteración 33 tiene una longitud de 54.58, siendo la mejor solución con el siguiente tour {2,4,3,7,1,5,6,9,10,8,2}. La tabla 2.8 muestra las frecuencias de cada nodo.

Tabla 2.8 Matriz de frecuencias

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	3	0	2	0	0	0	0	0	0
2	1	2	1	3	0	0	0	0	0	0
3	1	0	3	1	0	0	2	0	0	0
4	1	0	2	1	0	1	3	0	0	0
5	1	0	0	1	0	2	1	0	0	0
6	0	0	0	0	4	3	1	0	0	0
7	0	0	0	0	5	3	0	0	2	0
8	0	0	0	0	2	0	0	0	3	0
9	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3
10	0	0	0	0	0	0	0	3	0	2

Fuente: Sandoya Fernando

Antes de realizar la diversificación, la matriz de frecuencia es analizada, de esa forma se contruye la iteración 34 con una longitud de 77.96 como se muestra en la tabla 2.9.

Tabla 2.9 Iteración 34 después de la diversificación

Iter	Permutaciones										Dist	Tabú	
34	1	5	2	8	3	4	7	6	9	10	1	77.96	
35	5	1	2	8	3	4	7	6	9	10	5	76.80	
	1	2	5	8	3	4	7	6	9	10	1	94.49	
	1	5	8	2	3	4	7	6	9	10	1	80.72	
	1	5	2	3	8	4	7	6	9	10	1	82.62	
	1	5	2	8	4	3	7	6	9	10	1	74.99	
	1	5	2	8	3	7	4	6	9	10	1	66.19	
	1	5	2	8	3	4	6	7	9	10	1	78.92	
	1	5	2	8	3	4	7	9	6	10	1	82.06	
	1	5	2	8	3	4	7	6	10	9	1	80.41	

Fuente: Sandoya Fernando

La mejor solución se encuentra en la iteración 144 demostrada en la tabla 2.10 con una longitud de 36.79 con el siguiente tour {5,6,9,4,10,2,8,3,7,1,5,}.

Tabla 2.10 Iteración 144

Iter	Permutaciones										Dist	Tabú	
143	5	9	6	4	10	2	8	3	7	1	5	42.52	
144	9	5	6	4	10	2	8	3	7	1	9	46.12	
	5	6	9	4	10	2	8	3	7	1	5	36.79	
	5	9	4	6	10	2	8	3	7	1	5	45.49	
	5	9	6	10	4	2	8	3	7	1	5	51.85	
	5	9	6	4	2	10	8	3	7	1	5	49.86	
	5	9	6	4	10	8	2	3	7	1	5	48.90	1
	5	9	6	4	10	2	3	8	7	1	5	53.44	1
	5	9	6	4	10	2	8	7	3	1	5	47.71	1
	5	9	6	4	10	2	8	3	1	7	5	48.75	

Fuente: Sandoya Fernando

La figura 2.5 demuestra los 200 posibles tours generados en cada iteración, mejorando el óptimo local por medio de la diversificación, que permite realizar nuevas exploraciones.



Figura 2.5 Gráfico con 200 iteraciones

Fuente: Sandoya Fernando

2.4.2. GRASP (GREEDY RANDOMIZED ADAPTATIVE SEARCH PROCEDURE)

Esta metaheurística llamada “Procedimiento de búsqueda voraz aleatoria y adaptativa de Greedy”, está basada en un procedimiento de búsqueda avaricioso, aleatorio y adaptativo para resolver problemas con gran complejidad de optimización combinatoria, garantizando una buena solución, pero no la óptima [21].

La metaheurísticas GRASP se resuelve mediante procesos iterativos con una fase de construcción y una de mejora en cada paso. En la fase de construcción se va formando una solución factible por cada iteración, agregándose un elemento en cada paso, el mismo que está determinado por una función de Greedy que mide el beneficio de añadirlo, eligiendo el mejor.

Además, se dice que es adaptativa porque va actualizando todos los beneficios en cada iteración que se realice al añadir un elemento. Es decir, la solución de la iteración j no es igual a la solución de la iteración $j+1$.

También es aleatorio porque no selecciona al mejor candidato con el objetivo de diversificar y no repetir soluciones en dos construcciones diferentes, se forma una lista de los mejores candidatos, seleccionando uno al azar.

En la fase de mejora, se aplica un post-procedimiento para obtener una mejor solución, debido que en la fase inicial no garantiza la optimalidad local por las selecciones aleatorias que se realizan.

La metaheurística de GRASP se estructura de la siguiente forma:

1. Fase Constructiva:

- a) Considerar una lista restringida de los mejores candidatos (RCL).
 - b) Seleccionar aleatoriamente un elemento de la lista restringida de los mejores candidatos.
 - c) Repetir el proceso hasta obtener una solución.
2. Fase de Mejora:
- a) Realizar el proceso de búsqueda local a partir de la primera solución hasta que no se pueda mejorar más.
3. Actualización:
- a) Actualizar la información sí la nueva solución obtenida mejora a la anterior.

Se ilustra la figura 2.6 del pseudocódigo de la fase de construcción:

```
Procedimiento de ConstrucciónSolución (Solución)
  Solución = {}
  MIENTRAS La solución no esté completa
    Actualizar la función greedy
    Hallar RCL (RCL)
    a = SelecciónAleatoriaElemento (RCL)
    Solución = Solución + {a}
  FIN MIENTRAS
Fin
```

Figura 2.6 Seudocódigo del algoritmo GRASP

Fuente: Jacobo Rosales

Debido que en la primera solución dada, no garantiza la optimalidad local se realiza una búsqueda posterior a la fase de construcción.

Se muestra la figura 2.7 del pseudocódigo genérico de GRASP:

```
Procedimiento GRASP (NumIter, Semilla)
  MejorSolución = 0
  Para k = 1 hasta NumIter
    PS = ConstruirSolución (Semilla)
    PL = BúsquedaLocal (PS)
    Si Valor (PL) < Valor (MejorSolución) entonces
      MejorSolución = PL
    Fin si
  Devolver (MejorSolución)
Fin Para
Fin
```

Figura 2.7 Seudocódigo del algoritmo genérico Grasp

Fuente: Jacobo Rosales

2.4.3. ALGORITMOS GENÉTICO

Iñaki, hace referencia a Holland, quien realizó la introducción de esta técnica para la resolución de problemas de búsqueda y de optimización combinatoria haciendo uso sobre la evolución de los seres vivos. Cuyo conjunto de soluciones codificadas es la población y las soluciones son consideradas cromosomas, generándose una serie de operaciones genéticas entre ellas la de combinación sexual. Las soluciones se modifican a través de una serie de pasos en cada iteración, obteniendo nuevas soluciones con los resultados anteriores. Los valores óptimos del problema dependen de una buena codificación [22].

Su procedimiento es tomar como entrada a los ejemplares y se consideran como salida aquellos que van a generar descendencia en la nueva generación.

La figura 2.8 muestra el pseudocódigo del algoritmo genético.

```
BEGIN /* Algoritmo Simple*/
  Generar una población inicial.
  Computar la función de evaluación de cada individuo.
  WHILE NOT Terminado DO
    BEGIN/*Producir nueva generación*/
      FOR Tamaño población/2 DO
        BEGIN/*Ciclo Reproductivo*/
          Seleccionar dos individuos de la anterior generación,
          Para el cruce (probabilidad de selección proporcional
          A la función de evaluación del individuo).
          Cruzar con cierta probabilidad los dos
          individuos obteniendo dos descendientes.
          Mutar los dos descendientes con cierta probabilidad.
          Computar la función de evaluación de los dos
          descendientes mutados.
          Insertar los dos descendientes mutados en la nueva generación.
        END
      IF la población ha convergido THEN
        Terminado: = TRUE
      END
    END
  END
```

Figura 2.8 Seudocódigo del algoritmo genético Simple

Fuente: Iñaki Inza

2.4.4. RECOCIDO SIMULADO

Conocida como Simulated Annealing, es una metaheurística que se usa para resolver problemas discretos y continuos. Su principal característica es proporcionar una solución eficiente al salir de óptimos locales para obtener un óptico global [23].

Se asemeja al proceso de los metales para mejorar su estructura cristalina. Se calienta el metal hasta alcanzar una temperatura muy elevada, luego es enfriado de forma lenta, lo que permite que la estructura cristalina sea reorganizada por sí misma, con una configuración de energía mínima.

Descrito de otra forma a medida que se reduce a cero la temperatura, los movimientos considerados como peores se producen con menos frecuencia convirtiéndolos en óptimos globales.

Su procedimiento inicia desde una solución aleatoria y en cada iteración se tiene una nueva solución x' , la misma que es seleccionada de forma aleatoria de las vecindades de la solución actual x aceptando dos criterios, sí la nueva solución de la función objetivo es mejor o sí la solución de la función objetivo es peor.

El criterio aceptado en conjunto con un valor aleatorio generado entre cero y uno siendo menor que la solución actual y una nueva solución dividido por la temperatura del sistema T . al inicio la temperatura del sistema es ajustada en un valor T_0 , este valor disminuye cada N cool iteraciones como factor de enfriamiento α , donde $\alpha < 1$. [23]

La figura 2.9 muestra el seudocódigo de la metaheurística S.A

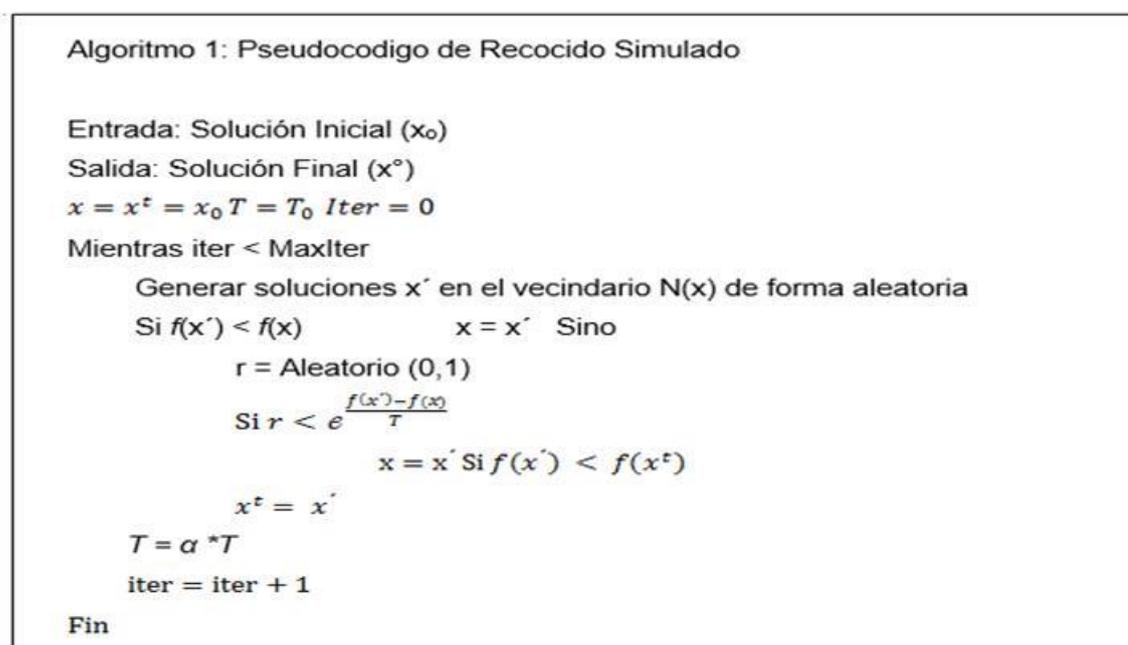


Figura 2.9 Seudocódigo del algoritmo recocido simulado

Fuente: Jhon Wilmer Escobar

2.5. COMPLEJIDAD ALGORÍTMICA

La complejidad de un algoritmo, cuya finalidad es resolver un problema, utilizando una secuencia de pasos, varía según el número de datos y restricciones a resolver, el tiempo de solución crece polinomialmente por cada dato adicional [3].

Para saber si un algoritmo es mejor que otro, se tomará en cuenta la forma de resolución del problema, y se considerará quien obtenga el menor tiempo posible o el que necesite menos memoria RAM. Si el problema toma tiempo en resolverse es un algoritmo con complejidad temporal; y, sí consume memoria, entonces es, un algoritmo de complejidad espacial.

El algoritmo combina a tres operadores de búsqueda en base a los movimientos entre rutas: de reubicación, intercambio y eliminación. El operador de reubicación asigna otro cliente en caso que haya sido considerado en el ruteo anterior, el operador de intercambio realiza la selección aleatoria de los vehículos utilizados para el mismo cliente, el operador de eliminación deshecha las rutas costosas para poder crear las que son más económicas.

En el mejor caso posible hay algoritmos con un tamaño N que tarden más o menos que otros, los mismos son dependientes del array (elementos que contienen variables de un mismo tipo) que se obtengan los N datos.

El algoritmo a resolver varía de acuerdo a la talla de los datos en función al tiempo ($T*N$), pero la complejidad del algoritmo no está en su tamaño N , sino en las funciones que debe de realizarse para encontrar la solución, con una serie consecutiva de instrucciones dadas, estas se repiten varias veces y a su vez, realiza comparaciones hasta encontrar el camino correcto.

CAPÍTULO 3

IMPLEMENTACIÓN DE HEURÍSTICA Y LA METAHEURÍSTICA

3.1. CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LOS ALGORITMOS

La recopilación de los datos obtenidos en este proyecto son facilitados por la empresa que está siendo objeto de estudio, cuya información ayudará a encontrar la mejor solución en el HFFCVRPTW y tener un amplio concepto de la realidad logística en el Ecuador.

Se detallan los datos para la resolución del problema planteado:

La tabla 3.1 muestra la flota total de 31 unidades de los dos OPLs del CDD costa, los transportes de cargas tienen capacidades heterogéneas utilizadas en las rutas provinciales y locales.

Tabla 3.1 Flota de transporte con capacidades

TONELADA	1	2	2,5	3	4,5	5	5,5	6	7	7,5	8	9	10
PROVINCIALES					1	2	2	2	1	4	1	3	7
LOCALES	3	1	3	1									

Fuente: Empresa de estudio

Por medio del Bing Maps que es un localizador satelital de Microsoft, se obtuvieron las coordenadas de las latitudes y longitudes para luego ser ingresadas en el VRP Spreadsheet Solver.

El anexo A. muestra las latitudes y longitudes del CDD principal con las bodegas secundarias y los almacenes.

El anexo B. muestra la solución del Solver de la matriz de distancia entre el CDD principal con las bodegas secundarias y los almacenes con sus respectivos tiempos.

El anexo C. muestra los m³ que se necesitan transportar para cada uno de los almacenes.

El anexo D. muestra los m³ disponible de cada vehículo de transporte.

La tabla 3.2 muestra los costos de los vehículos de transportes, de acuerdo a las capacidades y las rutas.

Tabla 3.2 Costo en dólares de vehículos por capacidad

TONELADA	4,5	5	5,5	6	7	7,5	8	9	10
CUENCA	300,00	300,00	300,00	300,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BABA	180,00	180,00	180,00	180,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
EL ORO	240,00	240,00	240,00	240,00	240,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MANABI	280,00	280,00	280,00	280,00	280,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MILAGRO	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MANA	130,00	130,00	130,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PENINSULA	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	0,00	0,00	0,00	0,00
QUEVEDO	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	0,00	0,00	0,00	0,00
VINCES	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	0,00	0,00	0,00	0,00
QUITO	0,00	350,00	350,00	350,00	350,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TONELADA	1	2	2,5	3					
GUAYAQUIL	80,00	80,00	80,00	80,00					

Fuente: Empresa de estudio

La empresa que ha sido tomada como muestra de estudio en este proyecto obtuvo como gastos de transportes según las rutas establecidas a priori, los valores de la tabla 3.3 muestra el gasto de transporte de acuerdo a las rutas establecidas de los M3 que se va a transportar.

Tabla 3.3 Gasto de transporte de la empresa

RUTAS DEL CDD GYE	BABAHOYO VENTANAS BABA, SAN JUAN, SALITRE MONTALVO RICAURTE CALUMA	QUITO	GUAYAQUIL	MILAGRO NARANJITO BUCAY SIMON BOLIVAR	CUENCA LOJA AZOGUEZ ZAMORA - YANTZAZA	DAULE VINCES
GASTO DE TRANSPORT E 2018 (en dólares)	3.590,00	17.260,00	17.969,00	2.908,80	3.230,00	1.820,00
RUTAS DEL CDD GYE	MANTA PORTOVIEJO BAHIA, CHONE JIPIJAPA PEDRO CARBO PTO.LOPEZ MONTECRISTI	PLAYAS LIBERTAD STA.ELENA	EMPALME QUEVEDO BUENAFE BALZAR MOCACHE MANA COLIMES	TRONCAL NARANJAL MACHALA PONCE ENRIQUE GUABO PIÑAS STA.ROSA PASAJE	TOTAL	
GASTO DE TRANSPORT E 2018 (en dólares)	5.955,00	4.980,00	2.580,00	3.430,00	69.712,50	

Fuente: Empresa de estudio

3.2. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA

Para la solución en este proyecto, se desarrolló un algoritmo eficiente, basado en la metaheurística Tabú, el mismo que permitió obtener la solución óptima al encontrar las rutas según las capacidades de cada vehículo, desde el centro de distribución principal hacia los almacenes, cuyo abastecimiento es la reposición del buffer asignado a cada emisor de acuerdo al lay-out (diseño del espacio físico que posee un almacén para la mejor distribución de los elementos que la componen).

Brandao & Eglese hace énfasis en la ejecución de un problema VRP con la utilización de la metaheurística Tabú con la obtención de resultados dentro de tiempos computacionales razonables con 255 vértices y 375 aristas. En comparación con la resolución de la heurística clásica, el resultado de la metaheurística fue de alta calidad y a menudo produce un valor óptimo [24].

3.2.1. CONDICIÓN DEL SISTEMA A MODELAR

El modelo matemático se realizó en función al problema planteado en el capítulo 1, con las respectivas restricciones declaradas en la sección 1.6.1.

Se adiciona las siguientes condiciones al sistema:

- Cabe mencionar que se debe de visitar a todos los almacenes saliendo del CDD principal.
- Terminado el servicio de entrega de los electrodomésticos se debe regresar al punto de origen.
- Las rutas deben ser óptimas cumpliendo las restricciones de las capacidades de la flota heterogénea y los tiempos establecidos por las tiendas.
- La demanda de los productos que tenga cada almacén, será considerada en m³.
- El objetivo principal es la utilización mínima de los vehículos de transporte para cada ruta, con la obtención del menor costo posible en la transportación de los productos en M3 que tenga la empresa de electrodoméstico.

3.2.2. FORMULACIÓN DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA DEL HFFCVRPWT

Para la solución del problema planteado en este proyecto, se utilizará la formulación matemática del HFFCVRPTW, siendo una extensión del VRP en la que se considera la capacidad de una flota fija heterogénea con ventanas de tiempo.

Sea $G = (V, A)$ un grafo dirigido, donde $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n, v_{n+1}\}$ es el conjunto de vértices y $A = \{(v_i, v_j); v_i, v_j \in V, i \neq j\}$ denominado el conjunto de arcos. Los vértices v_0 y v_{n+1} representan al depósito y cada vértice v_i al cliente i el cual tiene asociado una demanda [3].

Para la solución en este proyecto, se desarrolló un algoritmo eficiente, basado en la metaheurística Tabú, el mismo que permitió obtener la solución óptima al encontrar las rutas según las capacidades de cada vehículo, desde el centro de distribución principal hacia los almacenes, cuyo abastecimiento es la reposición del buffer pactado.

En el siguiente texto se describen las formulaciones matemáticas del CVRPTW con flota fija heterogénea, el mismo que tiene ventanas de tiempo suaves y duras sin incurrir en ninguna penalidad por no llegar a tiempo en el almacén [3].

- Sea un grafo dirigido $G = V, A$ especificando que G es un conjunto finito de objetos V y A . considerando a V el conjunto de vértices y A , el conjunto de arcos.
- A es un multiconjunto de la forma $A \subseteq \{(i, j) : i \in V, j \in V, i \neq j\}$.
- Los vértices v_0 , y v_{n+1} representan al depósito y cada vértice v_i al cliente (i) , Siendo una ruta posible si empieza en el vértice v_0 y termina en el vértice v_{n+1} .
- Asociándose una demanda q_i por cada cliente (i) en metros cúbicos.
- También se define C_{ij} el costo de viajar del cliente v_i , al cliente v_j .
- Adicional se fija una ventana horaria para el depósito v_0 , y v_{n+1} y para el cliente v_i dentro del cual debe ser visitado, representado por e_{v_i}, l_{v_i} .
- La demanda y el horario de atención del depósito son iguales a cero.
- A los conjuntos de vértices adyacentes e incidentes, estarán denotados por $\Delta^+(v_i)$ y $\Delta^-(v_i)$ respectivamente, especificado de la siguiente forma:
$$\Delta^+(v_i) = \{v_j \in V_c \setminus (v_i, v_j) \in A\}$$
 y
$$\Delta^-(v_i) = \{v_j \in V_c \setminus (v_j, v_i) \in A\}.$$

La figura 3.1 muestra el número de vértices y las aristas

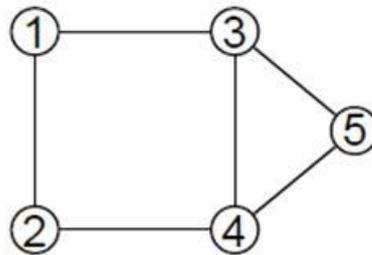


Figura 3.1 Gráfico de una ruta

$$V = \{1,2,3,4,5\} \text{ Y } A = \{\{1,2\}, \{1,3\}, \{2,4\}, \{3,4\}, \{3,5\}, \{4,5\}\}.$$

Matriz de adyacencia dado un grafo $G = (V, A)$

$$M(G) \in M_{V \times V}$$

$$M(G) = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

En donde $m_{ij} := \begin{cases} 1, & \text{si } i \text{ y } j \text{ son vértices adyacentes} \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$

$m_{ij} :=$ Es la variable binaria de adyacencia, dado a que i representa las columnas con quien se intersecta cada nodo y la j las filas (nodos).

Lista de adyacencia:

$$L[1] = \{2,3\}$$

$$L[2] = \{1,4\}$$

$$L[3] = \{1,4,5\}$$

$$L[4] = \{2,3,5\}$$

$$L[5] = \{3,4\}$$

Matriz de incidencia dado un grafo $G = (V, A)$

$$H(G) \in M_{V \times A}$$

$$H(G) = \begin{matrix} & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \begin{matrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{matrix}$$

En donde $h_{ij} := \begin{cases} 1, & \text{si el arco } j \text{ es incidente a la vértice } i. \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$

$h_{ij} :=$ Es la variable binaria de incidencia, dado a que i representa las columnas (arcos) y j las filas los nodos.

A continuación, se describen los parámetros [3] [17]:

Índices:

- i Nodos de partida (clientes y el CDD).
- j Nodos de llegada (solo clientes).
- k Flota vehicular del depósito.

Parámetros:

- C_{ij} Costo asociado al arco $(v_i, v_j) \in A$.
- d_i Cantidad demandada del cliente (i) .
- s_{vi} Tiempo de servicio del cliente (i) .
- $[e_{vi}, l_{vi}]$ Ventana horaria de atención del cliente (i) .
- t_{ij} Tiempo de arribo a los cliente $(v_i, v_j) \in A$.
- q_k Capacidad de los vehículos.

Se definen las variables de decisión del modelo:

h_{vik} tiempo en el que empieza el servicio en el cliente v_i .

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{si el vehículo } k \in K \text{ se desplaza en el arco } (v_i, v_j) \in V \\ 0 & \text{si el vehículo } k \in K \text{ no se desplaza en el arco } (v_i, v_j) \in V \end{cases}$$

X_{ijk} = Es la variable binaria, si el arco es factible en la ruta ij con el vehículo k .

3.3. FUNCIÓN OBJETIVO Y RESTRICCIONES DEL PROYECTO

Los parámetros dados para la formulación de la función objetivo y las restricciones del sistema, fueron considerados en el proyecto, representado de la siguiente forma:

FUNCIÓN OBJETIVO:

$$\sum_{k \in K} \sum_{(vi, vj) \in A} C_{ijk} X_{ijk} \quad (3.1)$$

En la ecuación 3.1 se suman los costos de viaje de cada arco que forma la solución.

RESTRICCIONES DE LA FUNCIÓN OBJETIVO:

- Todo cliente $v_i \in V_c$ debe ser visitado una sola vez.

$$\sum_{k \in K} \sum_{vj \in \Delta^-(vi)} X_{ijk} = 1 \quad \forall v_i \in V_c \quad (3.2)$$

- Cada vehículo al iniciar la ruta parte desde el depósito.

$$\sum_{v_j \in \Delta^+(v_0)} X_{0jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (3.3)$$

- Cada vehículo al terminar la ruta debe volver al depósito.

$$\sum_{v_i \in \Delta^+(v_0)} X_{i0k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (3.4)$$

- Cada ruta debe ser visitada por el mismo vehículo.

$$\sum_{v_j \in \Delta^+(v_i)} X_{ijk} - \sum_{v_j \in \Delta^-(v_i)} X_{jik} = 0 \quad \forall k \in K, v_i \in V_c \quad (3.5)$$

- La suma demandada de todos los productos enviados a cada cliente no puede superar la capacidad del vehículo.

$$\sum_{v_i \in V_c} d_i \sum_{v_j \in \Delta^+(v_i)} X_{ijk} \leq q_k \quad \forall k \in K \quad (3.6)$$

- Las ventanas horarias de recepción de cada cliente, están expresadas en las siguientes notaciones.

$$e_{v_i} \leq h_{vik} \quad \forall v_i \in V, k \in K \quad (3.7)$$

$$h_{vik} + s_{vi} \leq l_{vi} \quad \forall v_i \in V, k \in K \quad (3.8)$$

- La siguiente ecuación elimina los subtours y asegura la continuidad en el tiempo de viaje de una ruta.

$$h_{vjk} - h_{vik} \geq s_{vi} + t_{ijk} - M(1 - X_{ijk}) \quad \forall (v_i, v_j) \in V, k \in K \quad (3.9)$$

- Declaración de las variables.

$$X_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall (v_i, v_j) \in A, k \in K \quad (3.10)$$

$$h_{vik} \geq 0 \quad \forall v_i \in V, k \in K \quad (3.11)$$

La variable X_{ijk} es binaria y las h_{vik} es positiva.

3.4. APLICACIÓN DE LA HEURÍSTICA DE AHORRO

En la aplicación de la heurística de ahorro llamada Clarke and Wright, se considera el objetivo de minimizar las distancias, cuya solución es encontrar una ruta bastante aceptable que visite todos los nodos dentro de un clúster del conjunto de los puntos dados.

La programación de la heurística de ahorro Clarke and Wright, ha sido realizada por medio del software Wolfram Matemática.

La figura 3.2 detalla los pasos a seguir [14]:

Paso # 1 Inicialización

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

Paso # 2 Cálculo de ahorros

Se calcula $S_{ij} = C_{i1} + C_{1j} - C_{ij}$ para cada par de clientes i y j

Paso # 3 Mejorar la unión

Sea $S_{i^*j^*} = \max S_{ij}$, donde el máximo se toma entre los ahorros que no han sido considerados todavía. Sean r_{i^*} y r_{j^*} las rutas que contienen a los clientes i^* . Si i^* es el último cliente de r_{i^*} y j^* es el primer cliente de r_{j^*} y la combinación de r_{i^*} y r_{j^*} es factible, entonces se combinan.

Paso # 4 Eliminar futuras consideraciones

Si $S_{i^*j^*}$ si quedan ahorros por examinar ir al paso 3, sino terminar.

Figura 3.2 Algoritmo Clarke and Wright

Fuente: Chilibringa Tapia

Para observar el desarrollo o funcionamiento de la aplicación de la heurística de Clarke and Wright, se consideró como ejemplo el clúster de la ruta de Cuenca, la tabla 3.4 muestra los 7 nodos o almacenes a visitar.

Tabla 3.4 Almacenes de la ruta Cuenca

Punto	Almacén	Latitud (y)	Longitud (x)	hora inicio	hora final	tiempo servicio	Demanda en m ³ .
1	CDD GYE	-2,10	-79,94	8:00:00	17:00:00	0:00:00	0
2	LOJA 725	-3,99	-79,20	7:00:00	22:00:00	0:30:00	3,19
3	LOJA 726	-3,99	-79,20	7:00:00	22:00:00	0:30:00	2,36
4	LOJA 727	-3,99	-79,20	7:00:00	22:00:00	0:30:00	1,89
5	CUENCA 111	-2,89	-79,00	8:00:00	17:00:00	0:30:00	4,14
6	CUENCA 115	-2,89	-79,00	8:00:00	17:00:00	0:30:00	2,80
7	CUENCA 122	-2,89	-79,00	8:00:00	17:00:00	0:30:00	1,54
8	CATAMAYO 729	-3,98	-79,35	8:00:00	17:00:00	0:30:00	1,36

Fuente: Elaboración propia

Los costos de transporte para cada uno de los 7 nodos, se reflejan en la tabla 3.5

Tabla 3.5 Costo en dólares de transporte desde el CDD a cada nodo

PUNTOS	C _{0j}
1	270
2	270
3	270
4	370
5	370
6	370
7	380

Fuente: Elaboración propia

El desarrollo del método de ahorro que contiene 4 pasos, se describe a continuación:

Paso 1: Construir la matriz de distancia de los nodos que conforman el clúster, incluyendo el CDD principal.

Tabla 3.6 Distancia de los nodos en km

PUNTOS	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,00	412,85	413,07	413,07	210,65	210,65	210,65	374,21
2	412,85	0,00	0,66	0,69	199,33	199,33	199,33	39,04
3	413,07	0,66	0,00	0,43	199,51	199,51	199,51	39,22
4	413,07	0,69	0,43	0,00	199,51	199,51	199,51	39,22
5	210,65	199,33	199,51	199,51	0,00	0,50	0,68	231,03
6	210,65	199,33	199,51	199,51	0,50	0,00	0,48	231,03
7	210,65	199,33	199,51	199,51	0,68	0,48	0,00	231,03
8	374,21	39,04	39,22	39,22	231,03	231,03	231,03	0,00

Fuente: Elaboración propia

Paso 2: Se utiliza la fórmula de ahorro Clarke and Wright.

$$S_{ij} = C_{i0} + C_{0j} - C_{ij}$$

Tabla 3.7 Matriz de ahorro de los nodos del clúster

PUNTOS	2	3	4	5	6	7	8
2	0,00	825,26	825,23	424,17	424,17	424,17	748,02
3	825,26	0,00	825,72	424,22	424,22	424,22	748,07
4	825,23	825,72	0,00	424,22	424,22	424,22	748,07
5	424,17	424,22	424,22	0,00	420,80	420,62	353,83
6	424,17	424,22	424,22	420,80	0,00	420,82	353,83
7	424,17	424,22	424,22	420,62	420,82	0,00	353,83
8	748,02	748,07	748,07	353,83	353,83	353,83	0,00

Fuente: Elaboración propia

Al visualizar la tabla 3.7 se puede denotar que solo se han considerado los almacenes para armar la matriz de ahorro, empezando en el nodo 2. En la que se puede determinar que el mayor ahorro esta entre el almacén 3 y el 4, que corresponde a Loja 726 y Loja 727.

Paso 3: Construcción de la ruta del clúster de Cuenca, Loja, Catamayo.

En la construcción de la ruta, se asignan los nodos con los mayores ahorros, a la vez que se considera la demanda de los almacenes y el horario de recepción, sin exceder la capacidad del vehículo.

La solución de la ruta es la siguiente: {1,4,3,2,8,5,6,7,1}, correspondiente a {CDD Gye, Loja 727, Loja 726, Loja 725, Cuenca 111, Cuenca 115, Cuenca 122, Catamayo 729, CDD Gye}.

Paso 4. Los nodos que han sido seleccionados para armar la ruta esperada, no son considerados en futuras soluciones para armar otra ruta.

Se detalla la programación de Clarke and Wright en Wolfram.

```
{costos, flota, clientes, distancias} = Import[NotebookDirectory[] <> "DATA PROYECTO 2018 - Local.xlsx", "XLSX"];
|importa |directorio de cuaderno

clientes[[2 ;;, {5, 6, 7, 9}]] = Table[TimeObject[clientes[[i, j]], {i, 2, Length[clientes]}, {j, {5, 6, 7, 9}}];
|tabla |objeto de tiempo |longitud

clientes = clientes[[2 ;;]];
velocidadPromedio =
  Total[
|total
  Table[clientes[[i, 8]] / If[UnitConvert[clientes[[i, 9]] - TimeObject[0], "Hours"][[1]] != 0,
|tabla |si |convierte unidad |objeto de tiempo
    UnitConvert[clientes[[i, 9]] - TimeObject[0], "Hours"][[1]], 1, {i, Length[clientes]}] / (Length[clientes]);
|convierte unidad |objeto de tiempo |longitud |longitud
  ];
distancias = distancias[[2 ;;, 3 ;;]];
tiempo = clientes[[rutaTest[[2]], 5]] - Quantity[distancias[[rutaTest[[1]], rutaTest[[2]]]] / velocidadPromedio, "Hours"];
|cantidad
If[(TimeObject[5] - tiempo)[[1]] > 0, tiempo = TimeObject[5]];
|si |objeto de tiempo |objeto de tiempo
tiempoAtencion = clientes[[rutaTest[[2]], 7]];
tiempo += tiempoAtencion - TimeObject[0] + Quantity[distancias[[rutaTest[[1]], rutaTest[[2]]]] / velocidadPromedio, "Hours"];
CargaRuta[rutaTest_] := Sum[clientes[[rutaTest[[p]], -1]], {p, 2, Length[rutaTest] - 1}];
|suma |longitud
TiempoRuta[rutaTest_] := Module[{tiempo, tiempoAtencion, sol = True},
|módulo |verdadero
```

```

tiempo = clientes[ [rutaTest[[2]], 5] ] - Quantity[distancias[ [rutaTest[[1]], rutaTest[[2]] ] ] / velocidadPromedio, "Hours"];
                                     [cantidad]

If[ (TimeObject[5] - tiempo)[[1]] > 0, tiempo = TimeObject[5]];
[si] [objeto de tiempo] [objeto de tiempo]

tiempoAtencion = clientes[ [rutaTest[[2]], 7] ];

tiempo += tiempoAtencion - TimeObject[0] + Quantity[distancias[ [rutaTest[[1]], rutaTest[[2]] ] ] / velocidadPromedio, "Hours"];

Do[
[repite]
    tiempoAtencion = clientes[ [rutaTest[[p]], 7] ];
    If[
    [si]
        (tiempo < clientes[ [rutaTest[[p]], 5] ] - TimeObject[0] +
        [objeto de tiempo]
            Quantity[distancias[ [rutaTest[[p-1]], rutaTest[[p]] ] ] / velocidadPromedio, "Hours") V
            [cantidad]
            ((tiempo + tiempoAtencion - TimeObject[0] + Quantity[distancias[ [rutaTest[[p-1]], rutaTest[[p]] ] ] / velocidadPromedio, "Hours") >
            [objeto de tiempo] [cantidad]
            clientes[ [rutaTest[[p]], 6] ] V
            (tiempo > tiempo + tiempoAtencion + Quantity[distancias[ [rutaTest[[p-1]], rutaTest[[p]] ] ] / velocidadPromedio, "Hours") -
            [cantidad]
            TimeObject[0]) V (Quantity[distancias[ [rutaTest[[p-1]], rutaTest[[p]] ] ] / velocidadPromedio, "Hours")[[1]] > 4),
        sol = False;
        [falso]
    Break[ ] ];
    [finaliza iteración]
tiempo += tiempoAtencion + Quantity[distancias[ [rutaTest[[p-1]], rutaTest[[p]] ] ] / velocidadPromedio, "Hours"] - TimeObject[0];
                                     [cantidad] [objeto de tiempo]
    , {p, 3, Length[rutaTest] - 1}];
                                     [longitud]
Return[sol]
[retorna]
];

TiempoRuta2[rutaTest_] := Module[{tiempoInicio, tiempo, tiempoTotal, tiempoAtencion, sol = True},
                                     [módulo] [verdadero]
    tiempoInicio =
        tiempo = clientes[ [rutaTest[[2]], 5] ] - Quantity[distancias[ [rutaTest[[1]], rutaTest[[2]] ] ] / velocidadPromedio, "Hours"];
                                     [cantidad]
    tiempoAtencion = clientes[ [rutaTest[[2]], 7] ];
    tiempo += tiempoAtencion - TimeObject[0] + Quantity[distancias[ [rutaTest[[1]], rutaTest[[2]] ] ] / velocidadPromedio, "Hours"];
                                     [objeto de tiempo] [cantidad]
    Do[
    [repite]
        tiempoAtencion = clientes[ [rutaTest[[p]], 7] ];
        If[
        [si]

```

```

(tiempo < clientes[ rutaTest[[p]], 5]) - TimeObject[0] +
    [objeto de tiempo]
    Quantity[distancias[ rutaTest[[p-1]], rutaTest[[p]]] / velocidadPromedio, "Hours"]) V
    [cantidad]
((tiempo + tiempoAtencion - TimeObject[0] + Quantity[distancias[ rutaTest[[p-1]], rutaTest[[p]]] / velocidadPromedio, "Hours"]) >
    [objeto de tiempo] [cantidad]
clientes[ rutaTest[[p]], 6]),
sol = False;
    [falso]
Break[];
    [finaliza iteración]

tiempo += tiempoAtencion + Quantity[distancias[ rutaTest[[p-1]], rutaTest[[p]]] / velocidadPromedio, "Hours"] - TimeObject[0];
    [cantidad] [objeto de tiempo]
, {p, 3, Length[rutaTest] - 1};
    [longitud]

tiempoTotal = tiempo - tiempoInicio;
tiempoInicio = ToString[tiempoInicio[[1, 1]]] <> ":" <>
    [convierte a cadena de caracteres]
If[tiempoInicio[[1, 2]] < 10, "0" <> ToString[tiempoInicio[[1, 2]]], ToString[tiempoInicio[[1, 2]]]] <> ":" <>
    [si] [convierte a cadena de caracteres] [convierte a cadena de caracteres]
If[tiempoInicio[[1, 3]] < 10, "0" <> ToString[Round[tiempoInicio[[1, 3]]]], ToString[Round[tiempoInicio[[1, 3]]]]];
    [si] [convierte ... entero más próximo] [convierte ... entero más próximo]
tiempo = ToString[tiempo[[1, 1]]] <> ":" <> If[tiempo[[1, 2]] < 10, "0" <> ToString[tiempo[[1, 2]]], ToString[tiempo[[1, 2]]]] <>
    [convierte a cadena de caracteres] [si] [convierte a cadena de caracteres] [convierte a cadena de caracteres]
    ":" <> If[tiempo[[1, 3]] < 10, "0" <> ToString[Round[tiempo[[1, 3]]]], ToString[Round[tiempo[[1, 3]]]]];
    [si] [convierte ... entero más próximo] [convierte ... entero más próximo]
Return[{tiempoInicio, tiempo, tiempoTotal[[1]]}]
    [retorna]
];

CalcularDistancias[ruta_] := Sum[distancias[ ruta[[r]], ruta[[r+1]]], {r, Length[ruta] - 1};
    [suma] [longitud]
CostoRuta[idRuta_] := Total[Select[flota, MemberQ[idRuta[[All, 2]], #[[1]]] &][[All, -1]]]
    [total] [selecciona] [¿contenido en?] [todo] [todo]

MostrarMapa[conjuntoRutas_, coordenadas_, titulo_] :=
Do[
    [repite]
Print[
    [escribe]
Show @@
    [muestra]
Flatten[
    [aplana]
{GeoGraphics[{Darker[Hue[1/i]], Thickness[0.007]},
    [mapa geográfico] [más o ...] [tonalidad] [grosor]

```

```

GeoPath[Table[GeoPosition[coordenadas[[conjuntoRutas[[i,j]]]], {j, Length[conjuntoRutas[[i]]}], "Geodesic"),
|trayecto... |tabla |posición geográfica |longitud

Frame → True, FrameStyle → Directive[Black, Thick]],
|marco |ver... |estilo de marco |directiva |negro |grueso

GeoGraphics[{Red, Table[Point[GeoPosition[coordenadas[[i]]]], {i, Length[coordenadas]}], Frame → True,
|mapa geográfico |rojo |tabla |punto |posición geográfica |longitud |marco |verdadero

FrameStyle → Directive[Black, Thick],
|estilo de marco |directiva |negro |grueso

PlotLabel → titulo <> " Ruta " <> ToString[i] <> " distancia total: " <> ToString[CalcularDistancias[conjuntoRutas[[i]]] <>
|etiqueta de representación |convierte a cadena de caracteres |convierte a cadena de caracteres

" Km"], GeoGraphics[{Yellow, Point[GeoPosition[coordenadas[[Length[coordenadas]]]], Frame → True,
|mapa geográfico |amarillo |punto |posición geográfica |longitud |marco |verdadero

FrameStyle → Directive[Black, Thick]}], {i, Length[conjuntoRutas]};
|estilo de marco |directiva |negro |grueso |longitud

(* (2^(1/(clientes[[o,6]]-clientes[[o,5]])[[1]])) + (2^(1/(clientes[[d,6]]-clientes[[d,5]])[[1]]))) *)
matrizAhorros =
SortBy[
|ordena por
Flatten[
|aplana
Table[{o, d, distancias[[1, o]] + distancias[[1, d]] - distancias[[o, d]] +
|tabla
((2^(1/(clientes[[o,6]]-clientes[[o,5]])[[1]])) + (2^(1/(clientes[[d,6]]-clientes[[d,5]])[[1]])))},
{o, 2, Length[distancias]}, {d, o+1, Length[distancias]}, 1], -#[[3]] &][[All, 1 ;; 2]];
|longitud |longitud |todo

rutas = {};
idRuta = {};

Module[{c1, c2, rutaTest, ruta1, ruta2, carga, a, id, delete),
|módulo

Do[
|repite
{c1, c2} = ahorro;
ruta1 = Position[rutas, c1];
|posición
ruta2 = Position[rutas, c2];
|posición
delete = False;
|falso

(*No existen en la rutaTest*)
a = SortBy[Select[flota[[2 ;;]], ! MemberQ[idRuta[[All, 2]], #[[1]]] &], #[[-2]] &][[All, 1 ;; -2]];
|ordena- |selecciona |¿contenido en? |todo |todo

```

```
If[ (ruta1 == {}) ^ (ruta2 == {}) ^ (a != {}),  
|si  
  rutaTest = {1, c1, c2, 1};  
  carga = CargaRuta[rutaTest];  
  a = SelectFirst[a, (#[[-1]] >= carga) &];  
  |selecciona el primero  
  If[ (! TiempoRuta[rutaTest]) ∨ (MissingQ[a]),  
  |si |¿datos ausentes?  
    Continue[]];  
  |continúa iteración  
  AppendTo[rutas, rutaTest];  
  |añade al final  
  
  AppendTo[idRuta, {Length[rutas], a[[1]], a[[-1]]}];  
  |añade al final |longitud  
  Continue[]  
  |continúa iteración  
];  
  
If[ (ruta1 != {}) ∨ (ruta2 != {}),  
|si  
Which[ (ruta1 == {}),  
|cuál  
  id = ruta2[[1, 1]];  
  rutaTest = rutas[[id]];  
  
  Which[ (ruta2[[1, 2]] == 2),  
  |cuál  
    rutaTest = Insert[rutaTest, c1, 2];  
    |inserta  
  ,  
  (ruta2[[1, 2]] == (Length[rutaTest] - 1)),  
  |longitud  
  rutaTest = Insert[rutaTest, c1, Length[rutaTest]]  
  |inserta |longitud  
  ,  
  True,  
  |verdadero  
  Continue[]  
  |continúa iteración  
  , (ruta1 != {}) ^ (ruta2 != {}),  
  id = id1 = ruta1[[1, 1]];  
  rutaTest1 = rutas[[id1]];  
  
  id2 = ruta2[[1, 1]];  
  rutaTest2 = rutas[[id2]]];
```

```
delete = True;
    |verdadero

Which[(rutaTest1 == rutaTest2),
|cuál
  Continue[],
  |continúa iteración
  (ruta1[[1, 2]] == 2) ^ (ruta2[[1, 2]] == 2),
  rutaTest = Join[Reverse[rutaTest1[[2 ;; ]]], rutaTest2[[2 ;; ]]];
  |junta |invierte orden
  , (ruta1[[1, 2]] == 2) ^ (ruta2[[1, 2]] == (Length[rutaTest2] - 1)),
  |longitud
  rutaTest = Join[Reverse[rutaTest1[[2 ;; ]]], Reverse[rutaTest2[[ ;; -2]]]];
  |junta |invierte orden |invierte orden
, (ruta1[[1, 2]] == (Length[rutaTest1] - 1)) ^ (ruta2[[1, 2]] == 2),
|longitud
  rutaTest = Join[rutaTest1[[ ;; -2]], rutaTest2[[2 ;; ]]];
  |junta
  , (ruta1[[1, 2]] == (Length[rutaTest1] - 1)) ^ (ruta2[[1, 2]] == (Length[rutaTest2] - 1)),
  |longitud |longitud
  rutaTest = Join[rutaTest1[[ ;; -2]], Reverse[rutaTest2[[ ;; -2]]]];
  |junta |invierte orden
  , True,
  |verdadero
  Continue[]],
|continúa iteración
True,
|verdadero
Continue[]];
|continúa iteración

If[(! TiempoRuta[rutaTest]), Continue[]];
|sí |continúa iteración

carga = CargaRuta[rutaTest];
If[(carga > idRuta[[id, 3]]),
|sí
  a = SelectFirst[a, #[[-1]] ≥ carga &];
  |selecciona el primero
  If[MissingQ[a], Continue[]];
  |sí |¿datos ausent... |continúa iteración
  idRuta[[id]] = {idRuta[[id, 1]], a[[1]], a[[-1]]}
];
rutas[[id]] = rutaTest;

If[delete,
|sí
  rutas = DeleteCases[rutas, rutaTest2];
  |elimina casos
  idRuta = Delete[idRuta, id2]]];
```

```
    ]
    , {ahorro, matrizAhorros}]
];

factible = True;
    |verdadero

If[ (Length[DeleteCases[Flatten[rutas], 1]] < Length[clientes] - 1),
|si |longitud |elimina casos |aplana |longitud
    faltantes = Complement[Range[Length[clientes]], Flatten[rutas]];
    |complemento |rango |longitud |aplana

    Do[
    |repite
        a = SortBy[Select[flota[[2 ;;]], ! MemberQ[idRuta[[All, 2]], #[[1]]] &], #[[-2]] &][[All, ;; -2]];
        |ordena· |selecciona |¿contenido en? |todo |todo

    If[a == {},
    |si
        Print["Infactible"];
        |escribe
        factible = False;
        |falso

        Break[]];
        |finaliza iteración

    Do[
    |repite
        If[clientes[[faltantes[[i]], -1]] < a[[j, -1]],
        |si
            AppendTo[rutas, {1, faltantes[[i]], 1}];
            |añade al final
            AppendTo[idRuta, {Length[idRuta] + 1, a[[j, 1]], a[[j, -1]]}];
            |añade al final |longitud
            Break[];
            |finaliza iteración
        ]
        , {j, Length[a]}}];

        , {i, Length[faltantes]}}];

];

If[factible, MostrarMapa[rutas, clientes[[All, 3 ;; 4]], "Ruteo con Clarke And Wright: "];
|si |todo

Print["Rutas:"];
|escribe

Print[rutas];
|escribe

Print["Camiones:"];|
|escribe

Print[idRuta];
|escribe

Print["Costo de las rutas: " <> ToString[CostoRuta[idRuta]]];
|escribe |convierte a cadena de caracteres

]
```

3.5. APLICACIÓN DE LA METAHEURÍSTICA TABÚ

Al aplicar la metaheurística Tabú, su objetivo es encontrar soluciones que se escapen de un espacio local para hallar en un espacio global, cuyas rutas están cercanas al óptimo.

Para este proyecto se realizó dos programaciones: uno de nodos locales y otro de nodos foráneos, que contienen 29 y 99 almacenes consecutivamente.

La programación del sistema propuesto para la empresa con la metaheurística Tabú, ha sido realizada por medio del software Wolfram Matemática con 5.000 iteraciones, el tiempo en entregar la solución es de 6 minuto, por medio de un ordenador Sony Vaio, Intel Inside, Core i3, disco duro de 80 GHZ.

```
iteracionesTabu = 1000;
matrizFrecuencias = {};
longFrecuencias = 10;
rutasBest = rutasTabu = rutas;
mejora = False;
    [falso

noMejora = 0;
reinicio = 3;
idRutaBest = idRuta;

Do[
    [repite
        If[ (noMejora == reinicio),
            [si
                noMejora = 0;
                rutasTabu = rutasBest];

Label["Inicio"];
    [etiqueta

rutasTabuTest = RandomChoice[rutasTabu];
    [elección aleatoria

posRuta = FirstPosition[rutasTabu, rutasTabuTest][[1]];
    [primera posición

c1 = RandomChoice[rutasTabuTest[[ ; -2]]];
    [elección aleatoria
```

```
rutasTabuTest2 = RandomChoice[{0.5, 0.5} → {RandomChoice[rutasTabu], rutasTabuTest}];
                |elección aleatoria      |elección aleatoria

posRuta2 = FirstPosition[rutasTabu, rutasTabuTest2][[1]];
                |primera posición

distanciaOrg = Total[Table[CalcularDistancias[rutasBest[[r]]], {r, Length[rutasBest]}]];
                |total |tabla |longitud

cand = Complement[rutasTabuTest2[[2 ;; -2]], {c1}];
                |complemento

noCand = DeleteCases[Flatten[Select[matrizFrecuencias, (#[[1]] == c1) ∨ (#[[2]] == c1) &]], Alternatives@@{c1, 1}];
                |elimina casos |aplana |selecciona |alternativas

cand = DeleteCases[cand, Alternatives@@noCand];
                |elimina casos |alternativas

If[Length[cand] == 0, Goto["Inicio"]];
|si |longitud |ve a

c2 = RandomChoice[Join[cand, {1}]];
                |elección aleatoria |junta

p1 = FirstPosition[rutasTabuTest, c1][[1]];
                |primera posición

p2 = FirstPosition[rutasTabuTest2, c2][[1]];
                |primera posición

rutasTabuOld = rutasTabu;
Which[ (posRuta == posRuta2),
|cuál

If[ (p1 == p2), Goto["Inicio"]];
|si |ve a

If[ (p2 < p1), {p1, p2} = {p2, p1}];

rutasTabuTest = Join[rutasTabuTest[[ ;; p1]], Reverse[rutasTabuTest[[p1 + 1 ;; p2]]], rutasTabuTest[[p2 + 1 ;;]];
                |junta |invierte orden

If[! TiempoRuta[rutasTabuTest], Continue[]];
|si |continúa iteración

rutasTabu[[posRuta]] = rutasTabuTest;
distanciaTest = Total[Table[CalcularDistancias[rutasTabu[[r]]], {r, Length[rutasTabu]}]];
                |total |tabla |longitud

If[ (distanciaTest < distanciaOrg),
|si
```

```
    rutasBest = rutasTabu;  
    noMejora = 0;  
    mejora = True,  
             |verdadero  
    noMejora++;  
]  
  
, (posRuta ≠ posRuta2),  
{rutasTabuTest, rutasTabuTest2} = {Join[rutasTabuTest[[ ; ; p1]], rutasTabuTest2[[p2 + 1 ; ; ]]],  
                                     |junta  
    Join[rutasTabuTest2[[ ; ; p2]], rutasTabuTest[[p1 + 1 ; ; ]]]};  
    |junta  
  
If[(CargaRuta[rutasTabuTest] > idRuta[[posRuta, 3]]) ∨ (CargaRuta[rutasTabuTest2] > idRuta[[posRuta2, 3]]),  
|si  
    {posRuta, posRuta2} = {posRuta2, posRuta};  
    If[(CargaRuta[rutasTabuTest] > idRuta[[posRuta, 3]]) ∨ (CargaRuta[rutasTabuTest2] > idRuta[[posRuta2, 3]]),  
|si  
        Continue[]  
        |continúa iteración  
];  
  
If[(! TiempoRuta[rutasTabuTest]) ∨ (! TiempoRuta[rutasTabuTest2]), Continue[]];  
|si |continúa iteración  
rutasTabu[[posRuta]] = rutasTabuTest;  
rutasTabu[[posRuta2]] = rutasTabuTest2;  
  
distanciaTest = Total[Table[CalcularDistancias[rutasTabu[[r]], {r, Length[rutasTabu]}]];  
|total |tabla |longitud  
  
If[((distanciaTest) < (distanciaOrg)) ∨  
|si  
    (((distanciaTest) < (distanciaOrg + 5)) ∧ ((Length[rutasTabuTest] == 2) ∨ (Length[rutasTabuTest2] == 2))),  
|longitud |longitud
```

```
    rutasBest = rutasTabu;  
    noMejora = 0;  
    mejora = True,  
            |verdadero  
    noMejora++;  
];  
];
```

```
AppendTo[matrizFrecuencias, {c1, c2}];  
|añade al final  
If[(Length[matrizFrecuencias] > longFrecuencias),  
|si |longitud  
    matrizFrecuencias = matrizFrecuencias[[2 ;;]]  
];  
  
, {ax, iteracionesTabu}];
```

```
idRutaBest = idRuta;  
For[i = 1, i ≤ Length[rutasBest],  
|para cada |longitud  
    If[Length[rutasBest[[i]]] ≤ 2,  
|si |longitud  
        minJ = minTotal = 0;  
        Do[  
|repite
```

```
If[(CargaRuta[rutasBest[[j]]] < idRutaBest[[i, 3]] < idRutaBest[[j, 3]]) ∧ (minTotal < idRutaBest[[j, 3]]),  
|si  
    minTotal = idRutaBest[[j, 3]];  
    minJ = j;  
    Break[];  
|finaliza iteración
```


CAPÍTULO 4

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. RESULTADOS DE LA HEURÍSTICA

Al aplicar la heurística de ahorro Clarke and Wright con todas las restricciones del sistema, se obtuvieron 20 rutas para los 98 nodos atendidos desde el CDD Gye, centro de distribución principal de la región costa, clasificando los nodos en locales y foráneos mediante el software Wolfram.

Se detallan a continuación las siguientes rutas:

- 6 rutas para los 29 nodos locales.
- 10 rutas para los 69 nodos foráneos

La tabla 4.1 muestra las soluciones de los 29 nodos locales.

Tabla 4.1 Solución de nodos locales con método Clarke and Wright

Ruta	Nodos de Visitas	Vehículo	m ³ cargados	Distancia	Tiempo total (horas)	Costo (dólar)
1	{1,5,7,9,4,11,1}	{1,294,18.612}	16,78	61,51	2:37	80
2	{1,10,27,26,2,8,6,3,2,8,1}	{2,384,18.4}	17,16	36,71	2:36	80
3	{1,17,18,15,24,13,14,16,1}	{3,308,18}	16,06	53,04	2:50	80
4	{1,29,30,12,22,25,1}	{4,183,13.20}	11,57	31,15	1:51	80
5	{1,21,23,1}	{5,67,5.94}	4,77	3,91	0:33	80
6	{1,19,1}	{6,363,11.34}	10,79	3,96	0:18	80
	Total			190,28		480

Fuente: Elaboración propia

La tabla 4.2 muestra las secuencias de los nodos en cada ruta establecida.

Tabla 4.2 Secuencia de los nodos locales con método Clarke and Wright

Ruta	Nodo	Almacén
1	1	CDD GYE
	5	TIENDA DURAN OUTLET 917
	7	TIENDA DURAN 1032
	9	TIENDA SATELITE EL RECREO DURAN 2025
	4	TIENDA DURAN 918
	11	TIENDA FLORIDA 967
	1	CDD GYE
2	1	CDD GYE
	10	TIENDA CITY MALL 1063
	27	TIENDA ALBORADA 924
	26	TIENDA MALL DEL SOL 923
	2	TIENDA 9 DE OCTUBRE 911
	8	TIENDA ESCOBEDO 1024
	6	TIENDA 9 DE OCTUBRE 1029
	3	TIENDA CENTENARIO 1022
	28	TIENDA PORTETE 936
	1	CDD GYE
3	1	CDD GYE
	17	TIENDA 38 Y PORTETE 937
	18	TIENDA MALL DEL SUR 921
	15	TIENDA RIOCENTRO SUR 1026
	24	TIENDA GUASMO 2805
	13	TIENDA ESCLUSAS 909
	14	TIENDA PEDREGAL 964
	16	TIENDA FORTIN 968
	1	CDD GYE
4	1	CDD GYE
	29	TIENDA RIOCENTRO EL DORADO 1059
	30	TIENDA RADIO EL DORADO 3601
	12	TIENDA PASCUALES 965
	22	TIENDA CALIFORNIA 1054
	25	TIENDA FLOR DE BASTION 2019
	1	CDD GYE
5	1	CDD GYE
	21	TIENDA ESPECIALIZADA CALIFORNIA 2048
	23	TIENDA CALIFORNIA 1025
	1	CDD GYE
6	1	CDD GYE
	19	TIENDA PARQUE CALIFORNIA 932
	1	CDD GYE

Fuente: Elaboración propia

Las figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6, muestran las rutas geográficamente de los nodos locales con la implementación de la heurística.

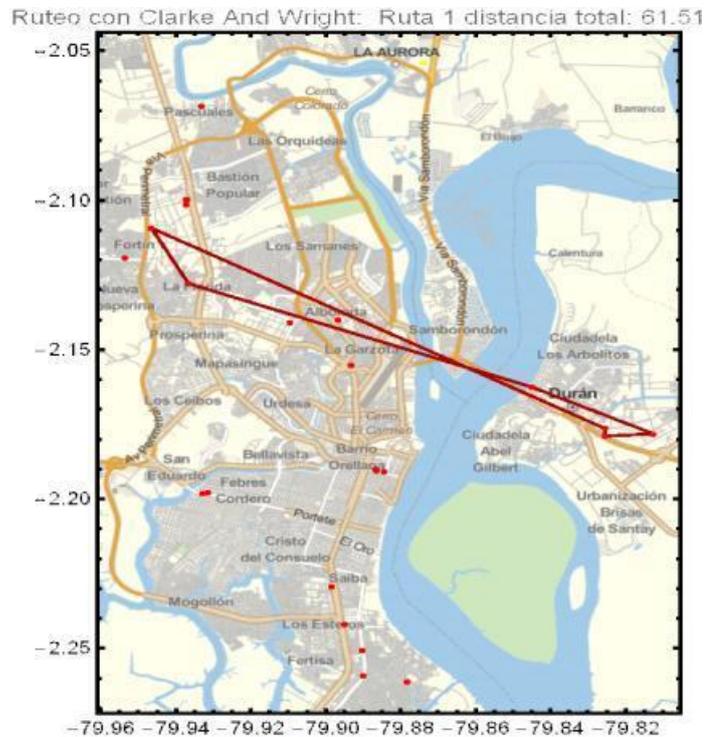


Figura 4.1 Ruta local 1
Fuente: Elaboración propia

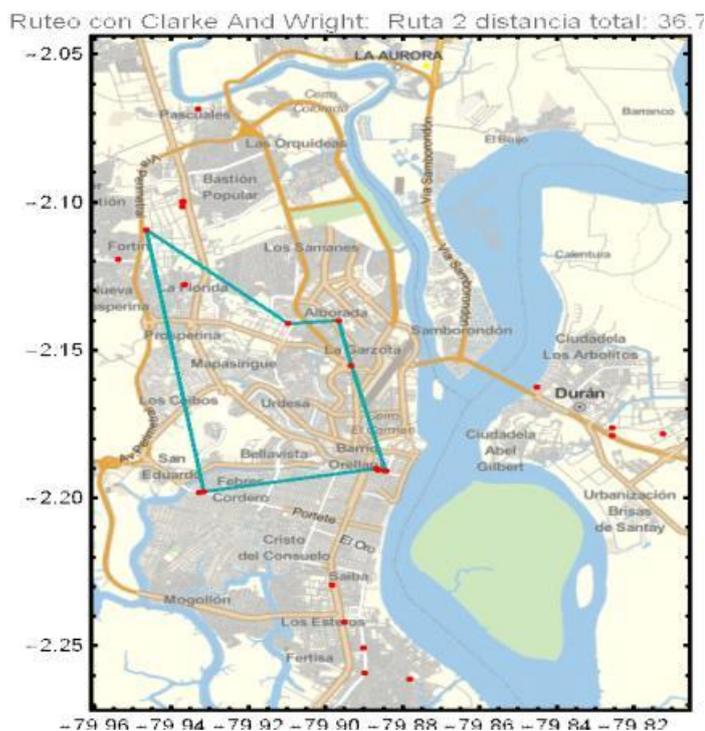


Figura 4.2 Ruta local 2
Fuente: Elaboración propia

Ruteo con Clarke And Wright: Ruta 3 distancia total: 53.03



Figura 4.3 Ruta local 3

Fuente: Elaboración propia

Ruteo con Clarke And Wright: Ruta 4 distancia total: 31.14



Figura 4.4 Ruta local 4

Fuente: Elaboración propia

La tabla 4.3 muestra las soluciones de las rutas obtenidas para los nodos foráneos con la heurística de Clarke and Wright, tales como: nodos en cada ruta, vehículo asignado, m³ cargados, distancia, tiempo total y los costos de cada ruta.

Tabla 4.3 Solución de nodos foráneos con método Clarke and Wright

Ruta	Nodos de visitas	Vehículo	m ³ cargados	Distancia	Tiempo total (horas)	Costos (dólar)
1	{1, 13, 12, 11, 8, 9, 10, 14, 36, 1}	{1,14.,22.3245}	18,22	807,493	11:43	230
2	{1, 40, 45, 38, 70, 43, 1}	{3,441.,20.8012}	17,07	420,569	6:00	230
3	{1, 58, 61, 68, 56, 57, 67, 65, 64, 66, 69, 54, 1}	{5,88.,34.7701}	31,01	658,672	11:08	320
4	{1, 59, 62, 55, 53, 1}	{6,4.,28.9363}	4,57	475,218	6:12	230
5	{1, 60, 63, 52, 1}	{7,1.,29.0998}	7,97	360,195	6:18	290
6	{1, 50, 49, 47, 51, 46, 48, 18, 21, 22, 20, 1}	{6,520.,39.37}	37,74	548,377	10:30	320
7	{1, 6, 3, 4, 5, 7, 2, 1}	{7,402.,85.26}	52,16	327,47	5:45	420
8	{1, 39, 37, 42, 41, 1}	{8,80.,16.2202}	14,03	442,325	7:18	230
9	{1, 35, 15, 32, 31, 17, 23, 16, 19, 24, 29, 26, 27, 28, 1}	{10,298.,44.2}	43,11	391,919	9:18	320
10	{1, 44, 25, 30, 33, 34, 1}	{10,12.,34.9905}	33,44	475,077	9:18	320
	Total			4.907,315		2910

Fuente: Elaboración propia

La tabla 4.4 detalla los nombres de los nodos que conforman cada una de las rutas obtenidas con en forma secuencial.

Tabla 4.4 Secuencia de nodos foráneos con método Clarke and Wright

Ruta	Nodo	Almacén	Ruta	Nodo	Almacén
1	1	CDD GYE	6	1	CDD GYE
	13	CUENCA 122		50	BALZAR 1039
	12	CUENCA 115		49	EMPALME 818
	11	CUENCA 111		47	MOCACHE 2034
	8	LOJA 725		51	CDD QUEVEDO 814
	9	LOJA 726		46	MANA 822
	10	LOJA 727		48	BUENA FE 817
	14	CATAMAYO 729		18	VENTANA 820
	36	PIÑA 730		21	RICAURTE 2045
	1	CDD GYE		22	CALUMA 2058
2	1	CDD GYE	20	MONTALVO 2040	
	40	MACHALA 711	1	CDD GYE	
	45	MACHALA 713	1	CDD GYE	
	38	PASAJE 718	6	LIBERTAD2801	
	70	GUABO 731	3	LIBERTAD 940	
	43	CAMILO PONCE 124	4	LIBERTAD 2108	
	1	CDD GYE	5	LIBERTAD 2625	
3	1	CDD GYE	7	SANTA ELENA 1002	
	58	PORTOVIEJO 1327	2	PLAYA 945	
	61	PORTOVIEJO 1319	1	CDD GYE	
	68	FLAVIO ALFARO 2064	1	CDD GYE	
	56	CHONE1322	39	MACHALA 719	
	57	BAHIA 1320	37	SANTA ROSA 717	
	67	MANTA 1342	42	NARANJAL 716	
	65	MANTA 1324	41	TRONCAL 970	
	64	MANTA 1328	1	CDD GYE	
	66	MANTA 1315	1	CDD GYE	
	69	MANTA 1313	35	SAMBORONDON 1085	
	54	MONTECRISTY 1341	15	SALITRE 1061	
	1	CDD GYE	32	VINCES 827	
4	1	CDD GYE	31	VINCES 816	
	59	PORTOVIEJO 1318	17	BABA 1048	
	62	PORTOVIEJO 1323	23	BABAHOYO 1058	
	55	JIPIJAPA 1335	16	SAN JUAN 824	
	53	PUERTO LOPEZ 1337	19	BABAHOYO 960	
	1	CDD GYE	24	BABAHOYO 1033	
5	1	CDD GYE	29	SIMON BOLIVAR 2048	
	60	PORTOVIEJO 1311	26	BUCAY 1046	
	63	PORTOVIEJO 1339	27	NARANJITO 1042	
	52	PEDRO CARBO 1038	28	MILAGRO 1055	
	1	CDD GYE	1	CDD GYE	
10	1	CDD GYE	33	DAULE 938	
	44	MACHALA 714	34	DAULE 1057	
	25	CDD MILAGRO 955	1	CDD GYE	
	30	MILAGRO 1045			

Fuente: Elaboración propia

Las figuras 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16, muestran las rutas geográficamente de los nodos foráneos.

con Clarke And Wright: Ruta 1 distancia total: 807.4

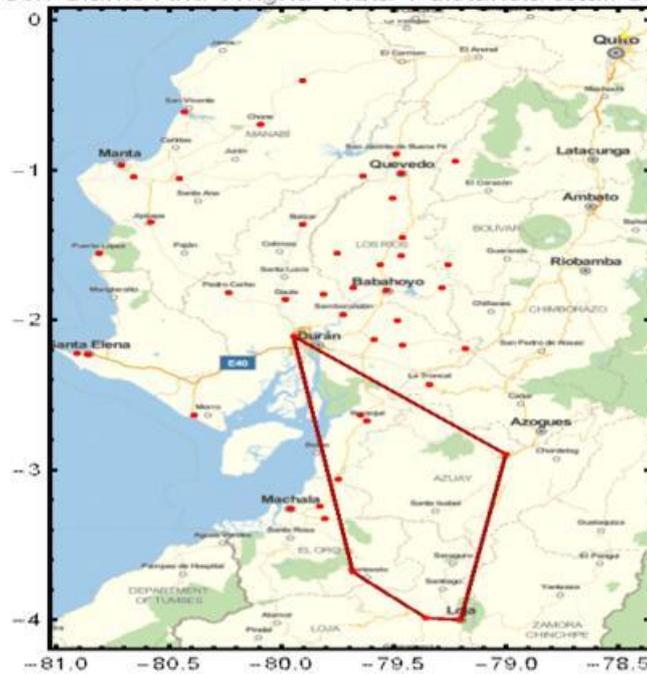


Figura 4.7 Ruta foránea 1

Fuente: Elaboración propia

con Clarke And Wright: Ruta 2 distancia total: 420.5

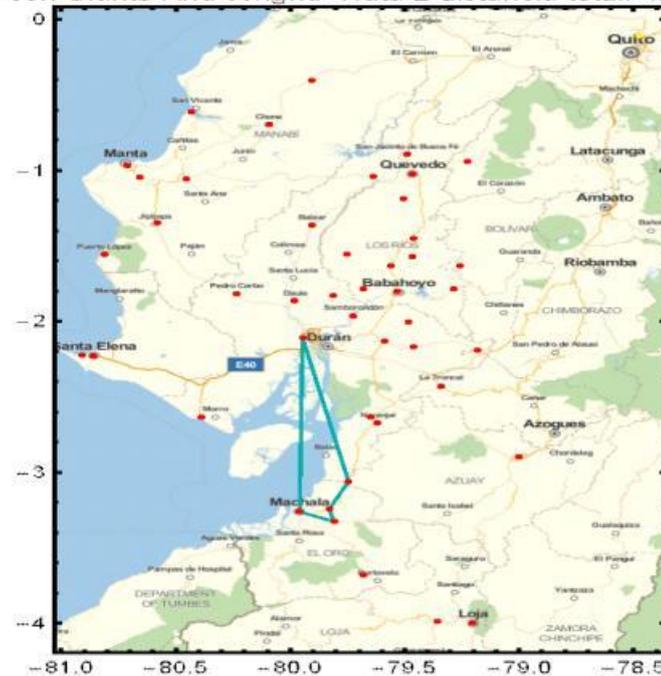


Figura 4.8 Ruta foránea 2

Fuente: Elaboración propia

con Clarke And Wright: Ruta 3 distancia total: 658.1

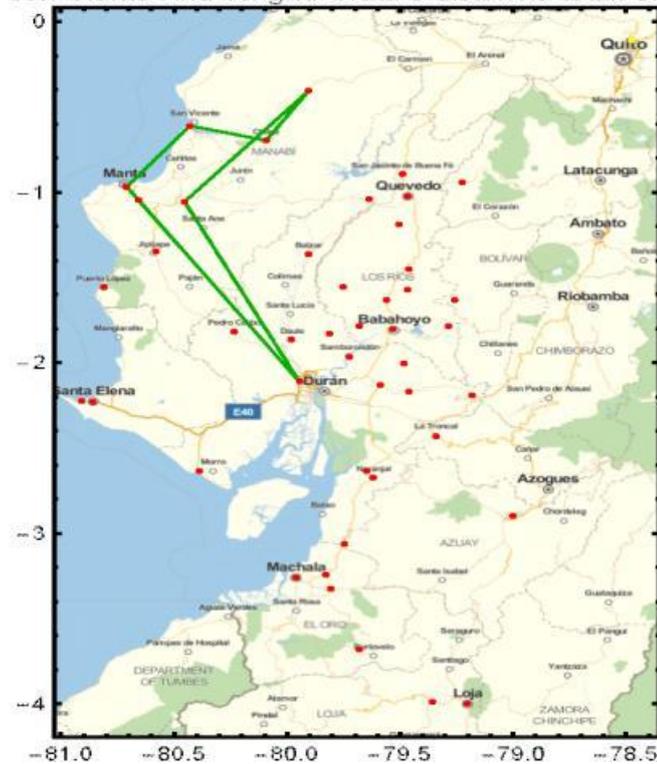


Figura 4.9 Ruta foránea 3

Fuente: Elaboración propia

con Clarke And Wright: Ruta 4 distancia total: 475.2

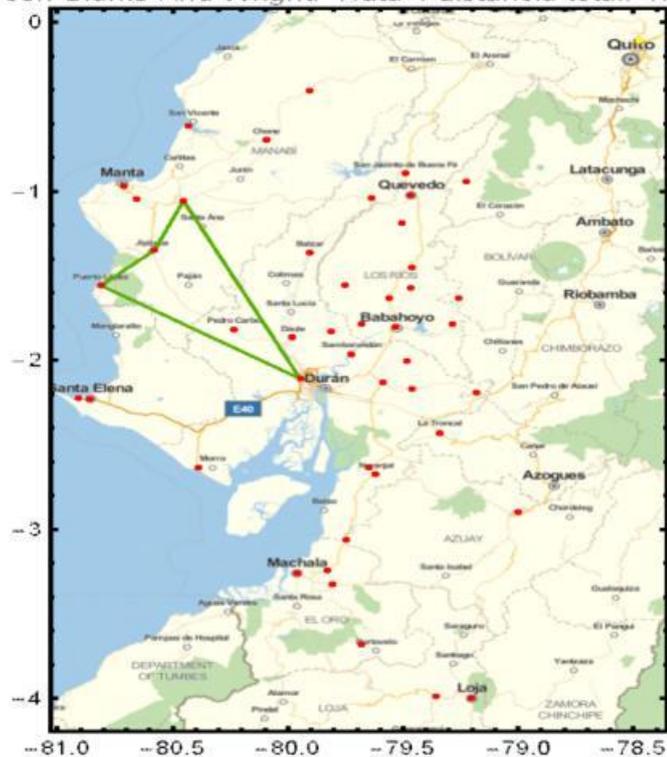


Figura 4.10 Ruta foránea 4

Fuente: Elaboración propia

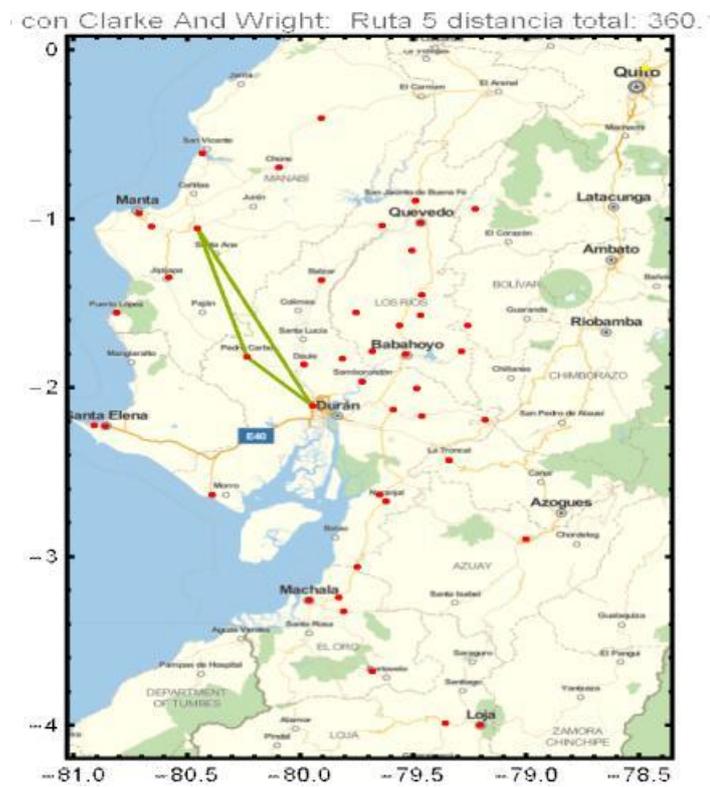


Figura 4.11 Ruta foránea 5

Fuente: Elaboración propia

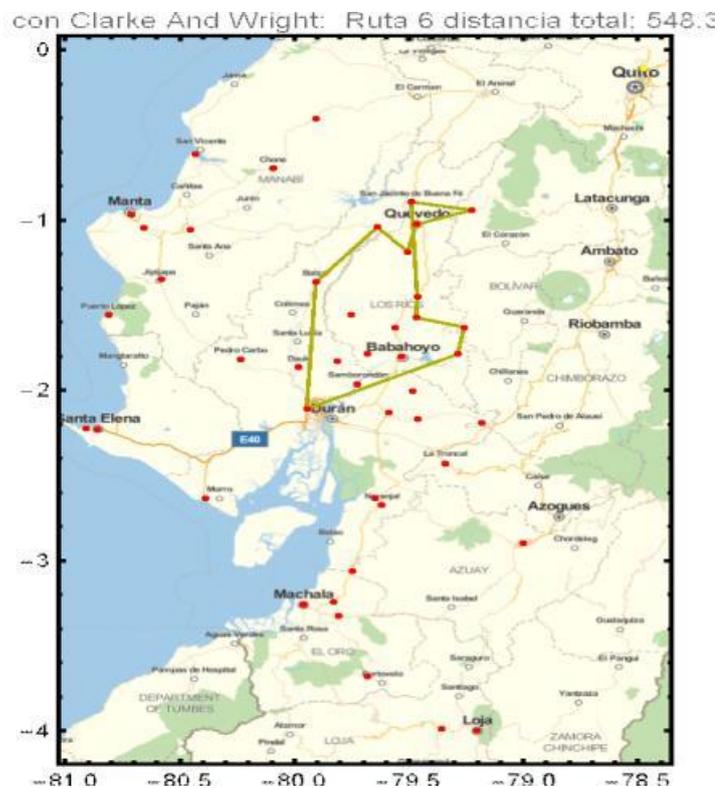


Figura 4.12 Ruta foránea 6

Fuente: Elaboración propia

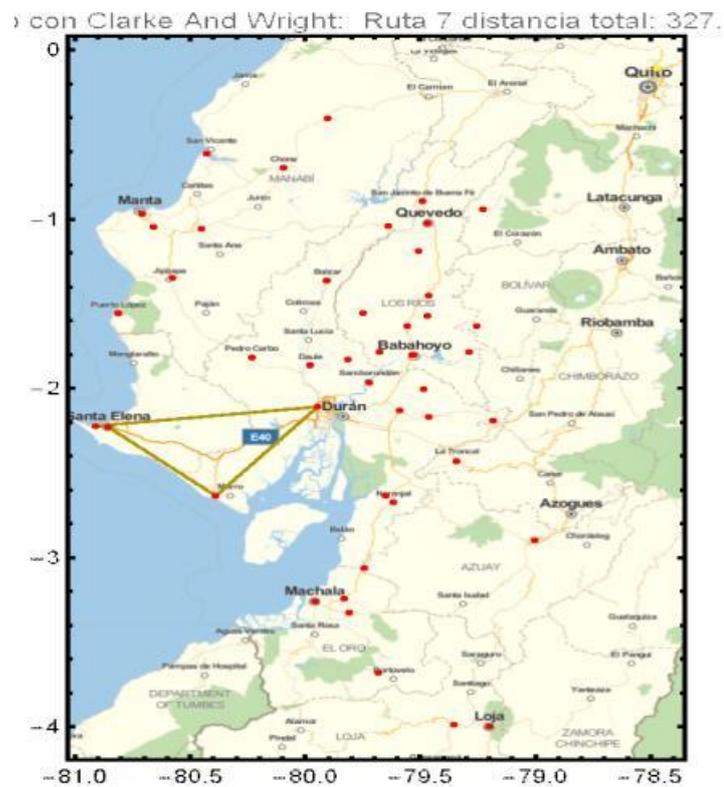


Figura 4.13 Ruta foránea 7

Fuente: Elaboración propia

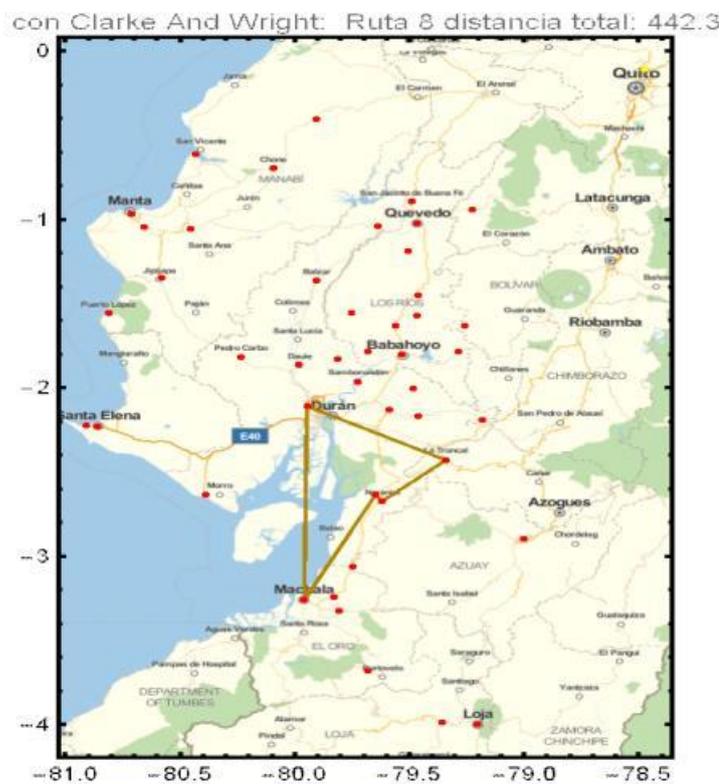


Figura 4.14 Ruta foránea 8

Fuente: Elaboración propia

con Clarke And Wright: Ruta 9 distancia total: 391.5

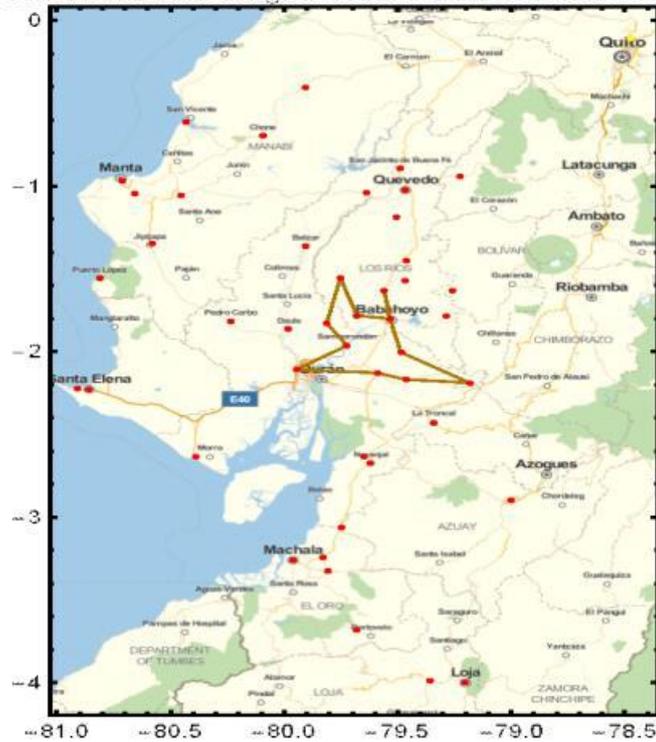


Figura 4.15 Ruta foránea 9

Fuente: Elaboración propia

con Clarke And Wright: Ruta 10 distancia total: 475.0



Figura 4.16 Ruta foránea 10

Fuente: Elaboración propia

4.2. RESULTADOS DE LA METAHEURÍSTICA

Al aplicar la metaheurística con el algoritmo Tabú considerando todas las restricciones del problema, se obtuvo los resultados encontrando mejoras en la solución como son los tiempos, distancias y m³ cargados a cada vehículo asignado, los costos no cambian por ser fijos.

La tabla 4.5 muestra las soluciones de las rutas obtenidas para los nodos locales con la metaheurística propuesta, tales como: nodos en cada ruta, vehículo, m³ cargados, distancia, tiempo total y los costos de cada ruta.

Tabla 4.5 Solución de nodos locales con algoritmo Tabú

Ruta	Secuencias de visitas	Vehículo	m ³ cargados	Distancia	Tiempo total (horas)	Costos (dólar)
1	{1,9,7,5,4,11,16,1}	{1, 294,18.61}	18,70	67,31	2:59	80
2	{1,10,27,26,2,8,6,3,28,1}	{2,384,18.4}	17,16	36,71	2:33	80
3	{1,17,18,15,24,13,14,1}	{3, 308,18}	14,14	51,07	2:31	80
4	{1,29,30,12,22,25,1}	{4,183,13.2}	11,57	31,15	1:51	80
5	{1,21,23,1}	{5,67,5.94}	4,77	3,91	0:33	80
6	{1,19,1}	{6,363,11.34}	10,79	3,96	0:18	80
	Total			194,11		480

Fuente: Elaboración propia

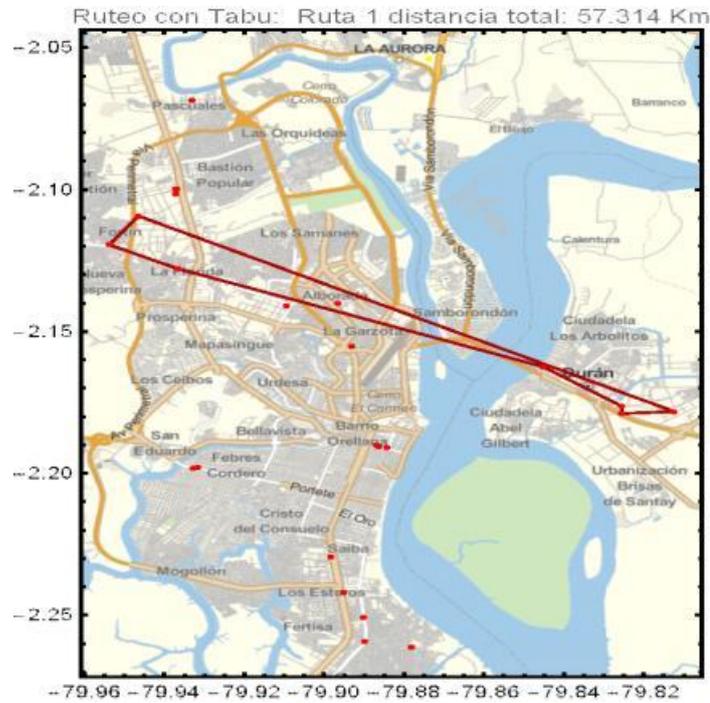
La tabla 4.6 muestra los nombres y las secuencias de todos los nodos que conforman las rutas locales, de acuerdo a la solución geográfica obtenida por el algoritmo Tabú.

Tabla 4.6 Secuencias de los nodos locales con algoritmo Tabú

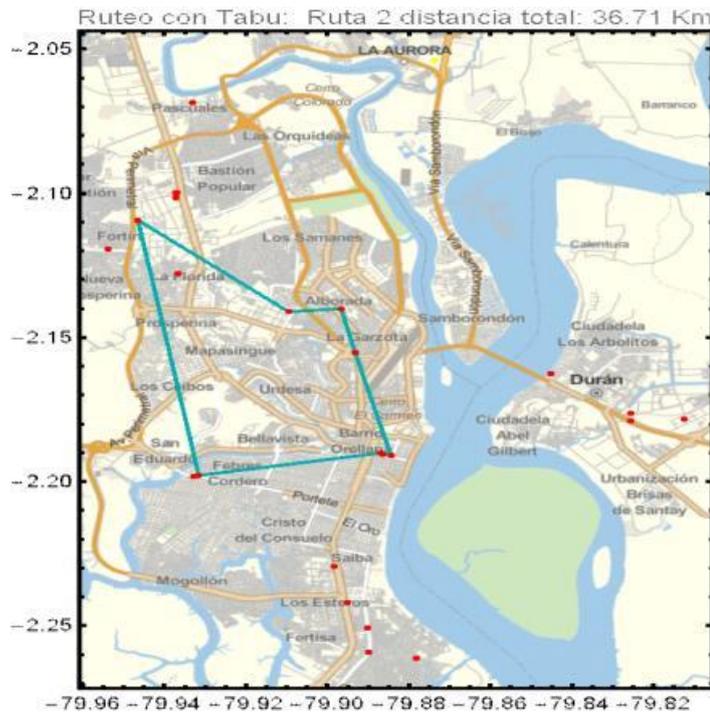
Ruta	Nodo	Almacén
1	1	CDD GYE
	9	TIENDA SATELITE EL RECREO DURAN 2025
	7	TIENDA DURAN 1032
	5	TIENDA DURAN OUTLET 917
	4	TIENDA DURAN 918
	11	TIENDA FLORIDA 967
	16	TIENDA FORTIN 968
	1	CDD GYE
2	1	CDD GYE
	10	TIENDA CITY MALL 1063
	27	TIENDA ALBORADA 924
	26	TIENDA MALL DEL SOL 923
	2	TIENDA 9 DE OCTUBRE 911
	8	TIENDA ESCOBEDO 1024
	6	TIENDA 9 DE OCTUBRE 1029
	3	TIENDA CENTENARIO 1022
	28	TIENDA PORTETE 936
	1	CDD GYE
3	1	CDD GYE
	17	TIENDA 38 Y PORTETE 937
	18	TIENDA MALL DEL SUR 921
	15	TIENDA RIOCENTRO SUR 1026
	24	TIENDA GUASMO 2805
	13	TIENDA ESCLUSAS 909
	14	TIENDA PEDREGAL 964
	1	CDD GYE
4	1	CDD GYE
	29	TIENDA RIOCENTRO EL DORADO 1059
	30	TIENDA RADIO EL DORADO 3601
	12	TIENDA PASCUALES 965
	22	TIENDA CALIFORNIA 1054
	25	TIENDA FLOR DE BASTION 2019
	1	CDD GYE
5	1	CDD GYE
	21	TIENDA ESPECIALIZADA CALIFORNIA 2048
	23	TIENDA CALIFORNIA 1025
	1	CDD GYE
6	1	CDD GYE
	19	TIENDA PARQUE CALIFORNIA 932
	1	CDD GYE

Fuente: Elaboración propia

Las figuras 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21 y 4.22 muestran geográficamente las rutas de los nodos locales con la implementación de la metaheurística.



Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

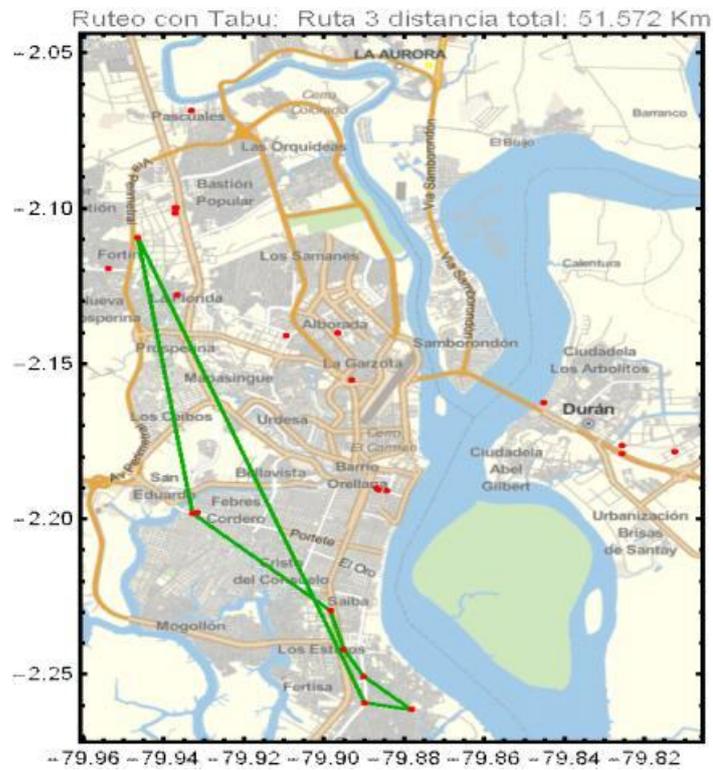


Figura 4.19 Ruta local 3

Fuente: Elaboración propia

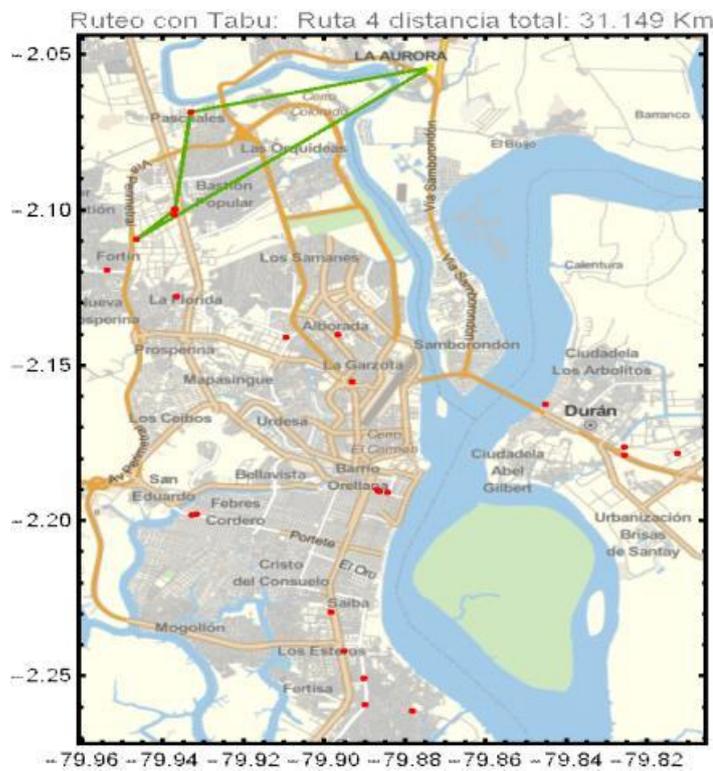


Figura 4.20 Ruta local 4

Fuente: Elaboración propia



Figura 4.21 Ruta local 5

Fuente: Elaboración propia



Figura 4.22 Ruta local 6

Fuente: Elaboración propia

La tabla 4.7 muestra las soluciones de las rutas obtenidas para los nodos foráneos con la metaheurística propuesta, tales como: nodos en cada ruta, vehículo asignado, m³ cargados, distancia, tiempo total y los costos de cada ruta.

Tabla 4.7 Solución de nodos foráneos con algoritmo Tabú

Ruta	Nodos de visitas	Vehículo	m ³ cargados	Distancia	Tiempo total (horas)	Costos (dólar)
1	{1, 13, 12, 11, 8, 9, 10, 14, 36, 1}	{1,14.,22.3245}	18,22	807,493	11:43	230
2	{1, 40, 45, 38, 70, 43, 1}	{3,441.,20.8012}	17,07	420,569	6:00	230
3	{1, 58, 61, 68, 56, 57, 67, 65, 64, 66, 69, 54, 1}	{5,88.,34.7701}	31,01	658,672	11:08	320
4	{1, 59, 62, 55, 53, 33, 34, 1}	{6,4.,28.9363}	16,84	487,479	9:45	230
5	{1, 60, 63, 52, 1}	{7,1.,29.0998}	7,97	360,195	6:18	290
6	{1, 20, 22, 21, 18, 47, 48, 46, 51, 49, 50, 1}	{6,520.,39.37}	37,74	531,403	10:14	320
7	{1, 6, 3, 4, 5, 7, 2, 1}	{7,402.,85.26}	52,16	327,47	5:45	420
8	{1, 39, 37, 42, 41, 1}	{8,80.,16.2202}	14,03	442,325	7:18	230
9	{1, 35, 15, 17, 31, 32, 16, 19, 23, 24, 29, 26, 27, 28, 1}	{10,298.,44.2}	43,11	361,006	8:40	320
10	{1, 44, 25, 30, 1}	{10,12.,34.9905}	21,17	420,354	7:18	320
	Total			4.816,966		2910

Fuente: Elaboración propia

La tabla 4.8 muestra los nombres y las secuencias de todos los nodos que conforman las rutas foráneas, de acuerdo a la solución geográfica obtenida por el algoritmo Tabú.

Tabla 4.8 Secuencia de nodos foráneos con algoritmo Tabú

Ruta	Nodo	Almacén	Ruta	Nodo	Almacén
1	1	CDD GYE	6	1	CDD GYE
	13	CUENCA 122		20	MONTALVO 2040
	12	CUENCA 115		22	CALUMA 2058
	11	CUENCA 111		21	RICAURTE 2045
	8	LOJA 725		18	VENTANA 820
	9	LOJA 726		47	MOCACHE 2034
	10	LOJA 727		48	BUENA FE 817
	14	CATAMAYO 729		46	MANA 822
	36	PIÑA 730		51	CDD QUEVEDO 814
2	1	CDD GYE	7	49	EMPALME 818
	40	MACHALA 711		50	BALZAR 1039
	45	MACHALA 713		1	CDD GYE
	38	PASAJE 718		1	CDD GYE
	70	GUABO 731		6	LIBERTAD2801
	43	CAMILO PONCE 124		3	LIBERTAD 940
	1	CDD GYE		4	LIBERTAD 2108
3	1	CDD GYE	8	5	LIBERTAD 2625
	58	PORTOVIEJO 1327		7	SANTA ELENA 1002
	61	PORTOVIEJO 1319		2	PLAYA 945
	68	FLAVIO ALFARO 2064		1	CDD GYE
	56	CHONE1322		1	CDD GYE
	57	BAHIA 1320		39	MACHALA 719
	67	MANTA 1342		37	SANTA ROSA 717
	65	MANTA 1324		42	NARANJAL 716
	64	MANTA 1328		41	TRONCAL 970
	66	MANTA 1315		1	CDD GYE
	69	MANTA 1313		1	CDD GYE
4	54	MONTECRISTY 1341	9	35	SAMBORONDON 1085
	1	CDD GYE		15	SALITRE 1061
	1	CDD GYE		17	BABA 1048
	59	PORTOVIEJO 1318		31	VINCES 816
	62	PORTOVIEJO 1323		32	VINCES 827
	55	JIPIJAPA 1335		16	SAN JUAN 824
	53	PUERTO LOPEZ 1337		19	BABAHOYO 960
	33	DAULE 938		23	BABAHOYO 1058
5	34	DAULE 1057	10	24	BABAHOYO 1033
	1	CDD GYE		29	SIMON BOLIVAR 2048
	1	CDD GYE		26	BUCAY 1046
	60	PORTOVIEJO 1311		27	NARANJITO 1042
	63	PORTOVIEJO 1339		28	MILAGRO 1055
	52	PEDRO CARBO 1038		1	CDD GYE
	1	CDD GYE		1	CDD GYE
				30	MILAGRO 1045
				25	CDD MILAGRO 955
				44	MACHALA 714
				1	CDD GYE

Fuente: Elaboración propia

Las figuras 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28, 4.29, 4.30, 4.31 y 4.32 muestran geográficamente las rutas de los nodos foráneos con la metaheurística.

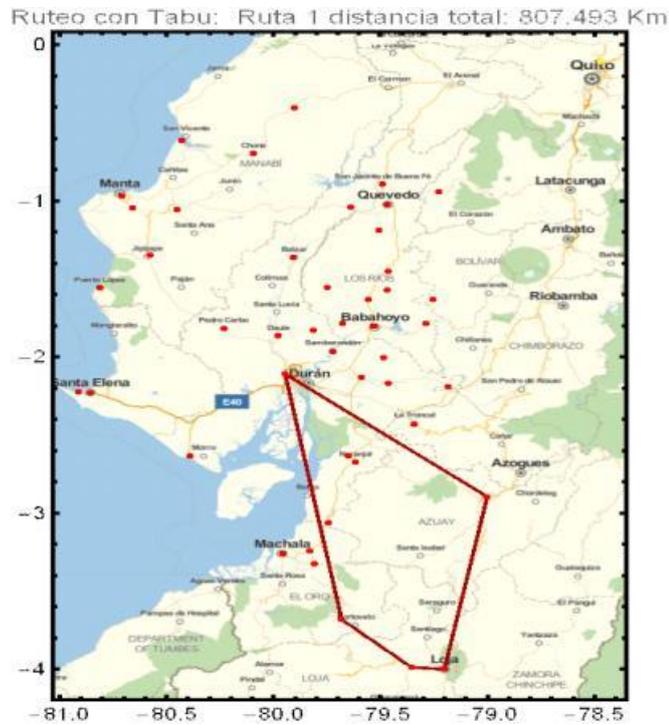


Figura 4.23 Ruta foránea 1

Fuente: Elaboración propia

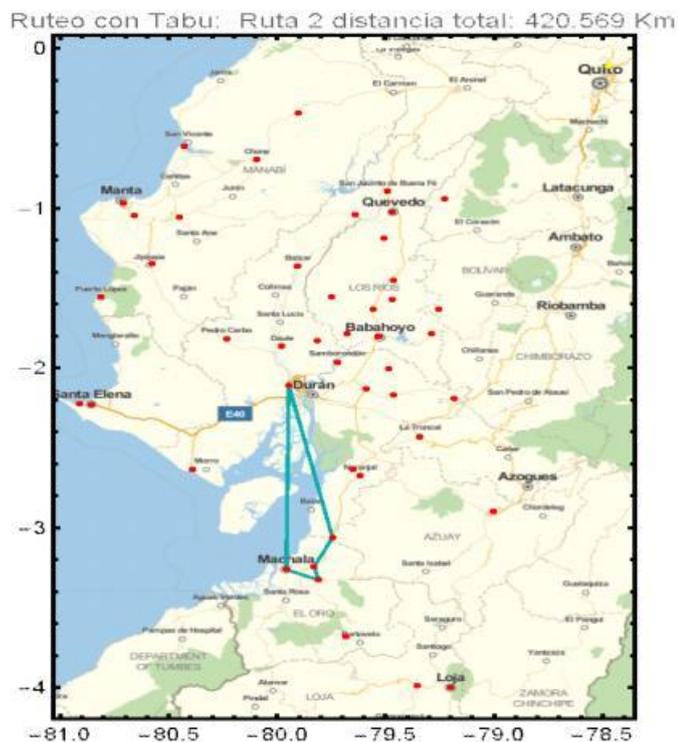


Figura 4.24 Ruta foránea 2

Fuente: Elaboración propia

Ruteo con Tabu: Ruta 3 distancia total: 658.672 Km

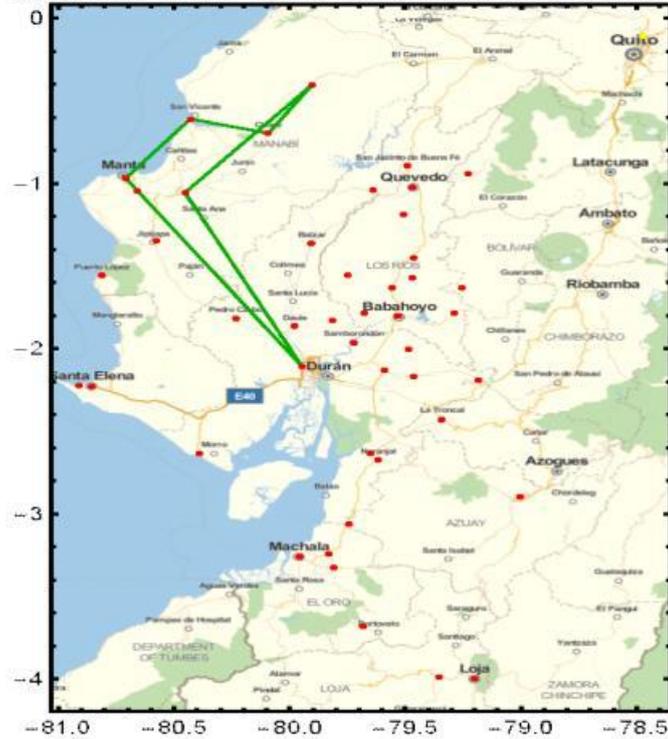


Figura 4.25 Ruta foránea 3

Fuente: Elaboración propia

Ruteo con Tabu: Ruta 4 distancia total: 487.479 Km

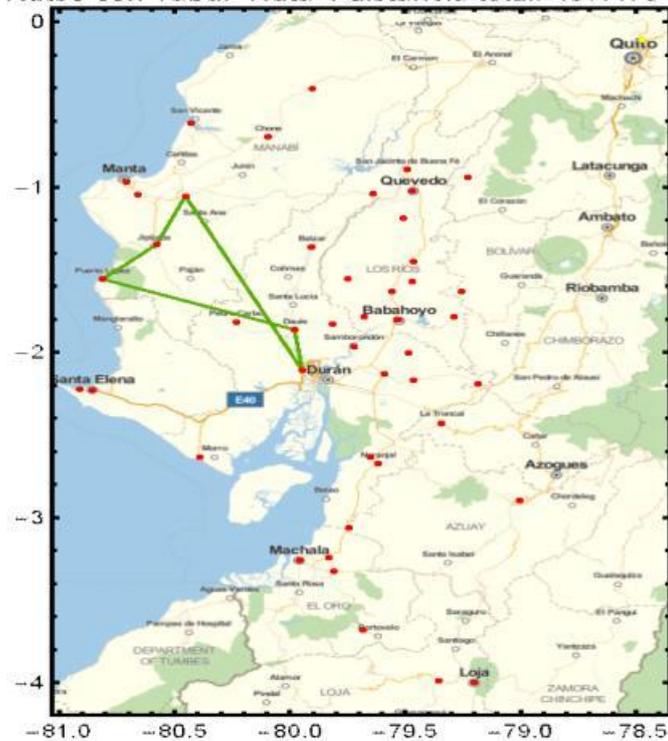


Figura 4.26 Ruta foránea 4

Fuente: Elaboración propia

Ruteo con Tabu: Ruta 5 distancia total: 360.195 Km

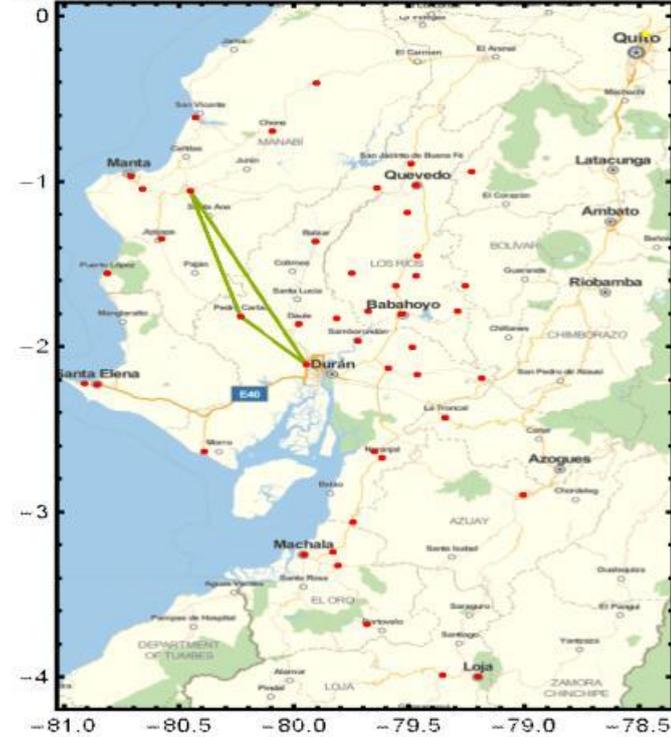


Figura 4.27 Ruta foránea 5

Fuente: Elaboración propia

Ruteo con Tabu: Ruta 6 distancia total: 533.443 Km

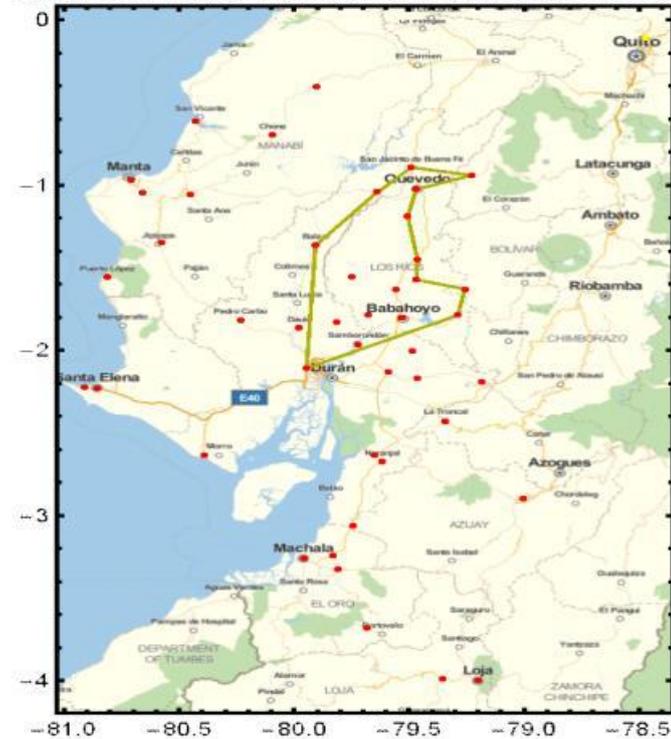


Figura 4.28 Ruta foránea 6

Fuente: Elaboración propia

Ruteo con Tabu: Ruta 7 distancia total: 327.47 Km

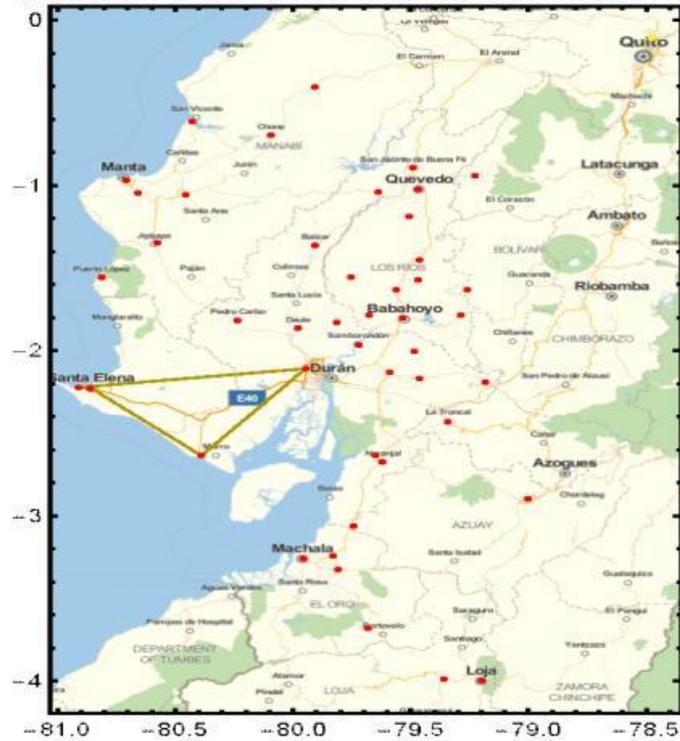


Figura 4.29 Ruta foránea 7

Fuente: Elaboración propia

Ruteo con Tabu: Ruta 8 distancia total: 442.325 Km

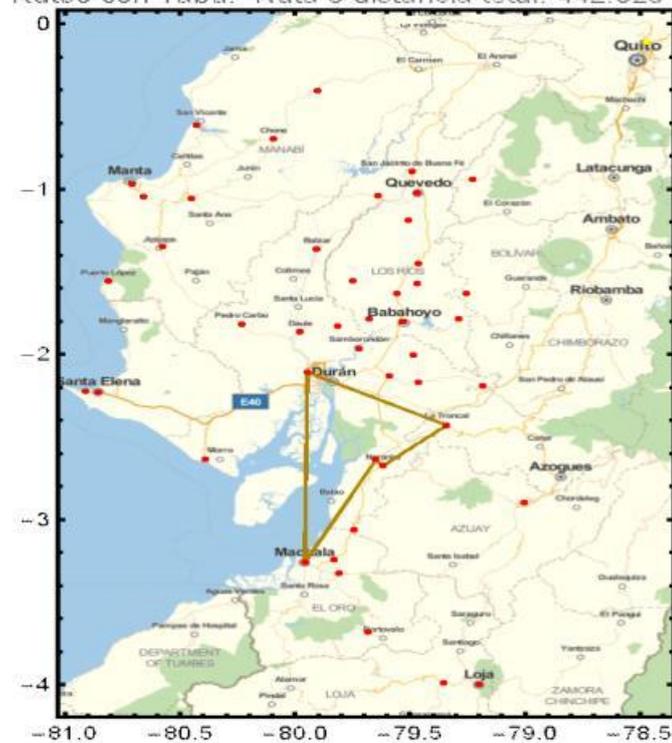


Figura 4.30 Ruta foránea 8

Fuente: Elaboración propia

Ruteo con Tabu: Ruta 9 distancia total: 361.93 Km

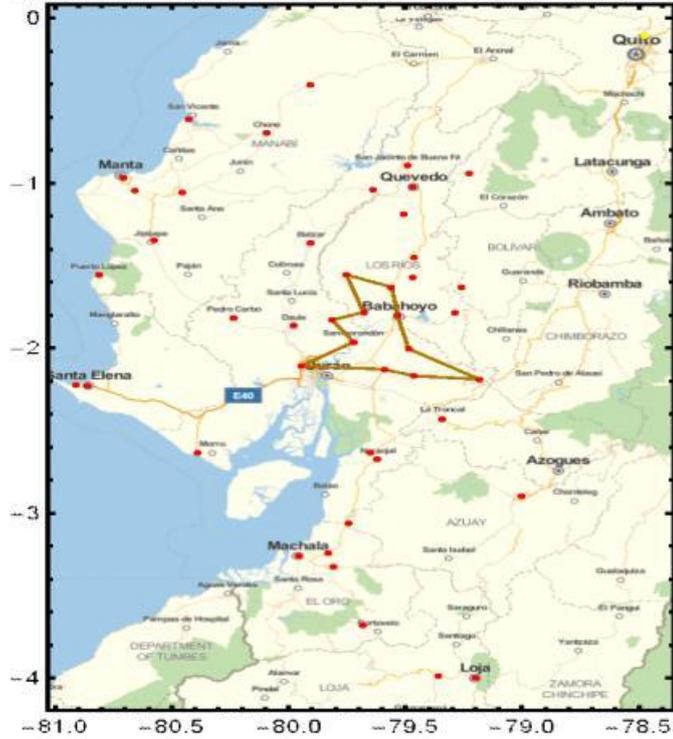


Figura 4.31 Ruta foránea 9

Fuente: Elaboración propia

Ruteo con Tabu: Ruta 10 distancia total: 420.354 Km

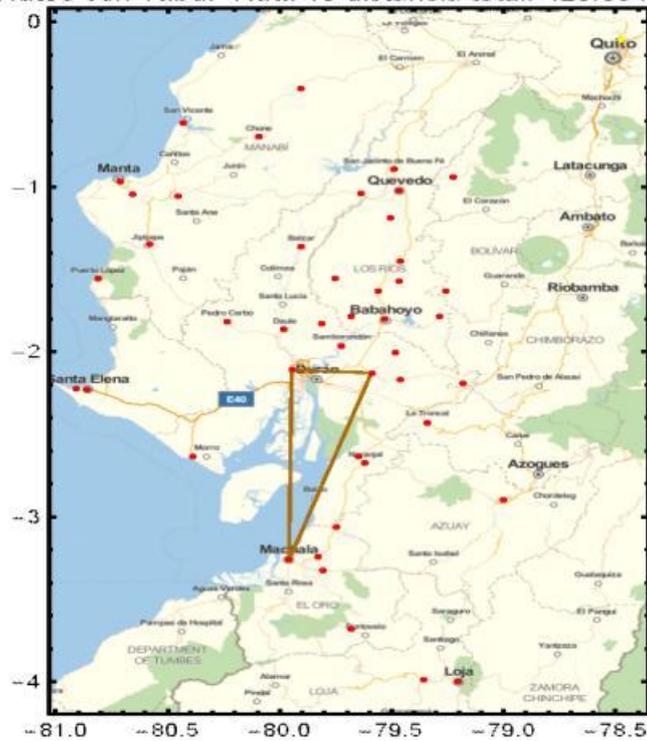


Figura 4.32 Ruta foránea 10

Fuente: Elaboración propia

4.3. ESTUDIO COMPARATIVO: SITUACIÓN ACTUAL Y MODELO PROPUESTO

En la implementación de la heurística con el método de Clarke and Wright se puede evidenciar que los resultados son muy buenos, cuyas soluciones son mejoradas con la implementación del algoritmo Tabú, encontrando rutas óptimas que satisfacen las restricciones del sistema de distribución y de los almacenes.

Cabe mencionar que, en la programación de los almacenes locales, el nodo 20 no se ve reflejado en la solución, el sistema no lo consideró por no tener un vehículo con las dimensiones necesarias para la transportación de la mercadería demandada.

La solución para atender al nodo 20, es esperar que retorne el vehículo código 294 de la ruta # 1 para satisfacer la demanda del almacén.

4.4. COSTO DE TRANSPORTE

La empresa tiene dos operadores logísticos cuyos costos son fijos para cada ruta solicitada según la demanda de los almacenes tanto para las rutas locales como para las rutas foráneas.

El gasto de transporte del nodo 20 (ruta local), no se considera por ser flota contratada con costos fijos diarios.

Los gastos de transporte serán multiplicados de la siguiente forma:

- Nodos locales por 24 veces al mes
- Nodos foráneos por 8 veces al mes

La tabla 4.9 muestra la comparación de los resultados obtenidos del sistema propuesto con el sistema actual que lleva la empresa.

Tabla 4.9 Comparación de modelos

	Sistema actual	Clarke & Wright	Tabú	Ahorro	
Rutas	Costos de las rutas en dólares	Costos de las rutas en dólares	Costos de las rutas en dólares	Mensual	Anual
Locales	17.969,00	11.520,00	11520,00	6.449,00	77,388,00
Foráneas	28.493,00	23.280,00	23280,00	5.213,00	62,565,00
Totales	46.462,00	34.800,00	34800,00	11.662,00	139,953,00

Fuente: Elaboración propia

Realizando pruebas del modelo presentado y comparando resultados, se ha podido observar que el nuevo sistema ha considerado un número menor de vehículos, disminuyendo así, en un 30% los vehículos que fueron utilizados para la respectiva distribución; de tal manera, que el ahorro principal en el modelo HFFCVRPTW se encuentra en la disminución de los vehículos utilizados de la flota heterogénea.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

En el proyecto de titulación se propuso realizar mejoras en el ruteo de una empresa de electrodomésticos con las restricciones del sistema de ventanas de tiempo utilizando una flota heterogénea, siendo su modelo el HFFCVRPTW resuelto por la heurística Clarke and Wright y mejorado por la metaheurística Tabú.

En la resolución del sistema se tuvo que realizar dos implementaciones del modelo matemático, uno para los nodos locales y otro para los nodos foráneos para obtener rutas óptimas en cuanto a la realidad de la empresa. Se realizó 50 corridas con un promedio de 6 minutos cada una en obtener los resultados, cambiando el número de rutas y de costos.

Es importante indicar que la heurística de Clarke and Wright busca la solución en un espacio limitado dando rutas muy buenas para la solución del problema dado, pero la metaheurística Tabú encontró dentro de las rutas secuencias de los nodos mucho más óptimas, reduciendo los kilómetros de recorrido, utilizando de forma eficiente la capacidad de cada vehículo, mejorando los tiempos de llegada en cada visita y este a su vez incrementando el nivel de servicio.

Los resultados referentes al costo son iguales en Clarke & Wright y el algoritmo Tabú por tener el mismo número de rutas y vehículos, pero a la vez costos bastantes diferenciados con el sistema actual de la empresa.

Realizando las respectivas comparaciones con el modelo de ruteo que lleva la empresa, se observan ahorros muy significativos anualmente, aumentando en forma considerable la rentabilidad y eficiencia en cuanto a la forma de distribución si se aplicará el nuevo modelo.

5.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda aplicar herramientas adecuadas como son las heurísticas y las metaheurísticas para las empresas que requieran obtener mejores resultados en KPI referentes a costos, tiempos y números de vehículos.

Se recomienda que las empresas que hagan uso de una logística, tengan profesionales con experiencias y conocimientos de sistemas actuales para que puedan desarrollar e implementar mejoras en la forma de producción, almacenamiento y distribución para luego mejorar los rendimientos y aportar al margen de la compañía de acuerdo a los objetivos planteados.

Se recomienda cambiar la forma de pago por medio del volumen (m^3), realizando un Joint Venture (alianzas estratégicas) entre empresa y operador logístico para realizar acuerdo en los precios como las empresas de mayor escala económica.

Para futuros casos de estudios, se recomienda que se realice el modelo HFFCVRPTW incluyendo la logística inversa y los recojos en cada nodo, siendo este un picking & delivery, aplicando la heurística de Clarke & Wright con la metaheurística de búsqueda Tabú con más de 200 nodos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Morán Villa, C. (2012). *Implementación de un problema de ruteo vehicular con ventanas de tiempo (Vrptw)*. Guayaquil - Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- [2] Rodríguez Ortiz, C. (2010). *Algoritmos heurísticos y metaheurísticos para el problema de localización de regeneradores*. Madrid - España: Universidad Rey Juan Carlos.
- [3] Tomalá Robles, J., & Pincay Villa, J. (2010). *Diseño de un sistema de soporte de decisiones para resolver el problema de ruteo en un servicio de courier*. Guayaquil - Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- [4] Teixeira Gomez, R. (2002). *Heurística para el problema de dimensiones y rocización de una flota heterogénea utilizando el algoritmo Out-of-Kilter*. Sao Paulo - Brasil: Escuela Politécnica de la Universidad de Sao Paulo.
- [5] Laporte, G., Ola, J., Tolga, B., & Cagri, K. (2015). *Thirty years of heterogeneous vehicle routing* Southampton Business School and Centre for Operational Research, Management Science and Information Systems (CORMSIS). Southampton - United Kingdom: University of Southampton .
- [6] Alvarez, R. (2017). *Propuesta de solución al problema de ruteo de vehículos en el operador logístico OPFERAR S.A para el transporte de distribución de productos alimenticios secos del grupo Nutresa. S.A.* Bogota - Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- [7] Osman, I., & Kelly, J. (1996). *Metaheuristics: Theory & Applications*. Kluwer Academic Publishers.

- [8] Maguiña, A. (2016). *Implantación de VRP - Solver aplicando la heurística de Clarke & Wright para el ruteo del transporte terrestre en el area de distribución caso de estudio: industrias alimentarias*. Lima - Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- [9] Bodas Lopez, R. (2017). *La metaheurística de búsqueda Tabú aplicada al problema de enrutamiento de vehículo*. Valladolid - España: Universidad de Valladolid.
- [10] Mungwattana, A., Soompracha, K., & Manisri, T. (2016). *A Practical Case Study of a Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem With Various Constraints*. Thailand: Kasetsart University Bangkok.
- [11] Baldacci, R., Battarra, M., & Vigo, D. (2008). *Routing a Heterogeneous Fleet of Vehicle*. New York: In B. L. Golden, S. Raghavan, E. A. Wasl, Eds. *The Vehicle Routing Problem: Latest Advanced and New Challenges*. (pp. 1-25).
- [12] Golden, B., Assad, S., Levy, L., & Gheysens, F. (1984). *The Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem*. *Computers & Operations Reserch*, 11819, 49-66.
- [13] Sarmiento, L. (2014). *Estudio del problema de ruteo de vehículos con balance de carga: Aplicación de la metaheurística Búsqueda Tabú*. Chía .- Colombia: Universidad de la Sabana.
- [14] Chilibingua, E. (2017). *Optimización de las rutas de reparto para una empresa distribuidora de productos ferreteros* . Guayaquil - Ecuador: Escuela Politécnica del Litoral.
- [15] Moreno Perez, J. (2004). *Metaheurísticas, conceptos y propiedades* . Laguna - España: Universidad de la Laguna.
- [16] Rodriguez, P. (2008). *Metaheurísticas y optimización combinatoria en redes de computadoras*. Rennes - Francia: Universidad de Rennes.

- [17] Olivera, A. (2004). *Heurísticas para problemas de ruteo de vehículos*. Montevideo - Uruguay: Universidad de la República.
- [18] Anónimo. (2017). *Análisis y diseño de algoritmos - Algoritmo Greedy*. Granada - España: Universidad de Granada.
- [19] Riojas Cañari, A. (2005). *Busqueda Tabú: conceptos, algoritmo y aplicación al problema de las N-reinas*. Lima - Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- [20] Sandoya Sanchez, F. (2015). *Metaheurística y Redes Neuronales*. Guayaquil - Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- [21] Rosales Bello, J. (2005). *Planificación operacional de la capacidad en sistemas logísticos con restricciones de tiempo. Aplicación de la metaheurística Grasp*. Sevilla - España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros.
- [22] Iñaki, I., Larrañaga, P., & Moujahid, A. (s.f.). *Algoritmos genéticos*. Euskal - España: Universidad del país Vasco.
- [23] Escobar, J. (2012). *Un algoritmo metaheurístico basado en recocido simulado con espacio de búsqueda granular para el problema de localización y ruteo con restricciones de capacidad*. Medellín - Colombia: Universidad de Medellín.
- [24] Brandao, J., & Eglese, R. (2008). *Un algoritmo de búsqueda Tabú para el problema capacitado de ruteo de arco*.

ANEXOS

ANEXO A. MATRIZ DE LATITUDES Y LONGITUDES

Almacén	Nombre	Latitud (y)	Longitud (x)
0	CDD GYE	-2,1088550	-79,9465150
1	PLAYA 945	-2,6349220	-80,3885400
2	LIBERTAD 940	-2,2221230	-80,9087820
3	LIBERTAD 2108	-2,2221230	-80,9087820
4	LIBERTAD 2625	-2,2221230	-80,9087820
5	LIBERTAD2801	-2,2221230	-80,9087820
6	SANTA ELENA 1002	-2,2263340	-80,8583720
7	LOJA 725	-3,9968470	-79,2023970
8	LOJA 726	-3,9987880	-79,2020980
9	LOJA 727	-3,9987880	-79,2020980
10	CUENCA 111	-2,8946660	-79,0018810
11	CUENCA 115	-2,8946660	-79,0018810
12	CUENCA 122	-2,8946660	-79,0018810
13	CATAMAYO 729	3,9850850	-79,3568150
14	SALITRE 1061	-1,8295830	-79,8125430
15	SAN JUAN 824	-1,6299960	-79,5597190
16	BABA 1048	-1,7827300	-79,6794650
17	VENTANA 820	-1,4485170	-79,4640680
18	BABAHOYO 960	-1,7994260	-79,5318080
19	MONTALVO 2040	-1,7879480	-79,2881270
20	RICAURTE 2045	-1,5728230	-79,4680110
21	CALUMA 2058	1,6297620	-79,2586440
22	BABAHOYO 1058	-1,8010120	-79,5345850
23	BABAHOYO 1033	-1,8010120	-79,5345850
24	CDD MILAGRO 955	-2,1279980	-79,5900980
25	BUCAY 1046	-2,1878450	-79,1842520
26	NARANJITO 1042	-2,1687130	-79,4630590
27	MILAGRO 1055	-2,1279980	-79,5900980
28	SIMON BOLIVAR 2048	-2,0041070	-79,4861310
29	MILAGRO 1045	-2,1279980	-79,5900980
30	VINCES 816	-1,5556220	-79,7520010
31	VINCES 827	-1,5556220	-79,7520010
32	DAULE 938	-1,8631300	-79,9802270
33	DAULE 1057	-1,8631300	-79,9802270
34	SAMBORONDON 1085	-1,9633650	-79,7226670
35	PIÑA 730	-3,6807990	-79,6818220
36	SANTA ROSA 717	-2,6367000	-79,6480280
37	PASAJE 718	-3,3259540	-79,8081170
38	MACHALA 719	-3,2602110	-79,9583920

Anexo A. Matriz de latitudes y longitudes (continuación)

Almacén	Nombre	Latitud (y)	Longitud (x)
39	MACHALA 711	-3,2602110	-79,9583920
40	TRONCAL 970	-2,4293790	-79,3413140
41	NARANJAL 716	-2,6750990	-79,6192980
42	CAMILO PONCE 124	-3,0611240	-79,7450300
43	MACHALA 714	-3,2602110	-79,9583920
44	MACHALA 713	-3,2602110	-79,9583920
45	MANA 822	-0,9414530	-79,2280720
46	MOCACHE 2034	-1,1853800	-79,5066460
47	BUENA FE 817	-0,8930720	-79,4897730
48	EMPALME 818	-1,0414150	-79,6374610
49	BALZAR 1039	-1,3650910	-79,9069080
50	CDD QUEVEDO 814	-1,0257580	-79,4672610
51	PEDRO CARBO 1038	-1,8161560	-80,2341610
52	PUERTO LOPEZ 1337	-1,5577720	-80,8101240
53	MONTECRISTY 1341	-1,0442220	-80,6583410
54	JIPIJAPA 1335	-1,3481230	-80,5781240
55	CHONE1322	-0,6962680	-80,0919660
56	BAHIA 1320	-0,6100620	-80,4296260
57	PORTOVIEJO 1327	-1,0554620	-80,4531080
58	PORTOVIEJO 1318	-1,0554620	-80,4531080
59	PORTOVIEJO 1311	-1,0554620	-80,4531080
60	PORTOVIEJO 1319	-1,0554620	-80,4531080
61	PORTOVIEJO 1323	-1,0554620	-80,4531080
62	PORTOVIEJO 1339	-1,0554620	-80,4531080
63	MANTA 1328	-0,9679830	-80,7085740
64	MANTA 1324	-0,9679830	-80,7085740
65	MANTA 1315	-0,9679830	-80,7085740
66	MANTA 1342	-0,9679830	-80,7085740
67	FLAVIO ALFARO 2064	-0,4057740	-79,9050270
68	MANTA 1313	-0,9679830	-80,7085740
69	GUABO 731	-3,2437090	-79,8303070
70	TIENDA RADIO EL DORADO 3601	-2,0536580	-79,8738280
71	TIENDA 9 DE OCTUBRE 911	-2,1903180	-79,8844570
72	TIENDA CENTENARIO 1022	-2,1895690	-79,8868400
73	TIENDA DURAN 918	-2,1619850	-79,8451150
74	TIENDA DURAN OUTLET 917	-2,1758560	-79,8255180
75	TIENDA 9 DE OCTUBRE 1029	-2,1900420	-79,8864730
76	TIENDA DURAN 1032	-2,1784170	-79,8255130
77	TIENDA ESCOBEDO 1024	-2,1902760	-79,8843500
78	TIENDA EL RECREO DURAN 2025	-2,1776920	-79,8124530
79	TIENDA CITY MALL 1063	-2,1405970	-79,9096060
80	TIENDA FLORIDA 967	-2,1274010	-79,9366560

Anexo A. Matriz de latitudes y longitudes (continuación)

Almacén	Nombre	Latitud (y)	Longitud (x)
81	TIENDA PASCUALES 965	-2,0680490	-79,9331780
82	TIENDA ESCLUSAS 909	-2,2608550	-79,8782010
83	TIENDA PEDREGAL 964	-2,2585340	-79,8899240
84	TIENDA RIOCENTRO SUR 1026	-2,2413990	-79,8950730
85	TIENDA FORTIN 968	-2,1189880	-79,9537930
86	TIENDA 38 Y PORTETE 937	-2,1976360	-79,9328570
87	TIENDA MALL DEL SUR 921	-2,2289840	-79,8984490
88	TIENDA PARQUE CALIFORNIA 932	-2,0992850	-79,9369720
89	TIENDA 3S 1086	-2,0994650	-79,9368590
90	TIENDA ESPECIALIZADA 2048	-2,0993580	-79,9371920
91	TIENDA CALIFORNIA 1054	-2,0992930	-79,9369670
92	TIENDA CALIFORNIA 1025	-2,1011480	-79,9371700
93	TIENDA GUASMO 2805	-2,2500680	-79,8901450
94	TIENDA FLOR DE BASTION 2019	-2,0992850	-79,9369720
95	TIENDA MALL DEL SOL 923	-2,1548260	-79,8932410
96	TIENDA ALBORADA 924	-2,1395500	-79,8966670
97	TIENDA PORTETE 936	-2,1973350	-79,9315710
98	TIENDA RIOCENTRO EL DORADO 1059	-2,0536580	-79,8738280

Fuente: Elaboración propia

ANEXO B. MATRIZ DE DISTANCIA Y TIEMPO DE RECORRIDOS

Almacén	Desde	Hacia	Distancia (km)	Duración (h)
0	CDD GYE	CDD GYE	0,00	0:00:00
1	CDD GYE	PLAYA 945	94,01	1:41:00
2	CDD GYE	LIBERTAD 940	136,46	1:53:00
3	CDD GYE	LIBERTAD 2108	136,46	1:53:00
4	CDD GYE	LIBERTAD 2625	136,46	1:53:00
5	CDD GYE	LIBERTAD2801	136,46	1:53:00
6	CDD GYE	SANTA ELENA 1002	129,88	1:41:00
7	CDD GYE	LOJA 725	412,85	5:03:00
8	CDD GYE	LOJA 726	413,07	5:04:00
9	CDD GYE	LOJA 727	413,07	5:04:00
10	CDD GYE	CUENCA 111	210,65	2:45:00
11	CDD GYE	CUENCA 115	210,65	2:45:00
12	CDD GYE	CUENCA 122	210,65	2:45:00
13	CDD GYE	CATAMAYO 729	374,21	4:30:00
14	CDD GYE	SALITRE 1061	55,91	0:56:00
15	CDD GYE	SAN JUAN 824	107,22	1:29:00
16	CDD GYE	BABA 1048	82,98	1:41:00
17	CDD GYE	VENTANA 820	134,64	1:53:00
18	CDD GYE	BABAHOYO 960	85,56	1:16:00
19	CDD GYE	MONTALVO 2040	119,91	1:59:00

Anexo B. Matriz de distancia y tiempo de recorridos (continuación)

Almacén	Desde	Hacia	Distancia (km)	Duración (h)
20	CDD GYE	RICAURTE 2045	125,86	1:49:00
21	CDD GYE	CALUMA 2058	152,09	2:27:00
22	CDD GYE	BABAHOYO 1058	85,09	1:15:00
23	CDD GYE	BABAHOYO 1033	85,09	1:15:00
24	CDD GYE	CDD MILAGRO 955	58,72	0:58:00
25	CDD GYE	BUCAY 1046	123,24	1:39:00
26	CDD GYE	NARANJITO 1042	77,90	1:26:00
27	CDD GYE	MILAGRO 1055	58,72	0:58:00
28	CDD GYE	SIMON BOLIVAR 2048	82,84	1:24:00
29	CDD GYE	MILAGRO 1045	58,72	0:58:00
30	CDD GYE	VINCES 816	93,55	1:31:00
31	CDD GYE	VINCES 827	93,55	1:31:00
32	CDD GYE	DAULE 938	33,87	0:32:00
33	CDD GYE	DAULE 1057	33,87	0:32:00
34	CDD GYE	SAMBORONDON 1085	36,75	0:48:00
35	CDD GYE	PIÑA 730	274,12	3:40:00
36	CDD GYE	SANTA ROSA 717	111,71	1:29:00
37	CDD GYE	PASAJE 718	201,86	2:33:00
38	CDD GYE	MACHALA 719	197,16	2:30:00
39	CDD GYE	MACHALA 711	197,16	2:30:00
40	CDD GYE	TRONCAL 970	93,68	1:13:00
41	CDD GYE	NARANJAL 716	106,30	1:20:00
42	CDD GYE	CAMILO PONCE 124	155,19	1:53:00
43	CDD GYE	MACHALA 714	197,16	2:30:00
44	CDD GYE	MACHALA 713	197,16	2:30:00
45	CDD GYE	MANA 822	202,75	2:41:00
46	CDD GYE	MOCACHE 2034	177,95	2:31:00
47	CDD GYE	BUENA FE 817	185,94	2:29:00
48	CDD GYE	EMPALME 818	146,39	1:57:00
49	CDD GYE	BALZAR 1039	94,05	1:17:00
50	CDD GYE	CDD QUEVEDO 814	170,87	2:17:00
51	CDD GYE	PEDRO CARBO 1038	56,51	0:47:00
52	CDD GYE	PUERTO LOPEZ 1337	187,13	2:25:00
53	CDD GYE	MONTECRISTY 1341	171,78	2:17:00
54	CDD GYE	JIPIJAPA 1335	131,00	1:42:00
55	CDD GYE	CHONE1322	250,43	3:21:00
56	CDD GYE	BAHIA 1320	247,18	3:35:00
57	CDD GYE	PORTOVIEJO 1327	179,87	2:25:00
58	CDD GYE	PORTOVIEJO 1318	179,87	2:25:00
59	CDD GYE	PORTOVIEJO 1311	179,87	2:25:00
60	CDD GYE	PORTOVIEJO 1319	179,87	2:25:00

Anexo B. Matriz de distancia y tiempo de recorridos (continuación)

Almacén	Desde	Hacia	Distancia (km)	Duración (h)
61	CDD GYE	PORTOVIEJO 1323	179,87	2:25:00
62	CDD GYE	PORTOVIEJO 1339	179,87	2:25:00
63	CDD GYE	MANTA 1328	182,43	2:33:00
64	CDD GYE	MANTA 1324	182,43	2:33:00
65	CDD GYE	MANTA 1315	182,43	2:33:00
66	CDD GYE	MANTA 1342	182,43	2:33:00
67	CDD GYE	FLAVIO ALFARO 2064	298,87	3:54:00
68	CDD GYE	MANTA 1313	182,43	2:33:00
69	CDD GYE	GUABO 731	179,36	2:12:00
70	CDD GYE	TIENDA RADIO EL DORADO 3601	15,84	0:16:00
71	CDD GYE	TIENDA 9 DE OCTUBRE 911	24,30	0:24:00
72	CDD GYE	TIENDA CENTENARIO 1022	24,02	0:23:00
73	CDD GYE	TIENDA DURAN 918	24,31	0:24:00
74	CDD GYE	TIENDA DURAN OUTLET 917	26,31	0:26:00
75	CDD GYE	TIENDA 9 DE OCTUBRE 1029	24,13	0:24:00
76	CDD GYE	TIENDA DURAN 1032	30,99	0:28:00
77	CDD GYE	TIENDA ESCOBEDO 1024	24,31	0:24:00
78	CDD GYE	TIENDA EL RECREO DURAN 2025	30,26	0:32:00
79	CDD GYE	TIENDA CITY MALL 1063	7,08	0:18:00
80	CDD GYE	TIENDA FLORIDA 967	3,19	0:08:00
81	CDD GYE	TIENDA PASCUALES 965	6,56	0:10:00
82	CDD GYE	TIENDA ESCLUSAS 909	25,69	0:40:00
83	CDD GYE	TIENDA PEDREGAL 964	24,31	0:37:00
84	CDD GYE	TIENDA RIOCENTRO SUR 1026	22,66	0:33:00
85	CDD GYE	TIENDA FORTIN 968	2,58	0:06:00
86	CDD GYE	TIENDA 38 Y PORTETE 937	13,93	0:18:00
87	CDD GYE	TIENDA MALL DEL SUR 921	20,94	0:29:00
88	CDD GYE	TIENDA CALIFORNIA 932	1,97	0:04:00
89	CDD GYE	TIENDA 3S 1086	1,97	0:04:00
90	CDD GYE	TIENDA ESPECIALIZADA 2048	1,94	0:04:00
91	CDD GYE	TIENDA CALIFORNIA 1054	1,97	0:04:00
92	CDD GYE	TIENDA CALIFORNIA 1025	1,89	0:04:00
93	CDD GYE	TIENDA GUASMO 2805	23,58	0:35:00
94	CDD GYE	TIENDA FLOR DE BASTION 2019	1,97	0:04:00
95	CDD GYE	TIENDA MALL DEL SOL 923	19,45	0:18:00
96	CDD GYE	TIENDA ALBORADA 924	17,75	0:18:00
97	CDD GYE	TIENDA PORTETE 936	14,16	0:19:00
98	CDD GYE	TIENDA RIOCENTRO EL DORADO 1059	15,84	0:16:00

Fuente: Elaboración propia

ANEXO C. MATRIZ DE M3 POR RUTAS ATENDIDAS POR EL CDD GYE

N°	RUTA	EMISOR	m³
1	BABA	TIENDA BABAHOYO 960	29,14
2	BABA	TIENDA BABAHOYO 1033	44,43
3	BABA	TIENDA SATELITE BABA 1048	13,52
4	BABA	TIENDA SATELITE CALUMA 2058	10,45
5	BABA	TIENDA SATELITE MONTALVO 2040	18,54
6	BABA	TIENDA SATELITE RICAURTE 2045	26,64
7	BABA	TIENDA SATELITE SALITRE 1061	16,50
8	BABA	TIENDA SATELITE SAN JUAN 824	13,80
9	BABA	TIENDA BABAHOYO 1058	24,10
10	BABA	TIENDA VENTANAS 820	22,14
11	CUENCA	TIENDA CATAMAYO 729	10,90
12	CUENCA	TIENDA CUENCA 111	33,14
13	CUENCA	TIENDA CUENCA 122	12,31
14	CUENCA	TIENDA CUENCA LAMAR 115	22,40
15	CUENCA	TIENDA LOJA 725	25,49
16	CUENCA	TIENDA LOJA 726	18,85
17	CUENCA	TIENDA LOJA 727	15,15
18	EL ORO	TIENDA MACHALA 719	60,15
19	EL ORO	TIENDA MACHALA 711	28,39
20	EL ORO	TIENDA MACHALA 713	51,96
21	EL ORO	TIENDA MACHALA 714	8,56
22	EL ORO	TIENDA NARANJAL 716	27,19
23	EL ORO	TIENDA PASAJE 718	15,05
24	EL ORO	TIENDA SANTA ROSA 717	14,61
25	EL ORO	TIENDA SATELITE CAMILO PONCE 124	9,26
26	EL ORO	TIENDA SATELITE GUABO 731	15,01
27	EL ORO	TIENDA SATELITE PINAS 730	3,48
28	EL ORO	TIENDA TRONCAL 970	6,31
29	GUAYAQUIL	TIENDA 38 Y PORTETE 937	18,83
30	GUAYAQUIL	TIENDA 9 DE OCTUBRE 911	91,27
31	GUAYAQUIL	TIENDA 3S 1086	27,58
32	GUAYAQUIL	TIENDA ALBORADA 924	15,82
33	GUAYAQUIL	TIENDA 9 DE OCTUBRE 1029	46,60
34	GUAYAQUIL	TIENDA CALIFORNIA 1025	51,79
35	GUAYAQUIL	TIENDA DURAN 1032	51,69
36	GUAYAQUIL	TIENDA CENTENARIO 1022	13,60
37	GUAYAQUIL	TIENDA CITY MALL 1063	19,75
38	GUAYAQUIL	TIENDA DURAN 918	9,51
39	GUAYAQUIL	TIENDA DURAN OUTLET 917	28,65
40	GUAYAQUIL	TIENDA ESCLUSAS 909	11,43
41	GUAYAQUIL	TIENDA ESCOBEDO 1024	12,21
42	GUAYAQUIL	TIENDA ESPECIALIZADA 2048	13,71
43	GUAYAQUIL	TIENDA FLOR DE BASTION 2019	7,32
44	GUAYAQUIL	TIENDA FLORIDA 967	27,67
45	GUAYAQUIL	TIENDA FORTIN 968	1,92
46	GUAYAQUIL	TIENDA MALL DEL SOL 923	29,52
47	GUAYAQUIL	TIENDA MALL DEL SUR 921	63,10

Anexo C. Matriz de M3 de las rutas atendidas por el CDD GYE (continuación)

N°	RUTA	EMISOR	m³
48	GUAYAQUIL	TIENDA PARQUE CALIFORNIA 932	140,30
49	GUAYAQUIL	TIENDA PASCUALES 965	20,83
50	GUAYAQUIL	TIENDA PEDREGAL 964	11,06
51	GUAYAQUIL	TIENDA PORTETE 936	52,28
52	GUAYAQUIL	TIENDA RADIO EL DORADO 3601	2,23
53	GUAYAQUIL	TIENDA RIOCENTRO EL DORADO 1059	31,54
54	GUAYAQUIL	TIENDA RIOCENTRO SUR 1026	17,55
55	GUAYAQUIL	TIENDA EL RECREO DURAN 2025	3,36
56	GUAYAQUIL	TIENDA CALIFORNIA 1054	4,96
57	GUAYAQUIL	TIENDA GUASMO 2805	13,12
58	MANABI	TIENDA BAHIA DE CARAQUEZ 1320	9,21
59	MANABI	TIENDA MANTA 1328	55,86
60	MANABI	TIENDA PORTOVIEJO 1327	17,45
61	MANABI	TIENDA CHONE 1322	24,69
62	MANABI	TIENDA MANTA 1313	70,15
63	MANABI	TIENDA PORTOVIEJO 1311	19,78
64	MANABI	TIENDA PORTOVIEJO 1318	2,19
65	MANABI	TIENDA PORTOVIEJO 1319	7,59
66	MANABI	TIENDA PORTOVIEJO 1323	12,96
67	MANABI	TIENDA SATELITE JIPIJAPA 1335	5,16
68	MANABI	TIENDA SATELITE MONTECRISTI 1341	9,16
69	MANABI	TIENDA SATELITE PEDRO CARBO 1038	3,82
70	MANABI	TIENDA SATELITE PUERTO LOPEZ 1337	15,38
71	MANABI	TIENDA MANTA 1342	29,11
72	MANABI	TIENDA PORTOVIEJO 1339	35,22
73	MILAGRO	BODEGA 955 MILAGRO	135,84
74	MILAGRO	TIENDA MILAGRO 1045	21,07
75	MILAGRO	TIENDA SATELITE BUCAY 1046	6,73
76	MILAGRO	TIENDA SATELITE FLAVIO ALFARO 2064	10,99
77	MILAGRO	TIENDA SATELITE NARANJITO 1042	12,57
78	MILAGRO	TIENDA SATELITE SIMON BOLIVAR 2046	6,70
79	MILAGRO	TIENDA MILAGRO 1055	48,56
80	MANA	TIENDA SATELITE MANA 822	21,49
81	MANA	TIENDA SATELITE MOCACHE 2034	15,56
82	PENINSULA	TIENDA LIBERTAD 2625	145,19
83	PENINSULA	TIENDA LIBERTAD 940	60,55
84	PENINSULA	TIENDA LIBERTAD2 2108	67,94
85	PENINSULA	TIENDA PLAYAS 945	36,16
86	PENINSULA	TIENDA SANTA ELENA 1002	10,57
87	PENINSULA	TIENDA LA LIBERTAD 2801	39,59
88	QUEVEDO	BODEGA 814 QUEVEDO	77,06
89	QUEVEDO	TIENDA BUENA FE 817	20,17
90	QUEVEDO	TIENDA EMPALME 818	26,87
91	QUEVEDO	TIENDA QUEVEDO 811	14,88
92	QUEVEDO	TIENDA QUEVEDO MOTOS 815	14,12
93	QUEVEDO	TIENDA SATELITE BALZAR 1039	22,57

Anexo C. Matriz de M3 de las rutas atendidas por el CDD GYE (continuación)

N°	RUTA	EMISOR	m ³
94	VINCES	TIENDA DAULE 938	38,29
95	VINCES	TIENDA SAMBORONDON 1085	25,92
96	VINCES	TIENDA DAULE 1057	59,81
97	VINCES	TIENDA VINCES 827	56,83
98	VINCES	TIENDA VINCES 816	27,80

Fuente: Elaboración propia

ANEXO D. MATRIZ DE m³ DE LOS VEHÍCULOS

Código vehículo	Tipo	Placa	Tn.	m ³	Costo (\$)
1	FURGON	HBA9473	7,5	29,10	290
3	FURGON	GSG2991	6	28,88	290
4	FURGON	GRC714	5	28,94	230
5	FURGON	GSI6300	9,19	35,77	320
7	FURGON	HBA9706	5,5	22,86	230
8	FURGON	CBA1894	10	41,65	320
9	FURGON	ADY409	10	42,90	320
12	FURGON	PBT2644	9,1	34,99	320
13	FURGON	PBJ1103	10	39,90	320
14	FURGON	GRW9369	5	22,32	230
67	CAMIONETA	GRQ0696	1	5,94	80
80	SENCILLO	GSD9693	4,5	16,22	230
88	FURGON	PBH6698	10	34,77	320
183	CAMIONETA	GSN4742	2,5	13,20	80
212	CAMIONETA	UBB842	0,75	6,84	80
227	SENCILLO	ABA4013	7,5	42,49	230
245	FURGON	PBI6435	10	37,45	320
259	CAMIONETA	GSD6405	1	6,92	80
298	FURGON	PBS3565	9,9	44,20	320
308	FURGON	GPZ898	2	18,00	80
363	FURGON	GQK0707	3	11,34	80
384	SENCILLO	GRX7674	2,5	18,40	80
385	SENCILLO	ABB5012	5,5	40,78	230
390	FURGON	GSL3144	7,5	29,35	230
402	FURGON	GSM4340	42	85,26	420
409	FURGON	TBC2686	9	37,61	320
412	SENCILLO	PAC2640	7,5	30,68	230
294	FURGON	GQD284	2	18,61	80
441	FURGON	BAA1721	6	20,80	230
467	FURGON	PSA0884	7	45,50	230
520	FURGON	EAA2090	10	39,37	320

Fuente: Elaboración propia