

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



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

PROYECTO DE TITULACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

**“MAGÍSTER EN CONTROL DE OPERACIONES Y GESTIÓN
LOGÍSTICA”**

TEMA:

DISEÑO DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE RUTAS (VRP),
PARA EL CASO DE UNA EMPRESA DE REENCAUCHE DE
NEUMÁTICOS.

AUTOR:

MARCELO PATRICIO SILVA ROSERO

Guayaquil - Ecuador

2017

DEDICATORIA

Para los que hicieron más difícil el camino, que me retaron,
que me cuestionaron, que me hicieron crecer y ser cada
vez mejor

A mi Mama y Papa quienes con su ejemplo me motivan a
ser mejor todos los días

Para mi amor Kerlly, mi Dome, mi Samue, mis hermanas y
sobrinas, las ramas en que me apoyo todos los días y que
saben de los sacrificios hechos.

Mis abuelas y abuelos, en especial a mi abuela Zoila, que
me cuidó en mi niñez, son las raíces de mi vida

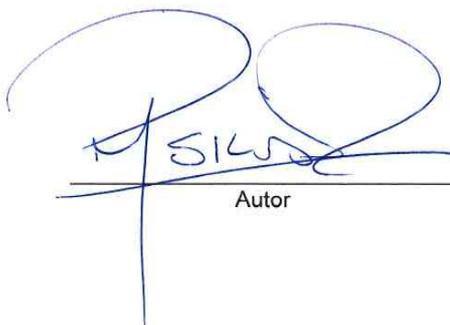
Mis amigos: Raúl, Valeria, Paulina, Jorge, mis guías en las
dudas

AGRADECIMIENTO

A todos los que tuvieron una palabra amable, a los que cumplieron con su palabra y dedicaron su tiempo a este proyecto. Para los que me han apoyado, comprendido y esperado con paciencia en mis ausencias

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 graduados** de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.



Autor

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Mgter. Wendy Plata Alarcón
Presidente



Mgter. Víctor Alejandro Vega Chica
Director



Mgter. Daniel Agreda de la Paz
Vocal

AUTOR DEL PROYECTO



Eco. Marcelo Patricio Silva Rosero
Autor

ÍNDICE GENERAL

Índice general.....	vi
Índice de cuadros	vii
1. CAPÍTULO 1: Antecedentes, Problema, Objetivos y Metodología	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Planteamiento del problema	1
1.3. Justificación	2
1.4. Alcance	3
1.5. Objetivo del proyecto	3
1.6. Metodología.....	4
2. CAPÍTULO 2: Marco teórico, Estado del Arte y Análisis de la situación actual.....	5
2.1. Marco teórico.....	5
2.2. Estado del arte.....	8
2.3. Análisis de la situación actual.....	18
3. CAPÍTULO 3: Diseño de la solución.....	22
3.1. Priorización del problema.....	22
3.2. Estrategias de solución.....	22
3.3. Desarrollo de las estrategias de solución.....	23
3.4. Modelo matemático.....	24
4. CAPÍTULO 4: Conclusiones y recomendaciones.....	35
4.1. Conclusiones.....	35
4.2. Recomendaciones.....	36
BIBLIGRAFÍA.....	37

ÍNDICE DE CUADROS

2.1. Ejemplo de VRPClásico.....	9
2.2. Variaciones y derivaciones del Problema de enrutamiento de Vehículos..	10
2.3. Modelos de VRP.....	14
3.1 Porcentaje de recolección enero-agosto de clientes en rutas.....	20
3.3 Consola VRP solver.....	26
3.4 Metodos de cálculo de distancias.....	26
3.5 Modelo Recolección-Rutas de la primera semana, 2 camiones por día.....	29
3.6 Modelo Recolección-Rutas de la segunda semana, 2 camiones por día...	29
3.7 Modelo Recolección-Rutas de la tercera semana, 2 camiones por día.....	30
3.8 Modelo Recolección-Rutas de la cuarta semana, 2 camiones por día.....	30
3.9 Modelo Recolección-Rutas de la quinta semana, 2 camiones por día.....	31
3.10 Modelo Recolección y Entrega-Rutas de la primera semana, 2 camiones por día.....	32
3.11 Modelo Recolección y Entrega-Rutas segunda semana, 2 camiones por día.....	32
3.12 Modelo Recolección y Entrega-Rutas de la tercera semana, 2 camiones por día.....	33
3.13 Modelo Recolección y Entrega-Rutas de la cuarta semana, 2 camiones por día.....	33
3.14 Modelo Recolección y Entrega-Rutas de la quinta semana, 2 camiones por día.....	34
3.15 Resumen de resultados.....	34

PRESENTACIÓN

Este trabajo tiene el objetivo de diseñar un sistema de ruteo de vehículos con entrega y recolección simultáneos, en una empresa de reenchache. Para esto en el capítulo 1 se efectúa el planteamiento del problema, sus partes principales y las necesidades de datos para la investigación. El capítulo 2 desarrolla el marco teórico en el cual se describe los modelos de ruteo de vehículos y la heurística de resolución denominada Adaptive Large Neighborhood Search. En el capítulo 3 se hace uso de la herramienta VRP Spreadsheet Solver para modelar y buscar la mejor solución para el modelo planteado. Finalmente luego del análisis se llega a importantes conclusiones al tema y se efectúa la recomendación pertinente.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES, PROBLEMA, OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

1.1. ANTECEDENTES

La empresa identificada para la elaboración del presente proyecto inició sus operaciones hace aproximadamente cuatro años con la línea de reencauche de buses y camiones. En el primer semestre del año 2017 se ha implementado una segunda línea de producción para la llantas de maquinaria pesada OTR¹. El crecimiento de la primera línea de negocio y el arranque de las operaciones de la segunda línea han motivado la reorganización y el redimensionamiento de todo el sistema de recogida y entrega de los neumáticos. En el 2011 se vendieron en el Ecuador 472.478 unidades; y, para el año 2014 pasaron a 526.044 unidades. Desde el 2011 a septiembre 2016 se han vendido en Ecuador un total de 2.9 millones de camiones, lo cual ha representado un importante crecimiento de la flota nacional de vehículos de transporte pesado y de transporte de pasajeros. (Estudio Renpacif, 2016)

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento de la flota nacional de vehículos en Ecuador ha traído como consecuencia que los flujos de negocio se vean incrementados notablemente en la empresa objeto de análisis del presente proyecto, provocando que el área de logística reciba un impacto importante de volúmenes de recolección y entrega de producto terminado que han develado algunas oportunidades de mejora dentro de sus operaciones de distribución.

En el plan estratégico 2017 de la empresa, se identificó como una debilidad el área logística de la empresa, el proceso de recolección y distribución de producto terminado, por lo que una de las metas para los próximos años será el

¹ OTR: Out of Road

fortalecimiento del equipo y las operaciones de esta área. Para afirmar esto la empresa levantó la opinión de los asesores comerciales quienes han identificado como el cuello de botella la operación logística de recolección de carcasas y entrega de neumáticos reencauchados, la cual les ha provocado varios retrasos e incumplimiento con los clientes.

En líneas generales el modelo de negocio se desarrolla con el siguiente esquema simplificado: la empresa vende sus servicios principalmente en clientes de flotas de transporte de vehículos pesados, los cuales entregan a la empresa la principal materia prima que son las carcasas o llantas usadas aptas para el proceso de reencauche, el 80% de las llantas son facturadas al cliente y el 20% son rechazadas durante el proceso al no cumplir con los parámetros técnicos para un adecuado reencauche, el rechazo es devuelto al cliente o son desachados por gestores ambientales. Luego del proceso de reencauche se debe entregar en el lugar que el cliente indica las llantas listas para su uso. Para la entrega y recogida de las llantas la empresa cuenta con una flota propia de dos camiones de 3,5 toneladas (Cap. Aprox. 50 llantas por camión); los cuales desarrollan rutas preestablecidas que se repiten semanalmente. Además, la empresa cuenta con acuerdos de transporte con empresas especializadas de Courier. Actualmente la flota propia se encuentre con un porcentaje de utilización promedio enero-agosto de 13%.

Estadísticas del 2014 muestran que el promedio de días entre el ingreso y salida de los neumáticos de la línea de producción es de 7 días, a esto se añade un promedio de 3 días para la recolección en el cliente y la entrega en el punto del cliente, suman un total de 10 días. Una de las metas deseables es la reducción del número de días promedio entre la fecha de recolección en cliente y fecha de entrega, el cual sería un importante punto de negociación para la obtención de más clientes. Anexo 1. Flujograma de recolección y distribución

1.3. JUSTIFICACIÓN

La importancia de este proyecto para la empresa radica en la optimización de el proceso de recolección y entrega lo cual se espera que mejore los indicadores de servicio, que actualmente en promedio se ubican en 10 días, maximizando el uso de los recursos logísticos disponibles y minimizando los costos de transporte. Principalmente se proveerá una base para el ruteo de vehículos que viabilice la absorción del incremento esperado de la demanda futura, sin la necesidad de un aumento significativo de los recursos logísticos disponibles en la actualidad e incrementando su eficiencia de uso.

1.4. ALCANCE

El diseño del modelo de optimización de rutas será para una empresa relacionada con el negocio del reencauche de neumáticos, específicamente para las rutas establecidas en el primer semestre del año 2017 para Quito e Ibarra.

1.5. OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un modelo de enrutamiento de vehículos con recolección y entrega simultánea VRPSPD en una empresa de reencauche de llantas de las rutas de Quito e Ibarra para la minimización del costo de transporte y mejorando el nivel de utilización de la flota.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Definir los indicadores para la medición y costeo del sistema actual de rutas y evidenciar los viajes fuera de ruta.
- 2) Identificar el número total de clientes que no son atendidos en rutas regulares bajo el modelo actual de ruteo.
- 3) Crear rutas de recolección que incluyan a clientes regulares y a clientes no atendidos bajo el modelo actual de ruteo.
- 4) Crear rutas de entrega en función del número total de neumáticos retirados en el proceso de recolección.

1.6. METODOLOGÍA

En el desarrollo de este proyecto se seguirán los pasos mostrados a continuación:

- Diagnóstico de la situación actual del manejo de las rutas de la empresa.
- Elaboración de indicadores y análisis del desempeño logístico de las rutas, eficiencia de la flota, distancia recorrida, costo por neumático, costo total por km.
- Identificación y priorización de los problemas y las causas relevantes.
- Planteamiento de los objetivos del proyecto.
- Determinación de la demanda de retiro y entrega de llantas.
- Diseño del modelo de enrutamiento de vehículos con recogida y entrega simultánea VRPSPD.
- Análisis del modelo de VRPSPD.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO, ESTADO DEL ARTE Y ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

2.1. MARCO TEÓRICO

Actualmente los modelos de transporte originados en el problema del agente viajero, tienen una versatilidad en múltiples campos empresariales, gubernamentales e incluso ONGs. Las herramientas desarrolladas, aportan en la toma de decisiones empresariales no solo a través de herramientas de optimización matemática sino también a través de heurísticas cada vez más precisas y sencillas de implementar. A continuación, repasaremos brevemente algunas de las herramientas que tiene una aplicación actual en los modelos de ruteo de vehículos y sus variantes.

2.1.1 DEFINICIÓN DEL MODELO DE TRANSPORTE

El modelo de transporte es un problema de optimización que consiste en minimizar los costos de distribución de una función objetivo sujeta a un conjunto de restricciones que limitan el espacio de las posibles soluciones. Además en general estos problemas son problemas denominados de optimización combinatoria ya que sus variables de decisión son discretas.(Bustos & Pinilla, 2016)

En un modelo de transporte se pueden distinguir varios elementos característicos:

1. Orígenes
2. Destinos representados como nodos
3. Arcos que representan las rutas que unen los distintos nodos de origen y nodos de destino.

Los orígenes se denotan con la letra m y los destinos con la letra n . Los arcos se representan con la notación (i,j) , que une el origen i con el destino j . Cada arco

contiene 2 datos fundamentales: el costo del transporte unitario c_{ij} y x_{ij} la cantidad transportada.

Adicionalmente, la cantidad ofertada por el origen es a_i y la demanda del destino b_j . En el modelo matemático el objetivo final es minimizar los costos de transporte cumpliendo las restricciones de oferta y demanda. Es importante mencionar que en este tipo de modelos la demanda debe balancearse, es decir que la cantidad demandada debe ser igual a la cantidad ofertada.

Otra de las aplicaciones de este tipo de modelos es el modelo de redes el cual se compone de nodos, arcos a través de los cuales hay un flujo, que puede ser finito o infinito. Un arco puede ser dirigido si permite el flujo en una sola dirección. Por otra parte, es importante señalar que una ruta es el conjunto de arcos que conectan nodos distintos y que pasan a través de otros nodos. Las rutas pueden ser consideradas un ciclo o bucle si conecta en el principio y fin con el mismo nodo. (Taha, 2012)

2.1.2 EL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS

El problema de ruteo de vehículos está dentro del área de los problemas de transporte, que es a su vez una función de la logística de distribución, ya que se encarga de enviar mercancías desde un centro de distribución hasta los puntos de destino correspondientes, considerando los costos, el tiempo y la seguridad de los productos transportados. (Hernández Yimy Alexander, 2016)

Para determinar la calidad del servicio de transporte se debe medir los siguientes factores: rapidez y puntualidad en la entrega, fiabilidad del servicio, seguridad y trazabilidad. Pensando en estos factores la gestión de transporte debe realizar el ruteo de vehículos con la finalidad de atender a los clientes con los parámetros de calidad establecidos, dentro del tiempo acordado y al menor costo posible.

En la resolución de los problemas de enrutamiento se optimizan haciendo uso de modelos matemáticos que pueden presentar diferentes variantes como:

restricciones de capacidad, ventanas temporales, múltiples depósitos, entregas y devoluciones, entregas parciales, valores al azar, periódico VRP, VRP con viajes de regreso y VRP con instalaciones satélite entre otros.(Rodríguez, 2011).

El VRP es un problema de optimización combinatoria en el cual el número de soluciones factibles aumenta de forma exponencial con el número de clientes a visitar: Se trata de una generalización del también conocido problema TSP (*Travelling Salesman Problem*). El TSP es un problema NP- completo (Garey y Johnson, 1979) ampliamente estudiado. Igual que ocurre con otros problemas en el ámbito de la Organización Industrial, este tipo de problemas se caracteriza por ser fácilmente descriptible pero difícil de resolver. Se puede decir que los problemas NP-completos son los problemas más difíciles de la clase NP, por lo que clásicamente han despertado un gran interés para su estudio y obtención de heurísticas para su resolución.

La complejidad de los problemas NP-completos (Non Deterministic Polynomial time) depende de los parámetros de entrada y del tamaño del problema, por lo que los problemas grandes no pueden ser abordados por técnicas determinísticas, y se hace necesario el uso de heurísticas o meta heurísticas.(Bustos & Pinilla, 2016)

El origen del problema VRP fue introducido por Dantzig y Ramser (1959), quienes describieron una aplicación real acerca de la entrega de gasolina a las estaciones de servicio y propusieron la formulación matemática a dicho problema.

El problema de ruteo de vehículos es determinar las mejores rutas y/o asignaciones para la entrega/retiro de bienes/servicios a clientes que están distribuidos geográficamente. La decisión que involucra el VRP es asignar un grupo de clientes a un grupo de vehículos y choferes, y secuenciar sus visitas. El objetivo del VRP es entregar un producto/servicio minimizando tiempo/distancia/dinero. Las restricciones son completar las rutas con los recursos disponibles y en los límites de tiempo impuestos por la jornada de

Diseño de un modelo de optimización de rutas (VRP), para el caso de una empresa de reencauche de neumáticos.

Maestría en Control de Operaciones y Gestión Logística

trabajo del chofer, velocidad de viaje y requerimientos del cliente, entre otros. (Mediorreal, 2014)

2.2. ESTADO DEL ARTE

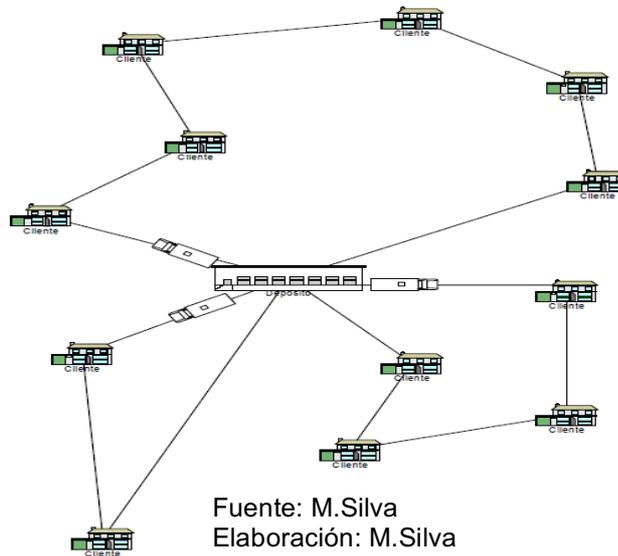
2.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS

Para abordar la problemática de optimización de asignación de rutas, el Vehicle Routing Problem (VRP) (Dantzig & Ramser, 1959) es el modelo genérico usado en este tipo de problemas, donde se asigna un conjunto de rutas para un conjunto de vehículos, mismos que tienen como origen uno o varios depósitos y deben atender un número de clientes o ciudades distribuidos geográficamente. El objetivo del VRP clásico es minimizar el costo de las rutas, que inician y terminan en un depósito, para un conjunto de clientes con demandas conocidas. Ha sido estudiado por más de 50 años y como se mencionó se encuentra dentro de la denominada clase de problemas NP-completo, donde la búsqueda de soluciones con modelos determinísticos incrementa de manera exponencial con el tamaño del problema el esfuerzo computacional para encontrar una solución óptima.

El VRP se representa como un conjunto de nodos a ser visitados (clientes) y un conjunto de vehículos inicialmente ubicados en un nodo particular (depósito), el objetivo es asignar rutas a los vehículos (secuencia ordenada de nodos) tendiente a minimizar el costo total de transporte. Un ejemplo gráfico de un VRP clásico se presenta en la Figura 2.1.

Diseño de un modelo de optimización de rutas (VRP), para el caso de una empresa de reencauche de neumáticos.

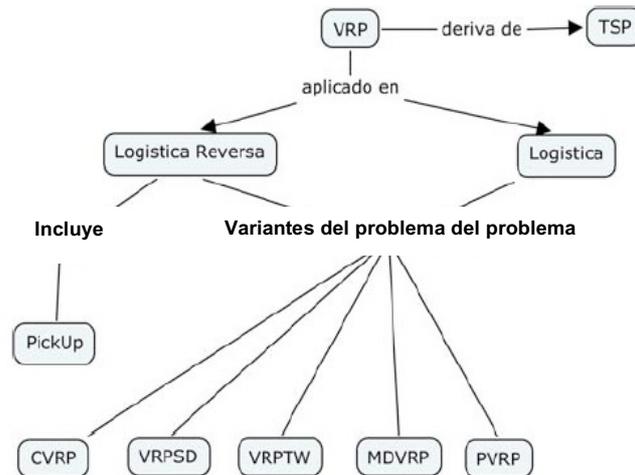
Figura 2.1. Ejemplo de VRP Clásico. Desde un depósito central se asignan rutas a 3 camiones que deben atender 12 clientes dispersos geográficamente



Varios estudios presentan una recopilación de variantes del problema general de las cuales se puede mencionar las siguientes: VRP con recolección y entrega (VRPPD). VRP con flota heterogénea, Open VRP, con ventanas de tiempo (VRPTW), con depósitos múltiples (MDVRP), Stochastic VRP (SVRP), Periodic VRP (PVRP), VRP multiobjetivo, entre otras variaciones derivadas de las necesidades del mercado (Gonzalez & Gonzalez, 2006). En la Figura 2.2 se presenta un diagrama con las variantes más populares del VRP.

Figura 2.2. Variaciones y derivaciones del Problema de enrutamiento de Vehículos

Diseño de un modelo de optimización de rutas (VRP), para el caso de una empresa de reencauche de neumáticos.



Fuente: Fernandez Arias & Allende Alonso,2013
Elaborado por: M. Silva

Para el caso del problema de enrutamiento de vehículos con recogida y entrega simultánea VRPSPD, este fue planteado por primera vez en el año 1989 por Hokey Min. Hasta ese momento solo se habían desarrollado modelos puros de recolección o de entregas, pero no un modelo que considere la recolección y/o la entrega en una misma parada (Min, 1989).

Actualmente se ha vuelto importante esta situación para casos prácticos tales como transporte público de pasajeros, aerolíneas, buses escolares, distribuidores de material de libros y documentos entre librerías, distribuidores de alimentos entre otros varios. Toda la variedad de aplicaciones del modelo VRPSDP contrasta con la poca cantidad de literatura que ha estudiado este caso particular de enrutamiento de vehículos.

Durante varios años este tipo de problemas de enrutamiento no han atrapado la atención de los investigadores, quienes han estudiado otras variantes del problema de enrutamiento. En años recientes la imposición de regulaciones para las empresas en cuanto a su responsabilidad de implementar una logística inversa a fin de retirar de los lugares de expendio sus productos que han terminado su vida útil, ha hecho que se vuelva la mirada a esta variante de los problemas de enrutamiento. Además se ha presentado una creciente presión para mejorar la eficiencia del uso de los recursos de transporte evitando al

mínimo que un transporte efectúe viajes vacíos o con carga mínima (Fernández Arias & Allende Alonso, 2013)

Existen varios tipos de VRP, cada uno de los cuales ha sido desarrollado para dar solución a diferentes situaciones operativas de distribución. Esta el ruteo de vehículos con ventana de tiempo. Dado que estos son problemas NP-complejos y que su resolución a medida de que se incrementan el número de variables se vuelve inviable, frecuentemente se usa para la resolución de este tipo de modelos métodos heurísticos y meta heurísticos. El VRPDP, al ser un tipo de problema NP-complejo su solución implica una cierta complejidad a pesar de lo cual también se han desarrollado métodos de solución como el de Dell 'Amico et al. y el de Anbuudayasankar et al. (Fernández Arias & Allende Alonso, 2013). (Baldacci, Mingozzi, & Roberti, 2012), heurísticas (Tan, Lee, Zhu, & Ou, 2001), (Cordeau, Laporte, Savelsbergh, & Vigo, 2007) meta-heurísticas (Golden, Raghavan, & Wasil, 2008), (Mehrerdi, 2012).

2.2.2 RUTEO DE VEHÍCULOS CON RECOGIDA Y ENTREGA

Como se mencionó existen varios tipos de modelos de ruteo de vehículos, diseñados para resolver casos específicos en donde el ruteo de vehículos debe cumplir con ciertas condiciones. Un tipo de ruteo de vehículos es el ruteo de vehículos con recogida y entrega. La principal característica de este modelo es que los vehículos deben cumplir simultáneamente con el servicio de recolección de productos y la entrega en los mismos clientes o en otros clientes de la ruta especificada.

Los vehículos en este tipo de problemas tienen una capacidad limitada medida en unidades de volumen o peso, además tienen asociados un costo fijo y un costo variable de acuerdo a las distancias recorridas. Cuando todos los vehículos disponibles para el ruteo tienen las mismas características de capacidad y costo se está frente a una flota homogénea, en caso contrario el problema debe tratar con las características de una flota heterogénea de vehículos. Los vehículos

según las restricciones normativas pueden tener tiempos máximos de circulación y zonas con circulación temporal restringida.

Por otro lado, están los clientes que se caracteriza para el caso del modelo recogida y entrega por dos demandas, una demanda de recolección y una demanda de entrega que pueden ser o no simultaneas y satisfechas por el mismo vehículo u otro en momentos diferentes. En algunos casos los clientes pueden tener especificaciones de horarios de despacho y de ingreso de mercancías y también restricciones en el tipo de vehículo específico que está habilitado. Junto con esto están los denominados depósitos que son el punto de partida y destino de los productos recogidos y entregados. Estos depósitos también pueden tener normado los horarios de entrega y de recolección, con capacidades máximas.

Otro elemento importante son las rutas, que son el circuito que permite agrupar mediante un orden preestablecido las recolecciones y entregas de las demandas de los clientes. Las rutas tienen asociadas las distancias y por consiguiente los costos de distribución de los productos. En los problemas de ruteo de vehículos se busca la mejor ruta de tal manera que esta sea la de menor costo o la de menor número de vehículos requeridos, o la de menores tiempos, o la de menores distancias, o la que maximice el nivel de servicio al cliente.

El modelo VRPPD considera también factores como que los productos recolectados y entregados en un determinado momento no pueden exceder la capacidad del vehículo asignado para esa ruta. Otro factor es el de que el vehículo de ruta no deba terminar las entregas para iniciar la recolección, y que esté o no habilitado el intercambio de productos en la misma ruta entre clientes sin que sea necesario el que primero vayan al depósito.

En la revisión bibliográfica se han encontrado 3 clases de problemas de ruteo de vehículos:

- **VRP con backhauling (VRPB)** donde existen demandas de clientes únicas, donde se supone que todas las entregas deben hacerse antes de que comiencen las recolecciones.
- **VRP con entregas y recolección mixta (VRPMDP)**, este permite entregas y recolecciones en cualquier orden de la ruta del vehículo.
- **VRP con entrega y recolección simultánea (VRPSDP)**, que es un caso de demandas combinadas donde el vehículo hace una sola parada para entregar y retirar los bienes.

El modelo VRPMDP puede ser formulado como un VRPSDP añadiendo en cada parada una demanda de cero a la demanda de recolección o cero en la demanda de entrega en el punto de recolección. Aun cuando un problema de VRPMDP puede ser formulado como usando el modelo VRPSDP, la inversa no es posible ya que en ese caso alguno de los requerimientos de la entrega simultanea no se podrían cumplir; por eso VRPSDP es un problema clase de demanda combinada.

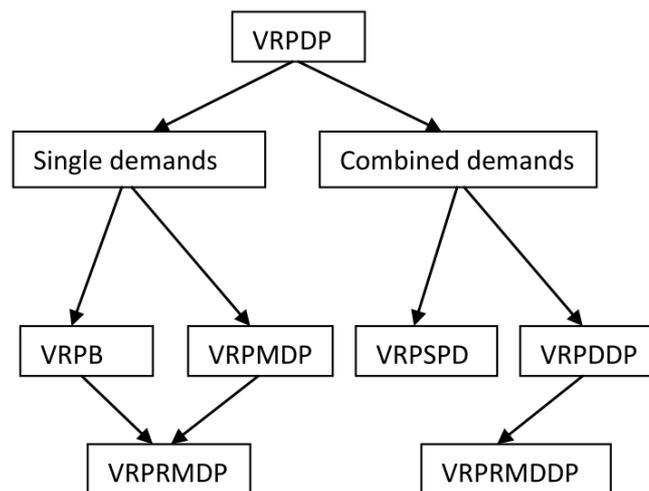
Para cualquier problema de investigación operativa en la medida en que más restricciones se añadan menor es el área disponible para encontrar una solución factible por lo que es necesario analizar cuidadosamente cada supuesto ya que podría llevarnos a trabajar con soluciones sub-óptimas. El problema de ruteo de vehículos con entrega y recolección (VRPD) parte del problema de entrega y recolección más sencillo que es el VRPB, en donde con la finalidad de simplificar el modelo se hace en primer lugar la entrega de productos y una vez vacío el camión arrancar con la recolección, este modelo simplifica el modelo de recolección mixto VRPMDP ya que no permite que la carga a entregar se traslape con la carga recolectada en la misma ruta.

Actualmente se están desarrollando varios modelos que incorporan al problema de VRPDP problemas con restricciones de carga (evalúan políticas de disposición de la carga dentro del vehículo a fin de minimizar los costos de manipulación de carga. Se han desarrollado modelos de recolección mixta en los

que se establecen políticas en las que si un vehículo contiene un solo tipo de carga de recolección o carga de entrega puede llenarse al 100% de su capacidad caso contrario se debe dejar un 20 a 25% de espacio libre para la fácil manipulación de la carga. Está claro que una solución resultante de un modelo VRPB tendrá una solución menos efectiva que una solución obtenida con el VRPMDP. Se ha evidenciado que la calidad de la solución no tiene una relación lineal con el espacio libre sino cóncava. (Wassan & Nagy, 2014).

Actualmente se han efectuado investigaciones en las que se prueba diversos arreglos que buscan mejorar la eficiencia de los modelo de entrega y recolección, con límites de uso de espacio, con límites de visitas por clientes, con estrategias de iniciar con X número de entregas, entre otras. El siguiente gráfico resume los distintos modelos estudiados hasta la fecha.

Figura 2.3. Modelos de VRP



Fuente: Wassan & Nagy, 2014
Elaborado por: M. Silva

Partiendo del modelo clásico de VRP de entrega y recolección, luego se ramifica en los siguientes modelos:

- **VRPB:** VRP with backhauling son modelos especiales de única demanda, en los que se efectúan las entregas primero antes de iniciar la recolección.

Diseño de un modelo de optimización de rutas (VRP), para el caso de una empresa de reencauche de neumáticos.

- **VRPMDP:** Es un modelo que permite las entregas y recolección ocurran en cualquier orden dentro de la ruta.
- **VRPSPD:** Modelo de demandas combinadas donde el vehículo en una sola parada puede efectuar entregas y recolección simultáneas.
- **VRPDDP:** este modelo permite el ruteo con más de una visita a los clientes.
- **VRPRMDP:** Modelo de ruteo mixto con restricciones de espacio en entrega y recolección.
- **VRPRMDDP:** Modelo mixto de ruteo de vehículos con restricciones de espacio y posibilidad de separación de entrega y recolección de un mismo cliente.

Para la modelación de estos problemas se requiere la recolección y cálculo de los siguientes parámetros:

- c_{ij} La distancia entre clientes i y j
- q_i La demanda de entregas del cliente i
- b_j La demanda de recolección del cliente i
- La capacidad del vehículo C
- X_{ij} es 1 cuando un vehículo utiliza la ruta entre el cliente i al cliente j , caso contrario es cero.
- R_{ij} que es la cantidad de productos para entrega en el vehículo en el trayecto ij
- P_{ij} la cantidad de productos recolectados en el vehículo en el trayecto ij
- K es el número de vehículos.

La modelación tiene la siguiente forma

Minimizar

$$Z = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeto a

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} = 1 \quad j \in \{1, \dots, n\} \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ji} = 1 \quad j \in \{1, \dots, n\} \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^n R_{ij} - q_j = \sum_{i=0}^n R_{ji} \quad j \in \{1, \dots, n\} \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^n P_{ij} + b_j = \sum_{i=0}^n P_{ji} \quad j \in \{1, \dots, n\} \quad (5)$$

$$\sum_{i=0}^n P_{0i} = 0 \quad (6)$$

$$\sum_{i=0}^n R_{i0} = 0 \quad (7)$$

$$R_{ij} + P_{ij} \leq Cx_{ij} \quad i \in \{0, \dots, n\}, j \in \{0, \dots, n\} \quad (8)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad i \in \{0, \dots, n\}, j \in \{0, \dots, n\} \quad (9)$$

$$R_{ij} \geq 0 \quad i \in \{0, \dots, n\}, j \in \{0, \dots, n\} \quad (10)$$

$$P_{ij} \geq 0 \quad i \in \{0, \dots, n\}, j \in \{0, \dots, n\} \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{0i} = K \quad (12)$$

La ecuación 1 es la función objetivo en la que se desea minimizar la distancia recorrida por los vehículos. Las ecuaciones 2 y 3 cada cliente es servido una sola vez. 4 y 5, ecuaciones de conservación de flujo. 6 y 7 los vehículos inician con carga cero para recolectar y terminan con carga cero de entregar. 8 restricción de máxima capacidad. 10 y 11 restringe la X_{ij} a tomar valores de 0 o 1 y que R_{ij} y P_{ij} restricción de no negatividad.

Para resolver este modelo se pueden usar métodos exactos o métodos metaheurísticos. En el caso de los métodos exactos, en las investigaciones los modelos más eficientes en distancia recorrida resultan ser los VRPRMDP. Si bien los modelos de ruteo de vehículos aparecieron el 1988 los primeros métodos de solución usando metaheurísticas aparecieron en el siglo 21. La más conocida es la búsqueda tabú, aun cuando la más efectiva es la búsqueda reactiva de tabú (Reactive Tabu Search (RTS)) que son adecuadas para la resolución de los problemas VRPRMDP. Otra heurística que se adapta bien a VRPRMDP es la de colonia de hormigas y en los últimos años la heurística GRASP fue usada para resolver VRPRMDP.(Wassan & Nagy, 2014)

En recientes publicaciones se ha definido que los problemas conocidos como Rich Picking and Delivery Problems With Time Windows (RPDPTW), se adaptan mejor a las heurísticas conocidas como Large Neighborhood Search (LNS) y su derivación conocida como Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS).

(Erdoğan, 2017). Esta última presenta como principales ventajas: una gran flexibilidad para adaptarse a muchas variantes de VRP y además, a diferencia de la heurística LNS que trabaja con un limitado espacio de búsqueda, la ALNS trabaja con un amplísimo espacio de búsqueda que le permite ser especialmente útil en problemas con restricciones estrechas como los RPDPTW.(Lutz, 2014).

El ALNS fue introducida por primera vez por Kopke and Pisinger. La idea principal de la Heurística es la de remover repetidamente partes de la solución y reinsertarla en una posición más rentable. El mecanismo es el de destrucción y reparación, a diferencia de la heurística raíz LNS, que utiliza un solo mecanismo de destrucción y reparación, la ALNS usa múltiples heurísticas de destrucción y reparación; en cada iteración una heurística de destrucción y reparación es seleccionada. La técnica ALNS no hace pequeños cambios en un espacio reducido como lo hace LNS, hace cambios masivos en un espacio mucho más amplio llegando a cambiar del 30% al 40% de la solución, esto reduce el riesgo que la heurística se quede estancada en óptimos locales.(Lutz, 2014)

El presente proyecto hace uso de este modelo ALNS para resolver el caso de estudio como un problema de decisión, más no como un problema de optimización. La diferencia radica en que el resultado del modelo es un criterio adicional para el proceso de toma de decisiones, y no es, el resultado, la decisión en sí. Los pasos de la heurística son:

1. Definir el depósito, los clientes a visitar, las distancias entre clientes, la duración de los viajes y el tipo de vehículos.
2. Construcción de una solución titular incorporando clientes a las rutas, seleccionando el cliente que resulte en el máximo incremento del beneficio o en el mínimo incremento del costo en cada uno de los pasos de la construcción.
3. Mejorar la solución obtenida usando búsqueda local, con una serie de algoritmos disponibles para la búsqueda local. En este caso se tienen cuatro posibles algoritmos: el primer algoritmo busca todos los pares posibles de la solución dada y evalúa si intercambiándolos resulta un

mejor valor para la función objetivo. El segundo algoritmo, examina la posibilidad de remover cualquier cliente dentro de la solución dada para reinsertarlo en una posición diferente dentro de las rutas para mejorar el valor objetivo. El tercer algoritmo, busca remover a la vez dos arcos de la solución dada. Por ejemplo, remueve el arco del cliente **g** al **h** y el arco del cliente **e** al **f**; para mantener la factibilidad añade el arco del cliente **g** a **f** y el del cliente **h** a **e**, y evalúa si la solución obtenida tiene un mejor valor para la función objetivo. El cuarto algoritmo prueba intercambiar todos los clientes en ruta de un vehículo por los clientes en ruta de otro vehículo de distintas características, este procedimiento es particularmente útil en flotas heterogéneas.

4. Guarda la solución obtenida como la mejor solución conocida
5. Repite el procedimiento
6. Destruye la solución removiendo aleatoriamente clientes de la ruta
7. Repara la solución heurística establecida añadiendo clientes
8. Mejora la solución establecida usando uno de los cuatro algoritmos
9. Si la solución encontrada es mejor que la solución guardada como la mejor solución conocida, entonces graba la nueva solución como la mejor solución conocida, caso contrario reemplaza la solución encontrada con la mejor solución conocida con una probabilidad de p .
10. Efectúa el proceso hasta que el tiempo de proceso sea mayor al tiempo permitido del CPU.
11. Retorna la mejor solución conocida.

Con este método los problemas de distribución que en la práctica son cada vez más complejos, y que muchas veces tienen restricciones y espacios muy estrechos para la solución factible, han encontrado una forma para que los modelos ALNS aporten a la decisión de mejores rutas de distribución, con un procedimiento eficiente y muy cercano al óptimo.(Lutz, 2014)

2.3. ANÁLISIS DE SITUACIÓN ACTUAL

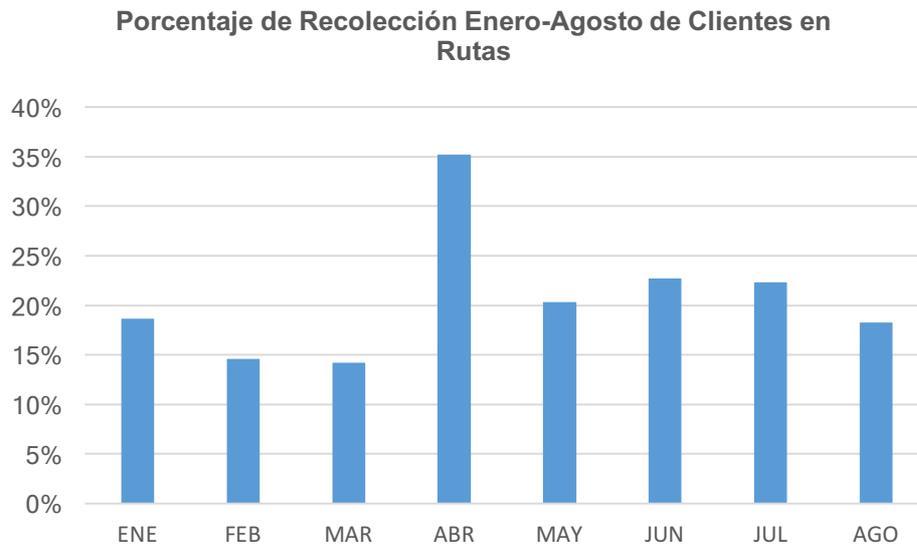
La empresa ubicada al norte de la ciudad de Quito ha tenido un crecimiento sostenido en la recolección de llantas por sobre las 1000 unidades mensuales con importantes tasas de crecimiento anual. Las rutas seleccionadas para este estudio incluyen a 69 clientes los cuales envían semanalmente sus llantas para que sean reencauchadas y luego de 8 días recibir los neumáticos reencauchados. Cada uno de estos clientes se encuentra georreferenciados lo cual permite calcular las distancias y posteriormente los tiempos, haciendo uso del método de Manhattan que consiste en que dados los puntos $P(X_p, Y_p)$ y $Q(X_q, Y_q)$ la distancia entre estos, está definido por $d(P, Q) = |X_p - X_q| + |Y_p - Y_q|$. Para determinar los tiempos es necesario definir un promedio de velocidad lo que por características de la ciudad de Quito se lo define en 16Km/h.

Para la recolección de las llantas cuenta con una flota de vehículos homogénea, 2 camiones de 3.5 toneladas, capacidad 50 neumáticos tipo; que efectúan la recolección de llantas. Actualmente de enero a agosto estos vehículos tienen un nivel de ocupación del 13% en rutas establecidas. Esto debido a el metodo de ruteo de rutas fijas y desactualizadas.

Existen 5 rutas que se repiten semanalmente las cuales han sido diseñadas en base a la experiencia de las personas responsables de la logística. Los estudios de este mecanismo de ruteo por lo general no permite obtener buenos resultados en el costo mínimo, quedando esta práctica muy debajo de un costo optimo, una diferencia del 10 al 20%.(Delgado Bravo Erwin, 2007)

De enero a agosto 2017, del total de clientes georreferenciados en las rutas fijas actuaes, el 67% ha enviado alguna llanta durante los 8 primeros meses del año, el 33% de los clientes visitados por las rutas en estos meses, no ha enviado ningún neumático. El indicador de eficiencia de las rutas actuales se puede observar en la figura 3.1.

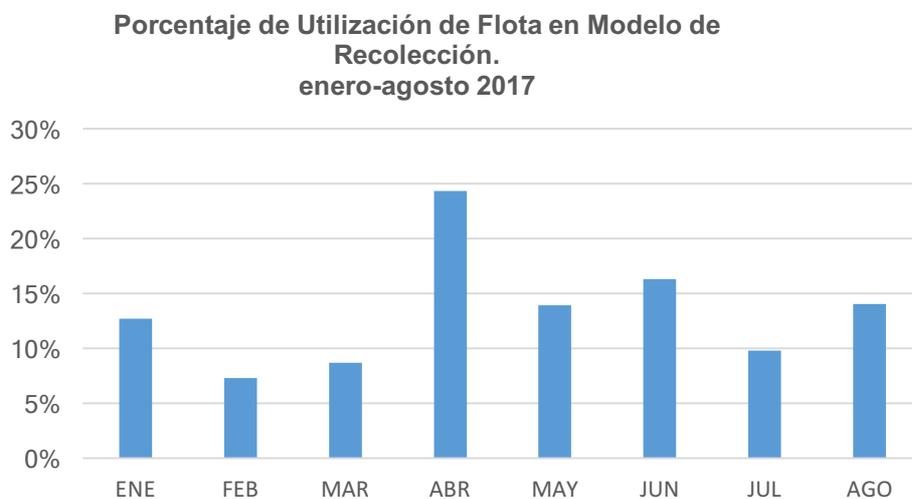
Figura 3.1



Fuente: Empresa objeto de estudio, 2017
Elaboración: M.Silva

Se observa que, en marzo, el mes más bajo de recolección, el porcentaje de llantas recolectadas a los clientes de las rutas establecidas, sobre el total ingresado a la planta fue 14%, el resto, 86%, proviene de la recolección a clientes de fuera de ruta, de la recolección de los vehículos de los asesores comerciales y la recolección de las compañías externas de transporte. Esto resulta en que el nivel de utilización de la flota propia en ruta para un sistema de recolección= sea el 13%. Figura No.3.2

Figura 3.2



Diseño de un modelo de optimización de rutas (VRP),
para el caso de una empresa de reencauche de
neumáticos.

**Maestría en Control de
Operaciones y Gestión
Logística**

Fuente: Empresa objeto de estudio, 2017
Elaboración: M.Silva

Por otro lado, de la información de campo levantada en el mes de agosto, la suma de los kilómetros recorridos por los dos camiones para el levantamiento de neumáticos de clientes dentro de la ruta fue de 4.406,34 Km. durante el mes. Con un costo por Km de consumo de combustible de 0,0788US\$/km y unos costos fijos equivalentes de US\$157,12 dólares por día. Con el modelo propuesto se espera que los costos se reduzcan junto con el kilometraje y el incremento del porcentaje de ocupación de la flota.

Con esta finalidad se ha planteado que para la resolución de este problema es necesario el diseñar un modelo de ruteo que le permita a la empresa la recolección y entrega de neumáticos ajustándose a las restricciones características del problema. Se pretende que con este trabajo la empresa tenga diseñadas un conjunto de rutas que le permitan satisfacer la demanda de sus clientes (de entrega y recolección), a un costo mínimo y con un nivel de servicio de alta calidad. Alternativamente se podrá hacer una programación de rutas periódica, dada la facilidad para la programación de la herramienta VRP Spreadsheet Solver

CAPÍTULO 3

DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

3.1. PRIORIZACIÓN DEL PROBLEMA

De los problemas identificados durante la recolección de datos y análisis del proceso logístico de recolección y entrega de neumáticos en las rutas establecidas por la empresa, el problema que requiere una solución prioritaria es el de la baja ocupación de la flota propia asignada para las rutas.

Este porcentaje de ocupación promedio es de 13%, considerando solo un modelo de recolección (picking); en un modelo de entrega y recolección (picking&Delivery) baja al 9% de ocupación de la flota. Se considera en el modelo de entrega y recolección el 25% de reserva de espacio para manejo de carga, considerando el tamaño y peso de los neumáticos que dificultan la manipulación dentro del vehículo. (Wassan & Nagy, 2014)

3.2. ESTRATEGIAS DE SOLUCIÓN

Para la solución de este problema identificado se han establecido varias estrategias a fin de que la propuesta de solución se acople de la mejor forma al modelo de negocio del servicio de reencauche y a la estructura laboral actualmente disponible.

La actual coordinación de logística esta constituida por 4 personas, las cuales están lideradas por un coordinador con segundo nivel de educación. Este personal, apoyado por los puestos directivos anteriores ha establecido el modelo logístico que actualmente aplica la empresa. En esta línea se requiere una herramienta que sea compatible con el nivel técnico del equipo de logística. Por lo que se han descartado herramientas que impliquen un conocimiento especializado de programación.

Por otra parte, es necesario cambiar el actual esquema de rutas predeterminadas semanales por rutas dinámicas programadas de forma diaria

dado la alta fluctuación de demanda de recolección y entregas de los clientes. En este sentido la herramienta debe permitir la manipulación de información de manera sencilla y rápida de tal forma que la programación de rutas pueda efectuarse al cierre de la facturación diaria y ordenar los despachos de bodega para el día siguiente. Otra barrera que se identifica para la operación de un modelo de RPDPTW es, que, dado que el número de clientes actuales en ruta no sobrepasa los 70 clientes, la inversión en el desarrollo de un programa a la medida de la empresa para el ruteo no es una solución costo efectiva, ya que podría requerir un profesional especialista para el manejo diario del ruteo con los consecuentes costos.

3.3. DESARROLLO DE LAS ESTRATEGIAS DE SOLUCIÓN

Considerando los factores mencionados en los puntos anteriores se ha seleccionado un modelo desarrollado en el primer semestre del 2017 en la plataforma Excel, la más usada a nivel mundial y que en cualquier empresa se tiene acceso. El modelo se ha implementado en esta plataforma Excel a través de secuencias de programación que permiten el desarrollo de las heurísticas descritas en el capítulo 2 para la resolución de los RPDPTW a través de ALNS.

El programa denominado “VRP Spreadsheet Solver” ha sido desarrollado por Gunes Erdogan, en marzo 2017, desde esa fecha son muchos los casos prácticos que han evaluado la efectividad de la plataforma Excel para el manejo de este tipo de problemas. El resultado de estas evaluaciones ha sido muy satisfactorio para casos de menos de 200 clientes, comparando, el resultado de la optimización y el tiempo de respuesta, con modelos similares desarrollados en C++.(Erdogan, 2017)

Con el “VRP Spreadsheet Solver” se implementó dos grupos de 10 rutas (2 vehículos 5 días por semana) modelizadas de 69 clientes, el primer grupo simula el escenario del mes de agosto 2017 y el segundo simula un modelo de recolección y entrega simultanea (VRPSPD). Cada grupo de 5 modelos

representan las 5 semanas que tuvo particularmente el mes de agosto (es decir se repitieron las rutas semanales en 5 ocasiones en el mes de agosto). En estos modelos se colocó la demanda real de recolección (picking) observada en dicha semana para cada uno de los 69 clientes. Se incorporaron los costos fijos y el costo variable de agosto.

Se consideró para la modelización, que en una semana los 2 vehículos disponibles pueden efectuar cada uno una ruta por día, es decir cada día existen 2 rutas posibles, por los 5 días a la semana, esto es representado en la herramienta excel como: 10 vehículos, equivalente a 1 ruta por vehículo de 50 neumáticos de capacidad (modelo exclusivo de picking). Es decir este esquema representa los 2 vehículos diarios disponibles durante los 5 días de la semana. Los resultados obtenidos del primer grupo de modelos se los comparó con los resultados reales en cuanto a kilometraje y costos obtenido de las rutas ejecutadas en 69 clientes durante el mes de agosto 2017.

Finalmente se efectuó un segundo grupo de modelos con la incorporación de entrega y recolección para las 5 semanas, tomando como demanda de entrega la demanda de recolección de la semana anterior (t-1); considerando que la promesa de entrega del neumático reencauchado es de 8 días contados a partir de la recolección. El resultado del segundo grupo de 5 modelos fue comparado con el modelo exclusivo de recolección.

3.4. MODELO MATEMÁTICO Y VRP SPREADSHEET SOLVER

En secciones anteriores se presentó una descripción de los modelos matemáticos para ruteo de vehículos. Además, se describió las distintas alternativas de optimización de este tipo de modelos. Una de estas alternativas son las heurísticas conocidas como ALNS las cuales se adaptan muy bien en los casos de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo, capacitados, de entrega y recolección y con flotas diversas. En esta línea el VRP Spreadsheet Solver, es una herramienta desarrollada en Excel utilizando la programación de macros y

que desarrolla la heurística ALNS mediante una interface amigable con los usuarios.

El modelo matemático se traduce en un modelo en el que la función objetivo está compuesta por la minimización de los costos de ruta de los vehículos con la estructura siguiente:

Minimizar

$$Z = \sum_{i=0}^{69} \sum_{j=0}^{69} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeto a

$$\sum_{i=0}^{69} x_{ij} = 1 \quad j \in \{1, \dots, 69\} \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^{69} x_{ji} = 1 \quad j \in \{1, \dots, 69\} \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^{69} R_{ij} - q_j = \sum_{i=0}^{69} R_{ji} \quad j \in \{1, \dots, 69\} \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^{69} P_{ij} + b_j = \sum_{i=0}^{69} P_{ji} \quad j \in \{1, \dots, 69\} \quad (5)$$

$$\sum_{i=0}^{69} P_{0i} = 0 \quad (6)$$

$$\sum_{i=0}^{69} R_{i0} = 0 \quad (7)$$

$$R_{ij} + P_{ij} \leq Cx_{ij} \quad i \in \{0, \dots, 69\}, j \in \{0, \dots, 69\} \quad (8)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad i \in \{0, \dots, 69\}, j \in \{0, \dots, 69\} \quad (9)$$

$$R_{ij} \geq 0 \quad i \in \{0, \dots, 69\}, j \in \{0, \dots, 69\} \quad (10)$$

$$P_{ij} \geq 0 \quad i \in \{0, \dots, 69\}, j \in \{0, \dots, 69\} \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^{69} x_{0i} = 2 \quad (12)$$

VRP Spreadsheet Solver, implementa este modelo a través de un panel de datos básicos en el que se establecen los parámetros: número de depósitos, número de clientes, métodos de cálculo de distancias, la velocidad promedio de la flota, el número de tipos de vehículos, el tipo de ventana de tiempo, modo de ruteo sin entrega y recolección simultánea (Backhauls), menú de opciones de visualización y el tiempo de uso del procesador para llegar al mejor costo estimable de la heurística.

Diseño de un modelo de optimización de rutas (VRP),
para el caso de una empresa de reencauche de
neumáticos.

Figura No.3.3

Sequence	Parameter	Value	Remarks
0.Optional - GIS License	Bing Maps Key		You can get a free key at https://www.bingmapsportal.com/
1.Locations	Number of depots	1	[1,20]
	Number of customers	68	[5,200]
2.Distances	Distance / duration computation	Bird flight distances (km)	Recommendation: use postcodes for addresses
	Bing Maps route type	Shortest	Recommendation: use Fastest
	Average vehicle speed	16	Not used for the 'Bing Maps driving distances' options
3.Vehicles	Number of vehicle types	1	Heterogeneous VRP if greater than 1
4.Solution	Vehicles must return to the depot?	Yes	Open VRP if no return
	Time window type	Hard	
	Backhauls?	No	If activated, delivery locations must be visited before pickup locations
5.Optional - Visualization	Visualization background	Blank	
	Location labels	Location IDs	
6.Solver	Warm start?	Yes	
	Show progress on the status bar?	Yes	May slow down the optimization algorithm
	CPU time limit (seconds)	360	Recommendation: At least 240 seconds

Fuente: VRP Spreadsheet Solver
Elaboración: MPS

Con estos datos de base, se efectúan seis pasos los cuales están contenidos en 6 hojas Excel. La primera en la que se ingresan las coordenadas Y y X del depósito y las coordenadas correspondientes a los clientes, las demandas de recolección, las demandas de entrega, los tiempos de servicio y las ventanas de tiempo por cada cliente, y, si es mandatorio la visita al cliente. El segundo paso consiste en el cálculo de las distancias entre los distintos clientes y el depósito, para lo cual usará cualquiera de los siguientes métodos.

Figura No. 3.4

Manual entry
Euclidian distances
Rounded Euclidian distances
Rectilinear (Manhattan) distances
Bird flight distances (km)
Bird flight distances (miles)
Bing Maps driving distances (km)
Bing Maps driving distances (miles)

Fuente: VRP Spreadsheet Solver
Elaboración: MPS

En el caso del presente estudio se efectuó en primer lugar el cálculo de las distancias a través del método de Manhattan, pero debido a la escala con la que trabajan los mapas de Google Maps, las coordenadas ingresadas dan distancias que deben ser multiplicadas por un factor de 100, para obtener la distancia en Km.

En este sentido una vez calculadas las distancias entre vértices, se ajustó la escala y se la ingresó nuevamente de manera manual en la herramienta. Luego de esto y dado que el cálculo con una escala distinta resultaba en tiempos de viaje distorsionados, se procedió al cálculo de distancias usando la opción distancias a vuelo de pájaro (Bird flight distances), con lo cual se obtuvo tanto distancias como tiempos ajustados para el estudio.

El siguiente paso es el de definir las características de la flota de vehículos, los cuales para el caso de estudio son de un solo tipo, con una capacidad de 50 neumáticos, costos fijos de US\$157,12 por cada viaje, costo variable por kilómetro de US\$0,0788. Se mantuvieron los parámetros prefijados de distancia límite, tiempo de inicio de ruta, el límite de horas de conducción, el límite de horas de trabajo y la restricción de retorno al depósito. En la herramienta excel se colocó como número de vehículos el valor de 10, en representación de los 2 vehículos que desarrollan 2 rutas diarias en 5 días, es decir en una semana se pueden disponer de 10 rutas distintas, 2 por cada día.

El cuarto paso es el de generar la hoja de soluciones, en la cual la misma herramienta despliega una hoja de ruta de cada uno de los 10 vehículos de este estudio. El quinto paso es opcional, y sirve para presentar de manera gráfica los puntos en los que se encuentran ubicados los clientes en un plano cartesiano (x,y).

Finalmente, el sexto paso es la optimización donde en primer lugar el VRP Spreadsheet Solver, hace una evaluación de que los parámetros ingresados cumplan con las restricciones, con lo cual el programa advierte de la posibilidad

de que la solución no cumpla alguna o varias restricciones establecidas. Si no es el caso, se arranca con el procesamiento y la implementación de la heurística descrita en la sección anterior.

Para este estudio se plantearon dos grupos de modelos que permitan comparar el esquema actual de ruteo de vehículos, consistente en rutas fijas exclusivas de recolección, que se repiten de forma semanal; con los resultados de un esquema optimizado de rutas semanales utilizando la heurística ALNS. El segundo modelo sirve para comparar el ruteo semanal exclusivo de recolección del primer grupo, con un modelo de entrega y recolección simultánea; considerando que las demandas de recolección de la semana t corresponden a las demandas de entrega de la semana $t+1$.

Para el primer caso, se crearon los modelos: modelo v1-69cl, modelo v2-69cl, modelo v3-69cl, modelo v4-69cl, modelo v5-69cl. Representando 5 semanas de ruteo del mes de agosto. Para cada una de las semanas se colocó la demanda real de recolección presentada en esa semana para los 69 clientes fijos de las rutas establecidas. Con esto, se procedió a la optimización en cada una de las semanas². Posteriormente se adicionó los costos mínimos generados por cada modelo, las distancias recorridas y la cantidad de llantas recolectadas. Estos valores fueron comparados con la información de costos y distancia recorrida por la flota durante el mes de agosto.

Para el siguiente grupo de modelos se efectuó el mismo procedimiento anterior pero a esto se adicionó a las demandas de recolección semanales, las demandas de entrega semanales.³ Esto de igual forma se comparó con la información real recolectada durante el mes de agosto y con los resultados del primer grupo de modelos. Adicional a esto, en los costos del segundo grupo de modelos se incluyeron los costos que se generaron en el mes de agosto debido

² La primera semana del mes de agosto fue completada con el lunes 31 de julio 2017

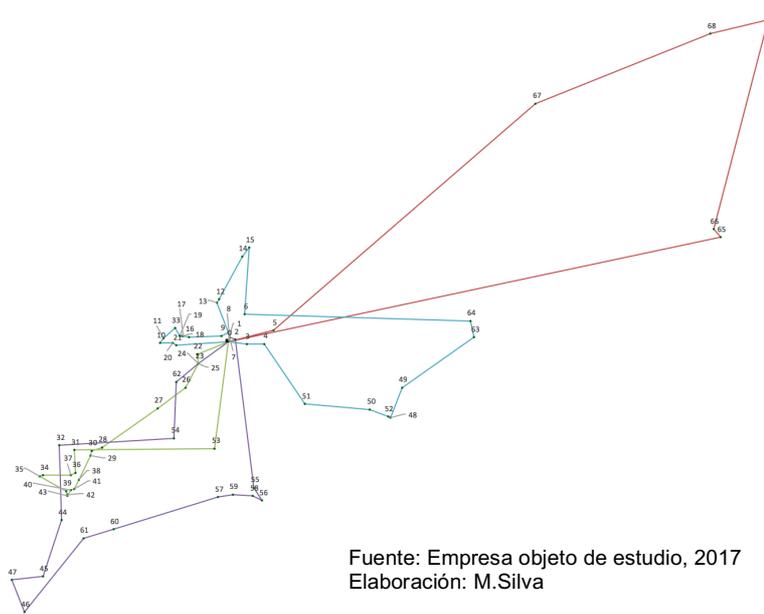
³ Las demandas de entrega de la semana t corresponden a las demandas de recolección del tiempo $t-1$.

Diseño de un modelo de optimización de rutas (VRP), para el caso de una empresa de reencauche de neumáticos.

a que las llantas a entregar al cliente son entregadas a través de un courier privado.

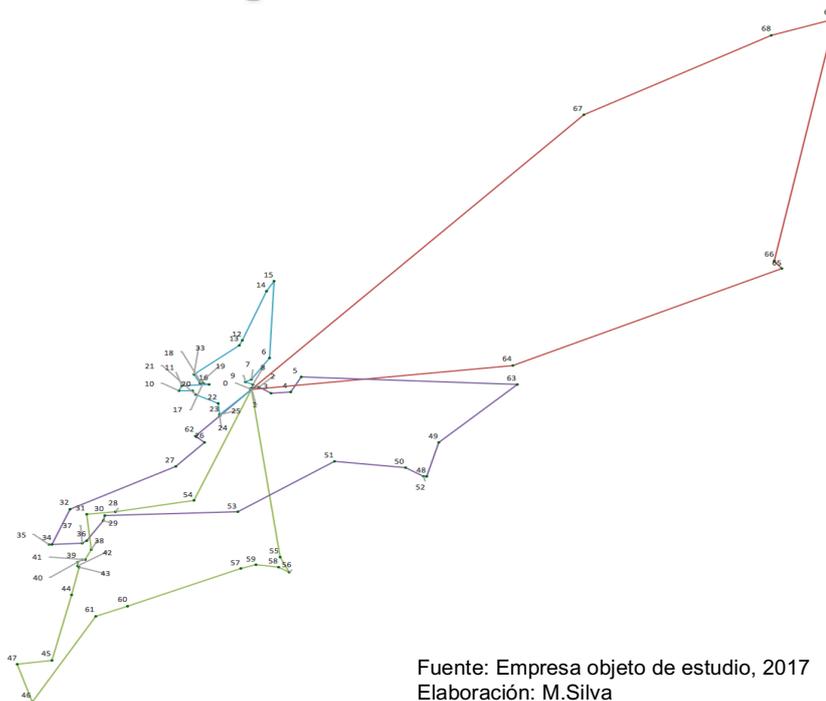
El resultado de la optimización del primer grupo de modelos son las siguientes rutas:

Figura No.3.5 Modelo Recolección-Rutas de la primera semana, 2 camiones por día.



Fuente: Empresa objeto de estudio, 2017
Elaboración: M.Silva

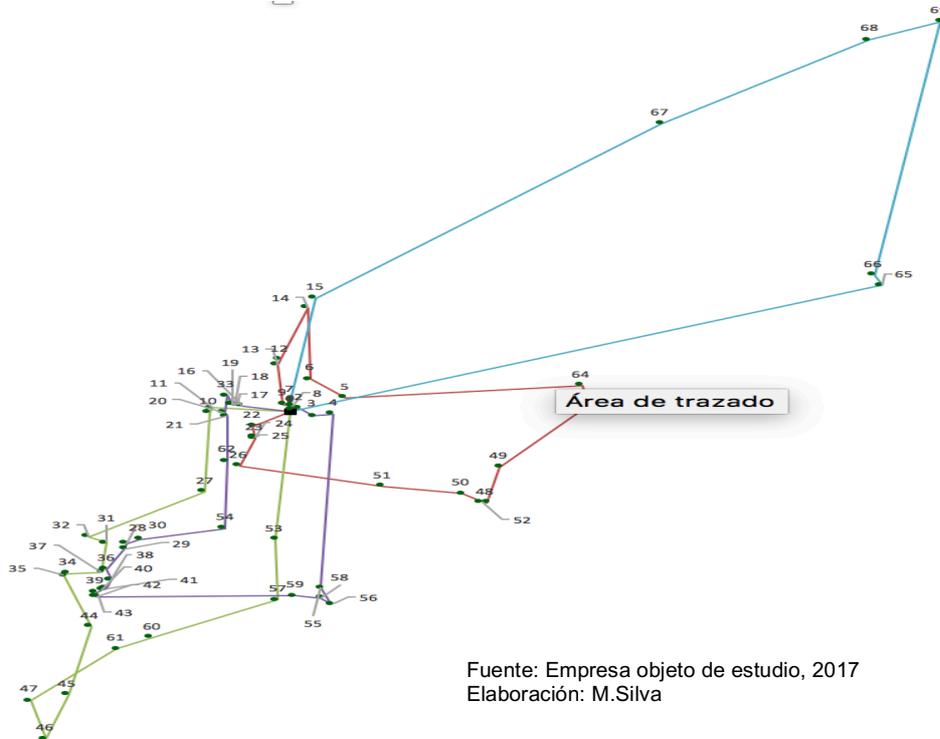
Figura No.3.6 Modelo Recolección-Rutas de la segunda semana, 2 camiones por día.



Fuente: Empresa objeto de estudio, 2017
Elaboración: M.Silva

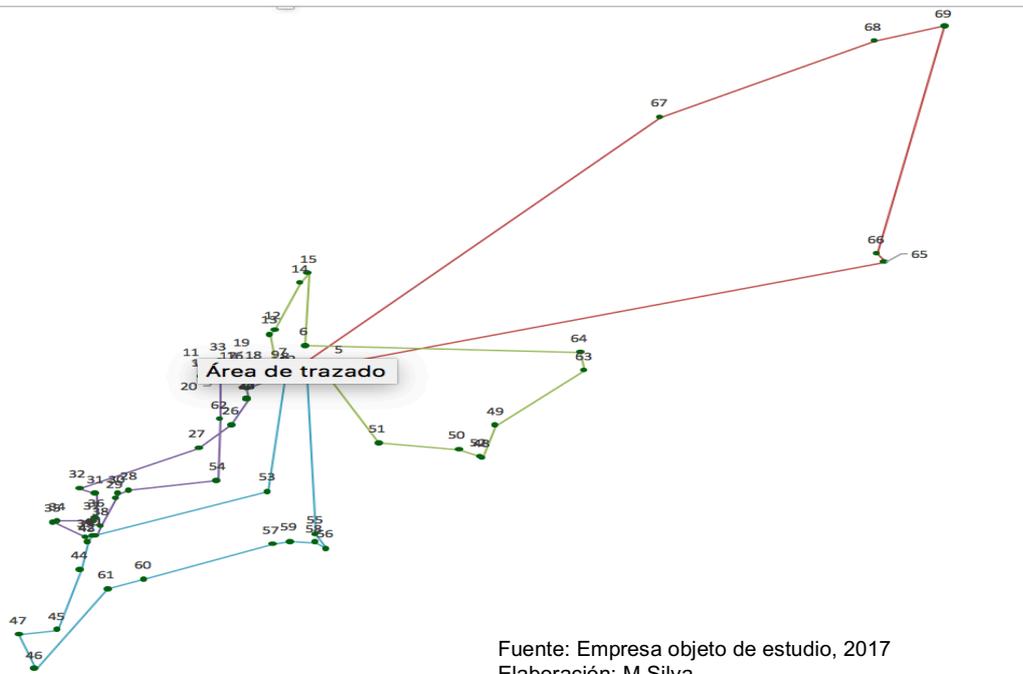
Diseño de un modelo de optimización de rutas (VRP),
para el caso de una empresa de reencauche de
neumáticos.

Figura No.3.7 Modelo Recolección-Rutas de la tercera semana, 2 camiones por día.



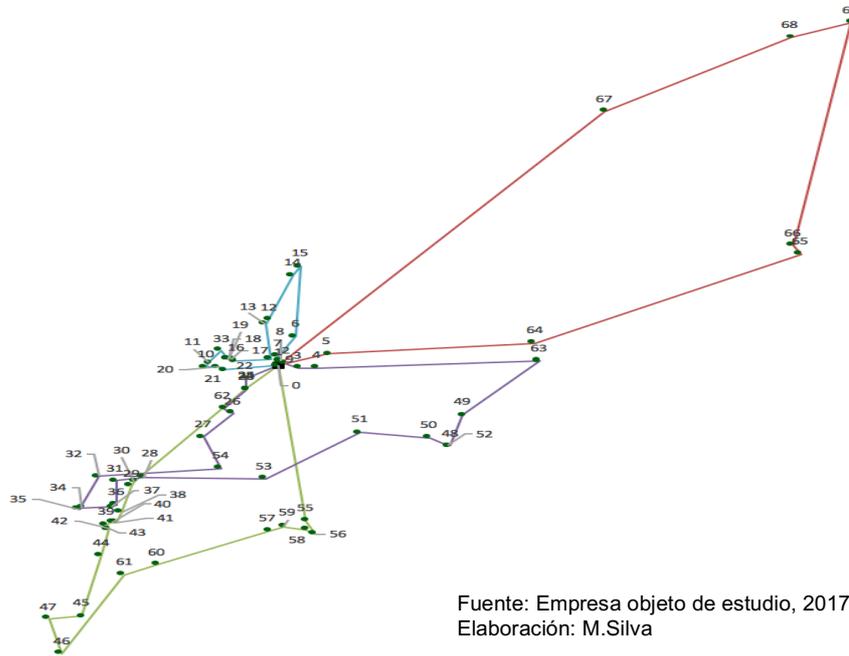
Fuente: Empresa objeto de estudio, 2017
Elaboración: M.Silva

Figura No.3.8 Modelo Recolección-Rutas de la cuarta semana, 2 camiones por día.



Fuente: Empresa objeto de estudio, 2017
Elaboración: M.Silva

Figura No.3.9 Modelo Recolección-Rutas de la quinta semana, 2 camiones por día.

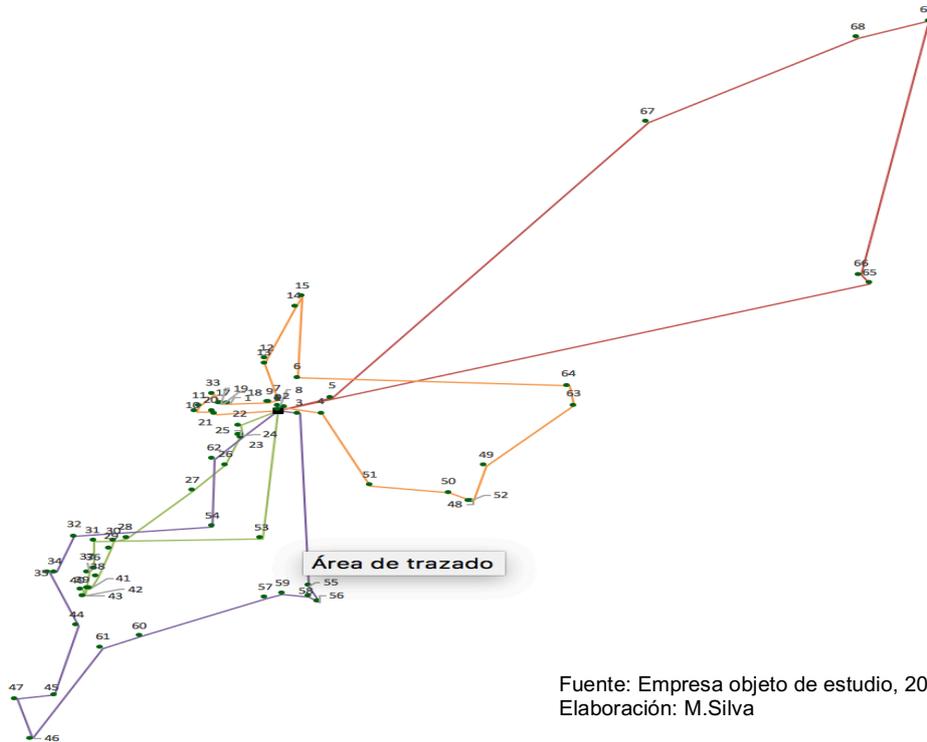


Como se puede observar de las 10 rutas posibles por semana el modelo optimiza el uso de la flota a 4 rutas, es decir el trabajo de ruta de los 2 camiones por dos días. Lo que muestra que el ruteo actual puede ser mejorado.

En el segundo grupo de modelos se incorpora la recolección y entrega simultánea, manteniéndose el resto de parámetros igual que el primer grupo de modelos. El resultado de la optimización heurística es el siguiente para cada una de las 5 semanas.

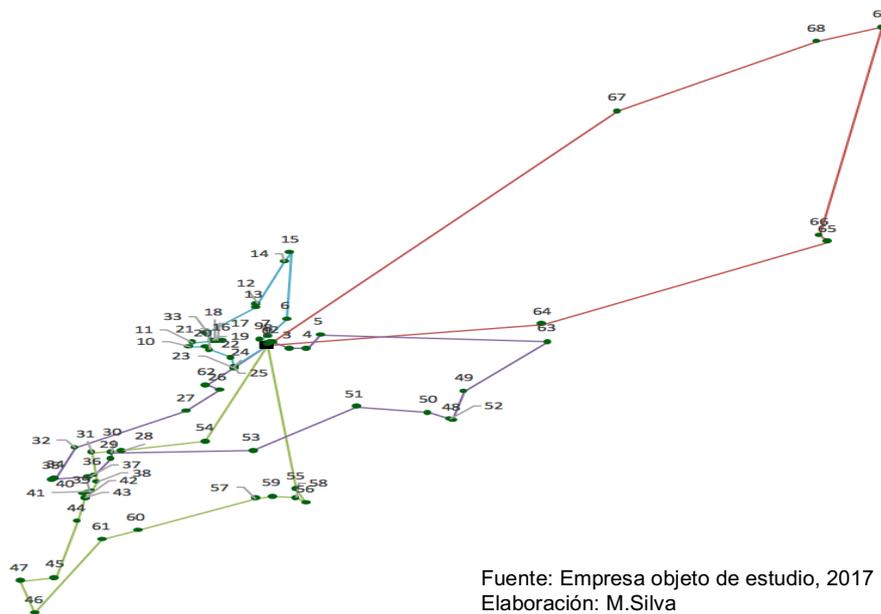
Diseño de un modelo de optimización de rutas (VRP),
para el caso de una empresa de reencauche de
neumáticos.

Figura No.3.10 Modelo Recolección y Entrega-Rutas de la primera semana, 2 camiones por día



Fuente: Empresa objeto de estudio, 2017
Elaboración: M.Silva

Figura No.3.11 Modelo Recolección y Entrega-Rutas segunda semana, 2 camiones por día.



Fuente: Empresa objeto de estudio, 2017
Elaboración: M.Silva

Diseño de un modelo de optimización de rutas (VRP),
para el caso de una empresa de reencauche de
neumáticos.

Figura No.3.12 Modelo Recolección y Entrega-Rutas de la tercera semana, 2 camiones por día.

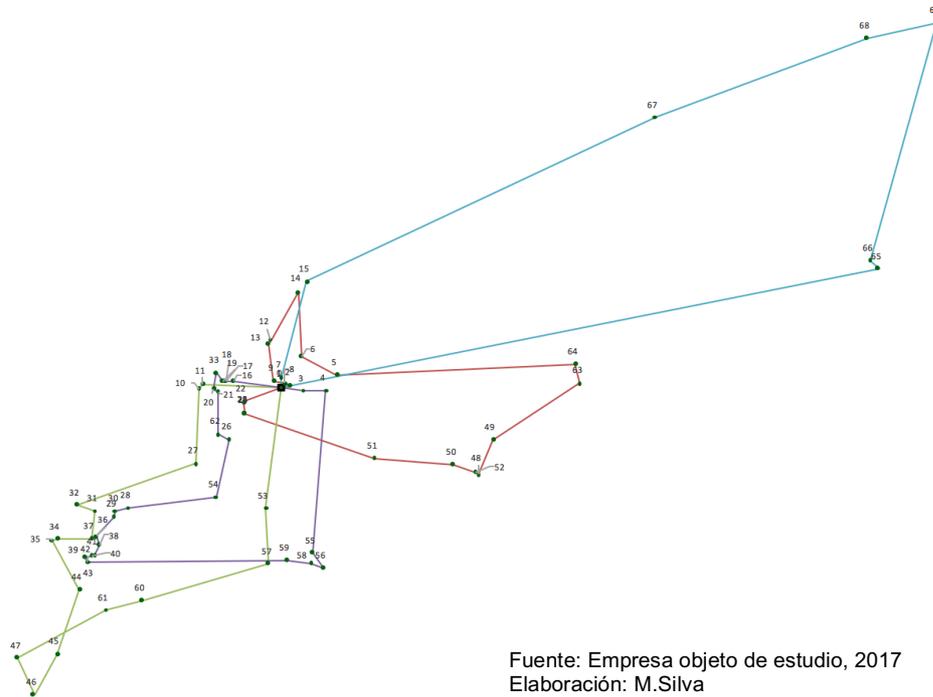
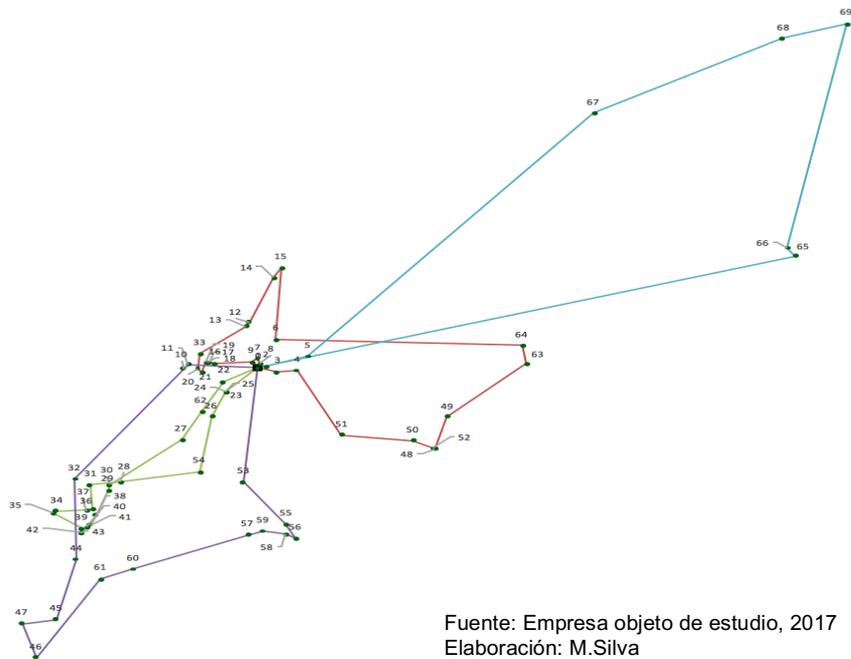
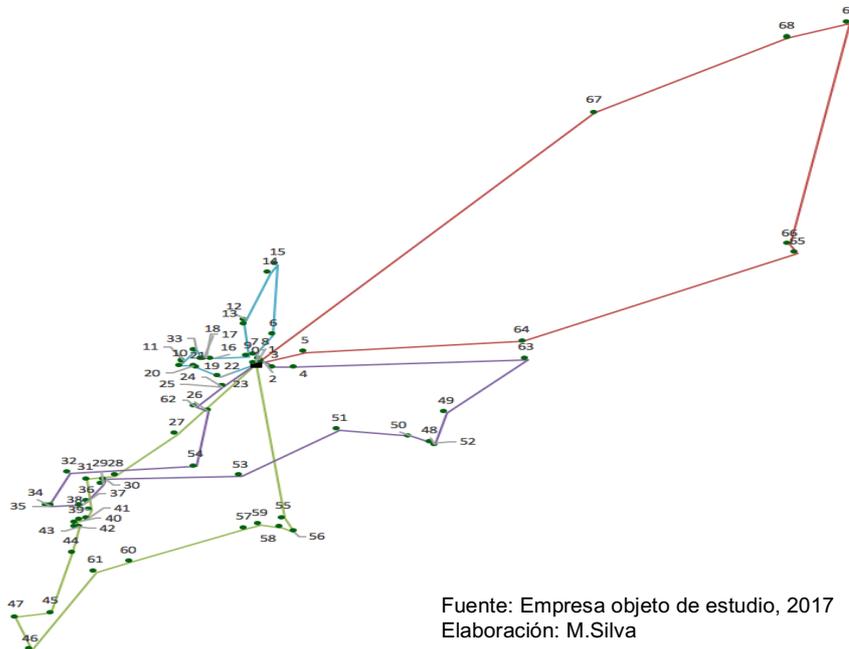


Figura No.3.13 Modelo Recolección y Entrega-Rutas de la cuarta semana, 2 camiones por día.



Diseño de un modelo de optimización de rutas (VRP), para el caso de una empresa de reencauche de neumáticos.

Figura No.3.14 Modelo Recolección y Entrega-Rutas de la quinta semana, 2 camiones por día.



Fuente: Empresa objeto de estudio, 2017
Elaboración: M.Silva

En términos comparativos los resultados de los distintos modelos en cuanto a costos, distancias, número de neumáticos entre otros se los presenta en el cuadro siguiente.

Cuadro 3.1
Cuadro de Resultados

Concepto	Estado Actual	Grupo I: Modelos Recolección	Grupo II: Modelos entrega y recolección
Costos flota propia	4.208,12	3.314,05	3.471,13
Costos flota propia + operador externo	5.174,12	4.280,05	3.471,13
Distancia	4.406,34	2.178,33	2.176,36
Recolección	283,00	283,00	283,00
Entrega	-	-	296,00
Costo por neumático	18,28	15,12	6,00
Costo total por Km. (US\$/Km.)	0,85	0,51	0,63
Número de rutas X semana	10,00	4,00	5,00
Eficiencia de flota	8%	19%	31%
Máximo de llantas en total rutas	3.750,00	1.500,00	1.875,00

Fuente: VRP Spreadsheet Solver
Elaboración: MPS

CAPÍTULO IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de la aplicación de los modelos, muestran que en general el uso de la heurística ALNS entrega rutas de menor costo y menor distancia recorrida, por lo tanto mayor eficiencia en el uso de la flota. Además, muestra el bajo porcentaje de ocupación de la flota ya que en todos los casos en el grupo de modelos de solo recolección, se optimiza con el uso de 4 rutas, y en el grupo de modelos de entrega y recolección simultánea en 5 rutas; esto significa que efectuando las rutas del modelo en dos días los dos camiones pueden cumplir con las demandas de recolección dadas las restricciones establecidas. Y, en el caso de entrega y recolección se hacen todas las entregas en 2 vehículos, 2 días y un vehículo adicional un día.

Considerando el esquema de ruteo actual los resultados comparativos del primer grupo de modelos optimizados usando ALNS, arrojan una reducción de costos del 21%, debido principalmente a una distancia 51% menor de kilómetros recorridos. Además, el costo por neumático cae en 17% y el costo por Km. en 40%. La eficiencia de la flota medida como el porcentaje de llantas transportadas sobre el número de llantas potencial a ser transportadas en el número de rutas establecidas, sube del 8% al 19%.

Adicionalmente, se observar el sobre dimensionamiento de la flota puesto que de las 10 rutas disponibles por semana solo se usan las dos unidades dos días por semana, con un nivel de utilización promedio por mes de 19% de la capacidad total de las dos unidades. Por esta razón se planteó el segundo modelo a evaluar, que considera recolección y entrega simultánea.

Para el segundo grupo de modelos de recolección y entrega simultanea se utilizan como demandas de entrega en la semana t las demandas de recolección de la semana $t-1$. Este segundo grupo de modelos comparado con el primer

grupo de modelos exclusivos de recolección, resulta en un ahorro de 33% con respecto a los costos de la situación actual sin optimización y ahorro de 19% con respecto al modelo optimizado actual de solo recolección. Es importante señalar el significativo incremento del porcentaje de utilización del 19% en el modelo exclusivo de recolección optimizado, versus el 31% en el modelo de recolección y entrega simultánea, destaca que solo la optimización de la situación actual incrementa del 8% al 19% la eficiencia de la flota.

4.2. RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos, se recomienda una modificación del esquema de ruteo que actualmente se implementa en la empresa. Las alternativas que pueden dar resultados significativos, el sistema de ruteo semanal usando la herramienta VRP Spreadsheet Solver, puede reducir la distancia recorrida y minimizar los costos como mostraron los resultados del primer grupo de modelos, exclusivo de recolección.

La otra alternativa que tiene la posibilidad de mejorar aún más la logística de la empresa es la utilizar un modelo de entrega y recolección simultánea con la finalidad de elevar el porcentaje de utilización de la flota, el cual como se observo tiene un porcentaje bastante bajo, con el modelo de entrega y recolección simultaneo se puede incrementar considerablemente.

Finalmente, se pueden explorar con el uso de la herramienta VRP Spreadsheet Solver, en un esquema de programación diaria de rutas, incluyendo en el sistema de ruteo la confirmación previa de parte de los asesores comerciales de la cantidad de neumáticos a ser recolectados previo a la programación de rutas, esto se espera que reduzca el número de paradas en falso, donde no se recolecta ningún neumático.

BIBLIOGRAFÍA

- Baldacci, R., Mingozzi, A., & Roberti, R. (2012). Recent exact algorithms for solving the vehicle routing problem under capacity and time window constraints. *European Journal of Operational Research*, 218(1), 1–6. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.07.037>
- Bustos, M., & Pinilla, A. (2016). *ESTUDIO Y DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA EL PROBLEMA DE RUTAS ESCOLARES (SBRP)*. Universidad Industrial de Santander.
- Cordeau, J.-F., Laporte, G., Savelsbergh, M. W. P., & Vigo, D. (2007). Chapter 6 Vehicle Routing, 14(6), 367–428. [http://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)14006-2](http://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)14006-2)
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, 6(1), 80–91. <http://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80>
- Delgado Bravo Erwin. (2007). *El Problema de la Recolección de Desechos Hospitalarios en la Ciudad de Guayaquil, Modelación y Resolución por Medio de una Heurística Basada en la Búsqueda Tabú*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Erdoğan, G. (2017). An open source Spreadsheet Solver for Vehicle Routing Problems. *Computers and Operations Research*, 84, 62–72. <http://doi.org/10.1016/j.cor.2017.02.022>
- Fernández Arias, A., & Allende Alonso, S. M. (2013). *Modelos y Métodos para el Problema de Enrutamiento de Vehículos con Recogida y Entrega Simultánea*. Universidad de la Habana. Retrieved from https://www.academia.edu/4669288/Problema_de_Enrutamiento_de_Vehiculos_con_Recogida_y_Entrega_Simultanea
- Golden, B., Raghavan, S., & Wasil, E. (2008). *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*. *Information Systems Journal* (Vol. 43). <http://doi.org/10.1007/978-0-387-77778-8>
- Gonzalez, G., & Gonzalez, F. (2006). Metaheurísticas aplicadas al ruteo de vehículos. Un caso de estudio. Parte 1: formulación del problema. *Ingeniería E Investigación*, 26(3), 149–156. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64326319>

- Hernández Yimy Alexander. (2016). *Diseño de un Sistema de Ruteo de Vehículos con Múltiples Depósitos en Empresas de Transporte de Carga por Carreteras*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Lutz, R. (2014). Adaptive Large Neighborhood Search.
- Mediorreal, A. (2014). *Modelo de ruteo de vehículos para la distribución de las empresas Laboratorios Veterland, Laboratorios Callbest y Cosméticos Marliou Paris* Directora : María Paula Ramírez PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL BOGOTÁ 201. Pontificia Universidad Javeriana.
- Mehrjerdi, Y. Z. (2012). Vehicle Routing Problem: Meta-heuristic Approaches, 2(3), 55–68.
- Min, H. (1989). the Multiple Vehicle Routing Problem With Simultaneous Delivery and Pick ~ Up Points. *Transpn.Res.-A.*, 23(5), 377–386.
- Rodríguez, J. (2011). *Caracterización, Modelado y Determinación de las Rutas de la Flota en una Empresa de Rendering*.
- Taha, H. a. (2012). *Investigación de operaciones - Modelo de transbordo. Investigación de Operaciones* (2011th ed.). México: Pearson Educacion. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Tan, K. C., Lee, L. H., Zhu, Q. L., & Ou, K. (2001). Heuristic methods for vehicle routing problem with time windows. *Artificial Intelligence in Engineering*, 15, 281–295.
- Wassan, N., & Nagy, G. (2014). Vehicle Routing Problem with Deliveries and Pickups: Modelling Issues and Meta-heuristics Solution Approaches. *International Journal of Transportation*, 2(1), 95–110. <http://doi.org/10.14257/ijt.2014.2.1.06>

ANEXOS

Anexo1. Flujograma de Recolección y entrega

