

**LOCALIZACIÓN Y RUTEO DE VEHÍCULOS PARA LA
RECOLECCIÓN DE ACEITE AUTOMOTOR USADO EN LA CIUDAD
DE GUADALAJARA DE BUGA**

**JOHN ALEJANDRO GUEVARA ARROYAVE
JUAN CAMILO LÓPEZ CÓRDOBA**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
GUADALAJARA DE BUGA
2019**

**LOCALIZACIÓN Y RUTEO DE VEHÍCULOS PARA LA
RECOLECCIÓN DE ACEITE AUTOMOTOR USADO EN LA CIUDAD
DE GUADALAJARA DE BUGA**

**JOHN ALEJANDRO GUEVARA ARROYAVE
JUAN CAMILO LÓPEZ CÓRDOBA**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Industrial

Mario José Basallo Triana
MSc., Ingeniería Industrial

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
GUADALAJARA DE BUGA
2019

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Guadalajara de Buga, 2019

DEDICATORIA

A mi madre Rosalba Arroyave por brindarme su apoyo incondicional durante mi proceso de formación al igual que durante toda mi vida y darme motivación para alcanzar mis metas.

A mi padre Jhon Harold Guevara por exigirme siempre y motivarme a ser mejor.

A mi Abuela Asceneth Álvarez por ayudarme siempre en lo que he necesitado.

John Alejandro Guevara Arroyave

Quiero expresar mi gratitud a Dios, quien con su bendición llena siempre mi vida y a toda mi familia por estar siempre presentes.

A mis padres Gloria Córdoba y Juan Fernando López por su cariño incondicional y su apoyo durante todo este proceso, por los consejos recibidos y por ser los principales promotores de este sueño.

A mi abuelo Gerardo Córdoba por todas las enseñanzas y el apoyo que siempre me ha brindado a lo largo de toda la vida.

Finalmente quiero hacer una dedicatoria a todas las personas que de alguna u otra forma intervinieron en este proceso y que hacen que hoy cumpla un objetivo de vida más, gracias por su apoyo.

Juan Camilo López Córdoba

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres por su apoyo, paciencia y amor, por ayudarme siempre a ser mejor persona.

Agradezco a mis abuelos por estar siempre para mí en los momentos difíciles, por sus lecciones y cariño incondicional durante mi formación como persona.

A mi compañero Juan Camilo por estar en las buenas y en las malas.

Agradezco a todas aquellas personas que me han dejado enseñanzas positivas y que han creído en mí.

John Alejandro Guevara Arroyave

Quiero agradecer en primer lugar a Dios por esta experiencia y este nuevo triunfo.

Gracias a mis padres y familiares más cercanos por el apoyo recibido durante todo el proceso y por creer siempre en mí y no dejarme desfallecer en los momentos más difíciles.

Gracias a mi compañero Alejandro por su apoyo y esfuerzo en este proceso.

Gracias a la Universidad del Valle y a los docentes que hicieron su aporte en mi formación integral como profesional y como persona.

Juan Camilo López Córdoba

CONTENIDO

CONTENIDO	6
INDICE DE TABLAS	8
INDICE DE FIGURAS	9
INDICE DE ANEXOS	10
1 RESUMEN	12
2 INTRODUCCIÓN	13
3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
3.1 Descripción de la situación problemática	14
3.2 Pregunta de investigación.....	16
4 OBJETIVOS.....	17
4.1 General.....	17
4.2 Específicos.....	17
5 JUSTIFICACIÓN	18
6 MARCO TEÓRICO	19
6.1 Residuos peligrosos (RESPEL)	19
6.2 Aceites Lubricantes.....	19
6.2.1 Aceite lubricante usado tratado	21
6.2.2 Aceite lubricado sin tratamiento	21
6.3 Problema de localización de instalaciones.....	21
6.3.1 Métodos exactos.....	23
6.3.2 Métodos multi-criterio.....	24
6.4 Problema de ruteo de vehículos.....	26
6.4.1 Problema del agente viajero TSP	28
6.4.2 Problema de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad de flota heterogénea (FSMVRP)	29
6.5 Problema de localización y ruteo de vehículos	29
7 METODOLOGÍA	32
7.1 Etapa 1	33
7.2 Etapa 2	34
7.3 Etapa 3	36

7.3.1	Método de Carga-Distancia.....	38
7.3.2	Método Centro de Gravedad.....	39
7.3.3	AHP (Analytic Hierarchy Process)	41
7.4	Etapas 4	44
8	CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA	45
8.1	Generadores de residuos.....	45
8.2	Transporte.....	46
8.3	Centro de acopio	47
8.4	Ruteo de vehículos	48
8.4.1	Conjuntos:	49
8.4.2	Parámetros	49
8.4.3	Variables.....	49
8.4.4	Función objetivo	49
8.4.5	Restricciones.....	49
9	RESULTADOS	51
9.1	Identificación de los establecimientos generadores	51
9.1.1	Zona norte	52
9.1.2	Zona sur.....	53
9.1.3	Zona central.....	54
9.2	Recolección de información para modelo matemático.....	55
9.2.1	Cantidades de aceite generadas.....	55
9.2.2	Distancias de ruta calculadas.....	57
9.2.3	Localizaciones potenciales	58
9.2.3.1	Método de carga-distancia.....	58
9.2.3.2	Método de centro de gravedad	62
9.2.3.3	Proceso de análisis jerárquico-AHP.....	64
9.3	Modelo matemático	67
9.4	Resultados computacionales.....	68
9.4.1	Depósito potencial 1	68
9.4.2	Depósito potencial 2	71
9.4.3	Depósito potencial 3	74
9.4.4	Deposito potencial 4	77
10	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	80

11 CONCLUSIONES	84
12 REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍA	85

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Consolidado de cantidades generadas.	35
Tabla 2. Localizaciones potenciales para centro de acopio	37
Tabla 3. Escala numérica de comparación por pares de Saaty.	42
Tabla 4. Consolidado de información técnica de vehículos seleccionados.....	47
Tabla 5. Establecimientos vinculados al proyecto.....	52
Tabla 6. Consolidado de distancias.....	58
Tabla 7. Matriz de cargas Lij.....	59
Tabla 8. Matriz de distancias Dij.....	60
Tabla 9. Matriz de carga-distancia LD.....	61
Tabla 10. Componentes del centro de gravedad.	62
Tabla 11. Comparación de criterios de decisión.	65
Tabla 12. Evaluación de criterios mediante escala de Saaty.....	65
Tabla 13. Datos para comparación de alternativas.	66
Tabla 14. Vector decisión.....	66
Tabla 15. Resultados de Neos – Carga distancia 1.	69
Tabla 16. Resultados de Neos – Carga distancia 2.	71
Tabla 17. Resultados de Neos - Método AHP.....	75
Tabla 18. Resultados Neos - Método Centro de Gravedad.....	77
Tabla 19. Comparación de resultados.	80

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Base matemática de los métodos multi-criterio.....	25
FIGURA 2. Representación general del proceso MCDA.	25
FIGURA 3. Métodos de solución para el VRP.	27
FIGURA 4. Flujograma de actividades.....	32
FIGURA 5. Cálculo de distancia mediante Google Maps.	36
FIGURA 6. Cálculo de coordenadas mediante el software Grafos.	40
FIGURA 7. Estructura jerárquica del modelo AHP.....	42
FIGURA 8. Nodos generadores de residuos de aceite automotor en la ciudad de Buga.....	46
FIGURA 9. Localizaciones potenciales para el centro de acopio.	48
FIGURA 10. Establecimientos de la Zona norte.....	53
FIGURA 11. Establecimientos de la zona sur.....	53
FIGURA 12. Establecimientos de la zona central.....	54
FIGURA 13. Concentración de establecimientos por zonas.....	55
FIGURA 14. Total, de residuos generados en un mes.....	56
FIGURA 15. Porcentajes de aceite generados por zona	57
FIGURA 16. Establecimientos seleccionados para modelación matemática.	62
FIGURA 17. Localización del centro de gravedad calculado.	63
FIGURA 18. Centro de gravedad aproximado.	64
FIGURA 19. Estructura jerárquica del problema.	64
FIGURA 20. Depósito potencial calculado mediante AHP.	67
FIGURA 21. Ruta 1 del vehículo AYCO. Metodología carga-distancia 1.....	69
FIGURA 22. Ruta 2 del vehículo AYCO. Metodología carga-distancia 1.....	70
FIGURA 23. Ruta 1 del vehículo K2500. Metodología carga-distancia 1.	71
FIGURA 24. Ruta 1 del vehículo AYCO. Metodología carga-distancia 2.....	72
FIGURA 25. Ruta 2 del vehículo AYCO. Metodología carga-distancia 2.....	73
FIGURA 26. Ruta 1 del vehículo K2500. Metodología carga-distancia 2.....	74
FIGURA 27. Ruta 1 del vehículo AYCO. Metodología AHP.	75
FIGURA 28. Ruta 2 del vehículo AYCO. Metodología AHP.	76
FIGURA 29. Ruta 1 del vehículo K2500. Metodología AHP.	76
FIGURA 30. Ruta 1 del vehículo AYCO. Metodología centro de gravedad.....	78
FIGURA 31. Ruta 2 del vehículo AYCO. Metodología centro de gravedad.....	78
FIGURA 32. Ruta 1 del vehículo K2500. Metodología centro de gravedad.	79
FIGURA 33. Costos totales obtenidos.....	81
FIGURA 34. Tiempos computacionales de ruteo.....	82

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Formulario Inicial para la recolección de información.....	88
Anexo 2. Formulario definitivo para la recolección de información del aceite automotor usado. .	89
Anexo 3. Cantidades generadas por establecimientos.....	90
Anexo 4. Comparación de alternativas.....	114

1 RESUMEN

Actualmente las grandes cantidades de residuos de aceite automotor que se generan en las ciudades representa una problemática ambiental importante debido a la mala gestión y disposición final que tienen estos al final de su vida útil, afectando el aire debido a la quema indiscriminada de filtros y malos usos industriales que se le da al aceite y a que una gran cantidad de estos residuos peligrosos terminan se vierten en las redes de alcantarillado contaminando fuentes hídricas y subterráneas y afectando la calidad del suelo debido a la gran cantidad de contaminantes propios de su composición.

El objetivo del presente trabajo es la formulación de un modelo logístico para la localización y el ruteo de una flota de vehículos heterogénea con capacidad limitada que permita atender la demanda de los puntos generadores de residuos en la ciudad y generar soluciones a la problemática de la recolección de aceite automotor en la ciudad de Guadalajara de Buga.

Para ello se hace uso de diferentes metodologías de localización y ruteo consultadas en la literatura que permitieron obtener diferentes resultados y evaluarlos con el objetivo de determinar la mejor solución en términos de costos y tiempos computacionales del problema planteado.

Los resultados obtenidos indican que teniendo en cuenta la demanda de las cantidades generadas y las distancias de ruta de los vehículos es muy factible implementar modelos que permitan tener una adecuada recolección y gestión de los residuos que se generan en la ciudad con muy buenos resultados en términos de costos de ruta. Se podrían realizar investigaciones adicionales en las cuales se aborde el problema de manera integral y no por separado como se realizó en este caso donde primero se evaluó la localización y luego el ruteo debido a limitaciones computacionales y obtener posibles mejores resultados que confirmen la factibilidad de implementar un modelo de recolección con el que actualmente no se cuenta en Buga.

Palabras clave: logística inversa, modelo logístico, ruteo de vehículos, localización, residuos, aceite automotor.

2 INTRODUCCIÓN

Dentro de las diferentes estrategias competitivas que utilizan las empresas hoy en día con el fin de ganar mayor mercado y hacer un uso más eficiente de los recursos se encuentra el manejo de la logística de forma integral, evolucionando y dejando de ser concebida como un proceso de distribución de bienes o servicios hasta un cliente final pasando a convertirse en toda una gestión de cadenas de suministro, llegando así a la necesidad de implementar la logística inversa de los desechos generados por el proceso productivo y los diversos productos que llegan al final de su vida útil, con el fin de reutilizar o disponer adecuadamente los materiales que los componen y aportar al medio ambiente.

Anualmente debido a las actividades de cambio de aceite automotor se generan en Colombia miles de toneladas de residuos derivados. La inadecuada disposición final que están teniendo estos residuos genera una problemática ambiental debido a los componentes nocivos que se encuentran en los aceites usados y los impactos que estas sustancias tienen al entrar en contacto con el medio ambiente y con los seres vivos.

Las principales causas para implementar un sistema que asegure la adecuada recolección de residuos de aceite automotor usado son entre otras el peligro que supone dicho residuo para la salud de los seres vivos, los graves impactos ambientales que produce y las grandes cantidades de aceite usado que se pueden reutilizar en distintas actividades industriales y que suponen una oportunidad desde diferentes panoramas.

El siguiente documento plantea la creación de una red logística que permita una adecuada recolección de los residuos de aceite automotor usado generado en los establecimientos de Guadalajara de Buga haciendo uso de metodologías que permitan solucionar el problema de localización y ruteo de vehículos con capacidad.

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1 Descripción de la situación problemática

En los últimos años el interés por implementar y promover diferentes estrategias que apunten a un desarrollo sostenible en un contexto global ha ido incrementando. Cada vez es más común escuchar sobre estrategias de gestión de la cadena de suministro con énfasis en la recuperación de productos que finalizan su vida útil, empaques o residuos cuya disposición final inadecuada es causante de diversos impactos ambientales negativos y que representan oportunidades para las empresas a nivel de costos y productividad. Los residuos de aceite automotor se consideran residuos peligrosos debido a los altos impactos ambientales que tienen al entrar en contacto con las redes de alcantarillado, contaminando fuentes de agua dulce, su incorrecta disposición final en suelos y rellenos sanitarios generan lixiviados que tienen la capacidad de penetrar el subsuelo contaminando fuentes de agua subterránea. Actualmente no se dispone de una gestión adecuada de los residuos de aceite generados y esto se debe en gran medida a los altos costos en que se debe incurrir para lograr una óptima disposición de estos residuos.

Estos procesos de recuperación se pueden enmarcar dentro del concepto conocido como logística inversa, la cual se define según Roberts y Tibben Lembeke (2002) como “el proceso de planificación, ejecución y control de la eficiencia y eficacia del flujo de las materias primas, inventario en proceso, productos terminados e información relacionada, desde el punto de consumo hasta el punto de origen, con el fin de recuperar valor o la correcta eliminación”.

Se estima que el consumo de aceite automotor en Colombia es de aproximadamente 40.000.000 de galones anuales. La cantidad de aceite que no se recolecta es muy alta, según la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética), en el 2008 el FAU (Fondo de Aceites Usados) entidad encargada de la gestión y recolección del residuo advierte que sólo el 34,1% fue recolectado en el país. Estadísticas muestran que en promedio un motor consume alrededor del 40% del aceite y el 60% restante se utiliza en diversas actividades y puede ser reutilizable (BORSI, 2012)¹. Solo en el departamento del Valle del Cauca en promedio se generan anualmente unas 16.070 toneladas de aceites automotor usado (CVC, 2012)². A pesar de las oportunidades que ofrece esta problemática en materia de reutilización y aprovechamiento, el panorama en Colombia no es el mejor pues por lo general su indebida disposición final hace que aproximadamente el 26% del

¹ Bolsa Nacional de Residuos y Subproductos Industriales

² Corporación Autónoma Regional Del Valle Del Cauca

aceite automotor usado finalice en las redes de alcantarillado. Por otro lado la quema indiscriminada de filtros y residuos genera más de 150 toneladas de contaminantes atmosféricos al año (Min ambiente, 2006)³ convirtiéndose en la actividad que más plomo libera al ambiente superando cualquier otra fuente industrial según la EPA⁴, además un gran porcentaje de aceite usado va a parar a rellenos sanitarios, contaminando suelos y fuentes hídricas subterráneas. Otra de las grandes problemáticas con los residuos de aceite es la falsificación de lubricantes, esto afecta directamente a las compañías productoras de este sector pues se estima que aproximadamente el 20% del total de los lubricantes que se encuentra en el mercado colombiano es adulterado.

Se debe tener en cuenta que las características de los productos y el flujo de los mismos son completamente diferentes en la logística reversiva que en la tradicional, en consecuencia, las técnicas y estrategias difieren para cada tipo de cadena de abastecimiento. Sin embargo, una de las necesidades más sobresalientes dentro de la logística inversa es la reducción de los altos costos de transporte y la problemática de las economías de escala con volúmenes pequeños y de orígenes dispersos que no permiten una adecuada gestión de los residuos para su llegada a los centros de acopio, esto ha provocado el surgimiento de estrategias que hoy se consideran fundamentales.

La logística considera tres niveles de planeación basados en el horizonte de tiempo del proceso de toma de decisiones, estos niveles son estratégico, táctico y operativo, con horizontes de un año, menores a un año y escalas de tiempo menor como lo son semanas, días e incluso horas respectivamente. En la práctica la problemática de localización y ruteo han sido estudiadas de manera independiente. Sin embargo, recientemente se han publicado algunos trabajos que demuestran que la integración de estas dos decisiones proporciona mejores resultados en términos de eficiencia en las cadenas de suministro. Diversas investigaciones han considerado la problemática conjunta de localización y ruteo con flota homogénea a pesar de ser un caso inusual en la práctica. El problema de localización de instalaciones está asociado a decisiones de apertura, ubicación y asignación de clientes a depósitos. Por otro lado, el ruteo de vehículos (VRP) responde al desarrollo de un conjunto de rutas, minimizando el costo de la distancia total recorrida para satisfacer la demanda de los clientes. Los problemas de esta naturaleza se conocen como LRP (Location Routing Problems) e integran las problemáticas mencionadas anteriormente. Este tipo de problema según Ballou, 2004 varía dependiendo de las condiciones y las restricciones en las que se opere, las cuales pueden ser: la cantidad y capacidad de los vehículos, la demanda variable, la existencia de ventanas de tiempo, la cantidad de depósitos con las que

³ Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

⁴ Agencia de Protección Ambiental

se cuenta, entre otros. Algoritmos exactos han sido capaces de demostrar optimalidad para instancias pequeñas (menos de 100 clientes) para el LRP. Por esta razón y gracias a los avances computacionales se han utilizado algoritmos heurísticos y meta heurísticos para resolver escenarios de mayor tamaño y obteniendo soluciones óptimas y con tiempos computacionales menores a los obtenidos en los algoritmos exactos. Para la mayoría de los problemas LRP el número de vehículos es variable considerando una flota homogénea. De ahí que la literatura es escasa en cuanto a problemas con flota heterogénea y con decisiones de localización y ruteo simultáneamente.

Según lo expuesto anteriormente es necesario tener consideraciones como la capacidad de los vehículos y de los puntos de almacenamiento, así como la flota de transporte que se va a utilizar y las rutas asignadas para todo el sistema con el objetivo de diseñar una red logística que permita minimizar los costos de localización y transporte asociados a la recolección de residuos de aceite en la ciudad de Guadalajara de Buga.

3.2 Pregunta de investigación

- ¿Cómo diseñar una red logística que permita la recolección y almacenamiento del aceite automotor usado generado en los establecimientos dedicados al cambio de aceite en la ciudad de Guadalajara de Buga?

4 OBJETIVOS

4.1 General

Diseñar una red logística que permita minimizar los costos asociados a la localización de un depósito y la recolección de los residuos de aceite automotor usado generados en los establecimientos de la ciudad de Guadalajara de Buga.

4.2 Específicos

1. Identificar y caracterizar los establecimientos en los cuales se realizan actividades de cambio de aceite.
2. Proponer un modelo matemático para configurar una red logística para la óptima recolección del aceite usado.
3. Validar el modelo a través de un caso de estudio en la ciudad de Guadalajara de Buga.

5 JUSTIFICACIÓN

Según la agencia de protección ambiental (EPA) la mala gestión del aceite automotor usado genera más contaminantes que cualquier otra fuente industrial, los cuales contaminan la atmósfera, los suelos y las fuentes hídricas tanto superficiales como subterráneas.

A pesar de ser una problemática que tiene grandes impactos negativos tanto para el ambiente como para la salud de las personas y demás seres vivos, actualmente en Colombia no se controla de manera adecuada, esto ha venido generando graves impactos medioambientales y repercusiones en la salud de la población, además de que se desaprovechan grandes oportunidades económicas relacionadas con la reutilización de dicho residuo.

A partir de lo anterior nace la principal motivación para la realización de este proyecto, la cual es contribuir al medio ambiente de la región del Valle del Cauca mediante la solución de un problema relativamente novedoso en el área de la logística como lo es el problema de localización y ruteo de vehículos con capacidad (CLRP por sus siglas en inglés), este problema considera la localización y el ruteo de manera conjunta y no de forma independiente como en la mayoría de estudios relacionados, esto también genera motivación en la realización del proyecto ya que permite utilizar los conceptos de la ingeniería industrial obtenidos a lo largo de la carrera en una nueva línea de investigación que considera la importancia que tiene la toma de decisiones estratégica y operativa de manera conjunta.

6 MARCO TEÓRICO

En esta sección se establecen los factores que intervienen en lo que se refiere a la localización de instalaciones para acopio de residuos peligrosos generados en las actividades de cambio de aceite en términos sociales, ambientales y conceptuales. También se presentan los conceptos y metodologías en los cuales se sustentó el presente trabajo, dichos métodos fueron compilados a partir de diversas fuentes académicas confiables y con base en ello se seleccionaron los objetivos planteados para el proyecto, tomando como eje central las siguientes temáticas:

- Problema de localización de instalaciones.
- Problema de ruteo de vehículos.
- Problema de localización y ruteo de vehículos con restricciones de capacidad.

A partir de la compilación realizada se establecieron los antecedentes de las temáticas tratadas en el presente proyecto y se logró esclarecer las dudas acerca de cómo dar solución a un problema NP-Hard como lo es el de localización y ruteo de vehículos con restricciones de capacidad, a continuación, se explican detalladamente los métodos utilizados, así como también conceptos necesarios para la comprensión de la presente investigación.

6.1 Residuos peligrosos (RESPEL)

El concepto de RESPEL se da a conocer en Colombia gracias al código adoptado en la ley 253 de 1996 el cual caracteriza a los residuos peligrosos como sustancias corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables y biológico infecciosas las cuales se conocen como CRETIB.

Los RESPEL se generan a partir de diferentes actividades industriales y de servicios, campos de acción como la minería, la ganadería, generación de energía y en general en todo proceso de transformación industrial en el que el aprovechamiento de los recursos y las materias primas no se hace eficientemente. También son generados por características propias de los materiales y las impurezas generadas en los procesos de transformación o a lo largo de su vida útil.

6.2 Aceites Lubricantes

Se definen como sustancias de baja densidad e insoluble en agua y tienen diversos usos en la industria. Según su uso se clasifican en aceites minerales, combustibles

y comestibles, el presente proyecto se enfoca en los primeros dos cuya composición por lo general es una mezcla líquida amarillenta obtenida del petróleo crudo o a partir de sustancias vegetales como el biodiesel o los biocombustibles.

Su distinción se debe a la composición de hidrocarburos, los puntos de ebullición que poseen y los aditivos químicos que contengan, los cuales les brindan las propiedades de anti desgastes, detergentes y dispersantes. Los aceites minerales son usados como lubricantes en la industria metalmecánica mientras los aceites lubricantes en la automotriz, y son caracterizados especialmente por su viscosidad, la capacidad de lubricación y su capacidad de disipar el calor, para reducir las consecuencias que traería la fricción entre las distintas superficies al tener contacto directo. Algunas de estas consecuencias podrían ser desgaste, ruido, golpes, vibraciones y calor en exceso. Además de éstas funciones, tiene otros usos como el de evitar la formación de residuos gomosos, lodos y mantener limpias las piezas del motor, formando una película continua y resistente entre las piezas cuando llega al final de su vida útil como aceite lubricante desechado. (Molina 2013)

Se define al aceite usado como aquel aceite lubricante de desecho, generado a partir del momento en que deja de cumplir la función inicial para la cual fue creado. El lubricante usado contiene diversos compuestos como metales pesados dentro de los cuales están el Cromo, Cadmio, Arsénico, plomo, Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares, benceno y algunas veces solventes clorados, PCBs, etc. Estos productos químicos son peligrosos para la salud humana y algunos de ellos son altamente cancerígenos.

Cuando un aceite lubricante usado tiene una mala disposición final y logra contaminar el ambiente o entrar en contacto con otros materiales el aceite se convierte en parte del lixiviado que logra llegar a las aguas subterráneas generando una gran contaminación y dejándolas como no aptas para el consumo humano. El contacto directo con la superficie y los metales pesados que contienen los aceites lubricantes usados tales como Cromo, Arsénico, Plomo entre otros generan efectos adversos directos en la salud humana y se ha demostrado a lo largo de investigaciones que muchos de estos agentes son cancerígenos. La quema de aceite bajo condiciones no controladas genera emisiones de plomo al aire y dioxinas que contaminan más que cualquier otra fuente industrial. Además, el plomo es una toxina que envenena el sistema nervioso central y detiene el desarrollo en el niño; la exposición a él, aún en pequeñas cantidades, puede llevar al desarrollo de serios problemas de lectura en niños.

El convenio de Basilea, adoptado y ratificado por Colombia mediante la Ley 253 de enero de 1996 plantea en sus numerales 8 y 9 que los aceites lubricantes usados

se clasifican como residuo peligroso Y8 titulados “Desechos de aceites minerales no aptos para el uso al que estaban destinados”. Una vez el aceite lubricante ha sido removido del vehículo y reemplazado por uno nuevo debe tener un adecuado manejo y disposición pues por sus propiedades representa un peligro para la salud humana y tiene grandes impactos negativos a nivel medioambiental. Actualmente los RESPEL de aceite lubricante usado representa una problemática ambiental y de salud debido a su indebida disposición y a las condiciones bajo las que se realizan actualmente como su vertedero en fuentes hídricas, redes sanitarias o en contacto directo con la tierra, la quema indiscriminada de este residuo también genera problemáticas de salud humana e impactos ambientales. Según el manual técnico para manejo de aceites lubricantes usados el uso que se le puede dar a este residuo se categoriza de la siguiente manera.

6.2.1 Aceite lubricante usado tratado

- Uso en combustibles de tipo industrial
- Regeneración de bases lubricantes por medio de la refinación
- Recuperación y uso en fabricación de plastificantes, fluidos para temple y cualquier otro uso que no implique ingestión en humanos o animales.

6.2.2 Aceite lubricado sin tratamiento

Su uso se limita al aprovechamiento energético como combustible en procesos productivos de elaboración de cemento en el cual se garantiza la destrucción de todos los componentes orgánicos contenidos en el aceite.

6.3 Problema de localización de instalaciones

El problema de localización de instalaciones es un tema de alto interés a nivel de estudio y el cual cuenta con alta difusión en la literatura especializada debido a sus múltiples aplicaciones reales como localización de: centros de distribución, depósitos, plantas de producción, etc.

Los primeros aportes con fundamentos sobre la teoría de la localización de instalaciones datan del año 1909 introducidos por Alfred Weber quien se dedicó al estudio de la localización de almacenes para minimizar la distancia con sus proveedores (Drezner et al. 2002). Klose & Drexel (2005) identifican los aportes de

Weber como los primeros en modelación del Problema de Localización de instalaciones no sólo de naturaleza discreta sino en problemas de tipo continuo.

Entre 1980 y 1990 son presentadas formulaciones matemáticas para resolver este tipo de problemas para múltiples instalaciones y se incrementó notablemente el desarrollo de modelos, heurísticos y meta-heurísticos de solución tanto de tipo continuo como de tipo discreto (Drezner, 1984).

A partir de los años 90 hasta la actualidad la teoría para la resolución del problema de localización se ha consolidado como un campo de estudio en el cual la formulación de problemas considera aspectos holísticos para un diseño integral de la cadena de abastecimiento de tipo estático y dinámico haciendo que se pueda afirmar que el diseño actual de las cadenas de abastecimiento está estrechamente ligado a los problemas de localización y al movimiento de flujos de material a través de los diferentes eslabones que la conforman (Melo et al., 2009; Arabani & Farahani, 2012).

Actualmente se encuentran gran cantidad de aportes relacionados al tema de localización de instalaciones entre los cuales destacan diversos algoritmos y métodos de solución aplicados al estudio de casos reales. El problema de localización de instalaciones se define como el diseño, la modelación, formulación y solución de problemas para la determinación del espacio físico donde se pretende ubicar una instalación para actividades industriales o de prestación de servicios sujetos a un grupo de restricciones. (Klose & Drexl, 2005).

Farahani & Hekmatfar (2009) describen que el problema de localización de instalaciones está compuesto por cuatro componentes esenciales: el número de clientes, el número de instalaciones que se busca ubicar, la ubicación de los clientes y el espacio físico de las instalaciones y por último una medida métrica que estandarice el problema (puede ser definida en función de tiempos, distancia o costos). A través de los años, sin embargo, se han añadido aspectos que aumentan la complejidad del problema como la dinámica de las redes de transporte y el estudio de la incertidumbre al incluirlo en el diseño de cadenas de abastecimiento.

De acuerdo a Ballou (2005) la decisión de localización de instalaciones es una cuestión fundamental en el desarrollo de una buena cadena de suministro, ya que forma parte de los elementos que configuran la misma. Algunos de los aspectos implicados en la decisión de localización son el número, la ubicación y tamaño de las instalaciones que se utilizarán, definiéndose así factores como los costos y niveles de inversión asociados. Las instalaciones pueden representar puntos nodales de la red de suministro, tales como plantas de producción, puertos, bodegas, puntos de venta o de servicios, etc.

Ballou (2005) plantea una clasificación de los problemas de ubicaciones de las instalaciones como sigue:

- **Fuerza impulsora:** De acuerdo a los factores críticos requeridos por las ubicaciones potenciales.
- **Número de instalaciones:** Dependiendo del número de instalaciones requeridas el problema de vuelve más complejo, siendo necesario considerar otro tipo de factores como la demanda de los clientes o las fuerzas competitivas.
- **Lo discreto de las opciones:** Se consideran opciones continuas y discretas, estas últimas son más comunes en la práctica debido a que para ello se consideran localizaciones potenciales basadas en criterios prudentes.
- **Grado de acumulación de datos:** Dependiendo de la cantidad de información del problema las áreas de resultado pueden variar en tamaño, se pueden obtener resultados cada vez más específicos con métodos que utilices bajo nivel de información, estos últimos por lo general se usan para micro localizaciones.
- **Horizonte de tiempo:** Dependiendo del fin de las instalaciones, estas pueden ser necesarias por un periodo de tiempo específico.

6.3.1 Métodos exactos

Según Ballou (2005) los métodos exactos son aquellos cuyo resultado puede considerarse como el óptimo o con un nivel de precisión alto, siendo así la mejor opción en muchos aspectos para resolver cuestiones de ubicación.

Este tipo de métodos permiten obtener soluciones que conlleven a un resultado óptimo, sin embargo, la complejidad de su aplicación en ocasiones se hace imposible debido a su exigencia en el proceso de modelado. A pesar de esto, este tipo de métodos se utilizan como input para brindar soporte a la toma de decisiones en el problema de localización de instalaciones y muchos de ellos han mostrado relevancia como lo muestra Holmberg et al. (1999) donde se utiliza una estrategia Branch & Bound basada en relajaciones lagrangianas obteniendo resultados positivos en comparación con la implementación comercial de la conocida CPLEX.

6.3.2 Métodos multi-criterio

Para Bustos (2010) los métodos multi-criterio abarcan un conjunto de metodologías que apoyan el proceso decisorio pues tienen en cuenta estrictamente múltiples puntos de vista cuantitativos y cualitativos para encontrar la mejor alternativa. Estas metodologías definen el concepto del criterio en función de tres aspectos fundamentales: el objetivo, el cual representa las direcciones de mejora de los atributos, los atributos los cuales hacen referencia a valores del centro decisor respecto a una realidad objetiva, por último, están las metas cuyo objetivo es representar un nivel de logro para el correspondiente atributo. (Romero, 1993).

Según Romero (1993) y Bustos (2010) los métodos multi-criterio pueden agruparse en dos grandes categorías: los métodos multi-criterio discretos (MMD) y los métodos multi-criterio continuos (MMC). Los primeros se utilizan cuando se conoce un número finito de alternativas, entre los más destacados en esta categoría se encuentran las relajaciones de sobre cualificación (Roy, 1998); la teoría multi-atributo (Keeney y Raiffa, 1976) y el Proceso Jerárquico Analítico AHP (Saaty, 1980). Los MMC contemplan un número infinito de alternativas que no se especifican directamente, sino que se definen en términos de variables de decisión que se manejan como problemas multi-objetivo.

De acuerdo a García (2009) las herramientas para el análisis de las decisiones multi-criterio se utilizan como apoyo para la toma de decisiones de manera sistemática y con un orden lógico, permitiendo que el decisor tenga una noción más extensa del problema y le ayude al razonamiento del mismo. Para que un problema sea considerado multi-criterio debe tener como requisito al menos dos criterios y dos posibles soluciones. Respecto a los criterios, se consideran que están en conflicto directo, pues al aumentar la satisfacción de uno de los actores se produce una disminución en la satisfacción del otro actor del problema. (Toscano, 2005).

El MCDA (Multi-criteria Decision Analysis) según (Urda, 1998) es considerado como uno de los cuatro métodos generales para la evaluación de criterios los cuales se consideran como: los estudios de casos, los métodos basados en la cuantificación de aspectos cualitativos, métodos cualitativos basados en aspectos económicos y la evaluación de expertos o técnica Delphi.

La base matemática de la cual parten los métodos multi-criterio es la que se muestra en la **Figura 1**. Estos métodos están enfocados en seleccionar la alternativa que mejor se adapte a lo que el decisor necesita.

FIGURA 1. Base matemática de los métodos multi-criterio.

	Criterios:	C1	C2	..	Cj	..	Cn
	Pesos:	W1	W2	..	Wj	..	Wn
Alternativas	A1	X11	X12	..	X1j	..	X1n
	A2	X21	X22	..	X2j	..	X2n
	:	:	:	..	:	..	:
	Ai	Xi1	Xi2	..	Xij	..	Xin
	:	:	:	..	:	..	:
	Am	Xm1	Xm2	..	:	..	Xmn

Donde:

A_m : es el número de alternativas del problema

C_n : es la cantidad de criterios del problema

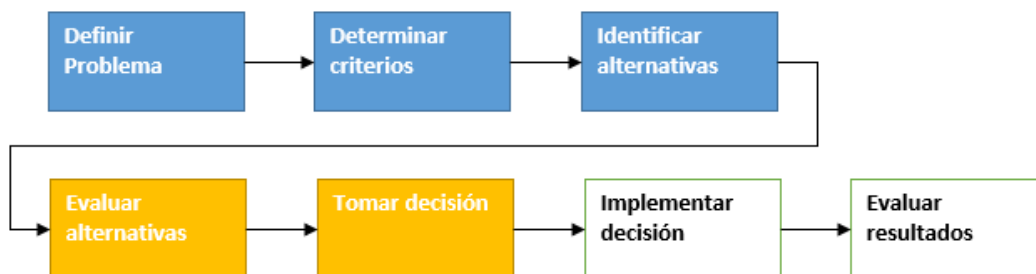
W_n : es el peso que se le da a cada uno de los criterios

A_{mn} : es la evaluación cuantitativa de la alternativa m con relación al criterio n

El análisis de decisión de los problemas multi-criterio se puede ver representado en la **Figura 2** en donde se identifican las fases generales de un problema de tipo MCDA. En esta figura se puede observar la importancia que se le da al análisis de la decisión y estructuración del problema. En azul se observan los procesos asociados a la fase de *Estructuración del problema* y en amarillo la fase de *análisis del problema*.

La fase de estructuración del problema comprende los procesos encargados de análisis de la situación. En principio se requiere definir el problema para delimitar el objetivo y poder seleccionar las alternativas y los criterios relevantes para el contexto de la situación que se está analizando. La fase de análisis del problema incluye los procesos de la evaluación de las alternativas y la elección de la mejor alternativa.

FIGURA 2. Representación general del proceso MCDA.



6.4 Problema de ruteo de vehículos

El problema de ruteo de vehículos VRP (Vehicle Routing Problem) por sus siglas en inglés, constituye un conjunto de personalizaciones de problemas que por lo general buscan encontrar las rutas de una flota de transporte para dar servicio a unos clientes de manera óptima, en la revisión bibliográfica los primeros exponentes de este tipo de problemas fueron Dantzig y Ramser, los cuales estudiaron un caso real para la distribución de gasolina para estaciones de servicio, pero fueron Clarke y Wright (1964) los primeros en proponer un algoritmo efectivo para la resolución del problema de ruteo de vehículos.

Este tipo de problemas tiene muchas variables, de las cuales algunas de ellas son relevantes para la realización del proyecto a tratar en este informe, como por ejemplo el problema de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad (CVRP), el problema de ruteo de vehículos con restricciones capacidad y ventanas de tiempo (CVRPTW) y los problemas de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad con flota homogénea y heterogénea. La mayoría de métodos para abordar este tipo de problemas se pueden clasificar como métodos exactos, heurísticos (optimización local convencional) y meta heurísticos (optimización local inteligente), siendo los primeros utilizados para resolver problemas relativamente poco complejos y los dos últimos para abordar situaciones más complejas.

Toro (2016) presenta una compilación de las diferentes variantes del VRP y las estrategias que se han utilizado para su solución, esto se expone en la **Figura 3**, tomando como base el TSP, en donde se diferencian según los métodos de solución, así como también las diferentes configuraciones de la flota de vehículos a utilizar, ya sean propios o subcontratados, estos pueden ser de capacidad homogénea, heterogénea o ilimitada (CVRP) y también los diferencia dependiendo de si regresan o no al depósito, además se considera la posibilidad de abrir múltiples depósitos o solamente uno (MDVRP).

FIGURA 3. *Métodos de solución para el VRP.*



Baldacci & Mingozzi (2009) proponen una metodología exacta para la solución del MDVRP, basada en un algoritmo basado en relajación lineal lagrangiana incluida en una formulación matemática que permite reducir el número de variables del problema y de esta manera resolverlo de maneras más eficiente en un software de programación lineal entera.

Giosa et al (2002) resuelve el problema mediante un procedimiento de agrupar primero y rutear después, utilizan diversas técnicas de clusterización para posteriormente realizar el ruteo mediante el algoritmo de ahorros, en esta ocasión se resuelve un MDVRP con ventanas de tiempo.

Surekha & Sumanti (2011) resuelven la problemática mediante un algoritmo genético, en donde se agrupan los clientes de acuerdo a la distancia hasta los

depósitos y luego mediante el algoritmo de ahorros se crean las rutas (Clarke & Wright, 1964) y para finalizar se usa el algoritmo genético mencionado anteriormente.

En Vidal et al. (2012) se sugiere un algoritmo genético híbrido donde se generan soluciones factibles e infactibles, para luego separarlas en dos grupos, se usan una serie de operadores para escoger dos elementos padres combinados, dando como resultado un elemento hijo el cual es mejora mediante búsqueda local para incluirlo en la subpoblación adecuada de acuerdo a su factibilidad, este es un método complejo pero muy eficiente, el cual ha alcanzado los mejores resultados de la literatura.

De manera general el VRP consiste en un conjunto de clientes, de depósitos y de vehículos que deben ser interconectados por un conjunto de rutas que permita la reducción de costos, es importante resaltar que los vehículos deben partir y terminar su recorrido en los depósitos, de forma que visiten una sola vez a cada cliente en un recorrido. De lo anterior se puede observar que este tipo de problemas corresponde a una intersección entre los problemas del agente viajero y de empaquetamiento en compartimientos, el último debido a que los vehículos a utilizar para el recorrido de las rutas cuentan con capacidades de carga que no pueden ser excedidas.

6.4.1 Problema del agente viajero TSP

El problema del agente viajero o TSP por sus siglas en inglés (Traveling Salesman Problem) es uno de los problemas más conocidos y complejos de las ciencias computacionales el cual ha sido abordado a lo largo de los años en el campo de la ingeniería en diversas ramas y para diversos usos. Su principal aplicación es el ruteo desde distintas perspectivas y situaciones para procesos que conlleven una secuencia específica o una distribución de carácter logístico en la que intervienen elementos de transporte en búsqueda de la mejor ruta posible con criterios de economía en distancia o en costo. Proveer soluciones contribuye a mejorar tareas y procesos en distintos campos científicos e industriales, proponiendo alternativas para la optimización en el uso de los recursos. Distintas disciplinas abordan este tema como la investigación de operaciones y las ciencias informáticas como la algoritmia y teoría de grafos. (López, 2008)

El problema del agente viajero constituye una situación general y un punto de partida para formular problemas combinatorios más complejos y prácticos como el ruteo de vehículos y la programación de tareas dependientes del tiempo de alistamiento. En el TSP se dispone de un sólo vehículo para visitar todos los clientes en una sola ruta y a un costo mínimo. La mayor parte de los problemas de ruteo de

vehículos son generalizaciones del TSP, puede considerarse como un VRP simplificado. No obstante, pertenece a los problemas de tipo NP, debido a que tomando una secuencia cualquiera ésta puede ser verificada en un tiempo polinomial.

De acuerdo con Cobos et al. (2010) el TSP se puede definir como, dado un entero $n > 0$ y las distancias entre cada par de las n ciudades, esta distancia se da por medio de la matriz (d_{ij}) de dimensión $n \times n$, donde d_{ij} es un entero mayor o igual a cero. Un recorrido es una trayectoria que visita todos los clientes exactamente una vez, en donde el objetivo es encontrar el recorrido con longitud total mínima.

6.4.2 Problema de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad de flota heterogénea (FSMVRP)

El problema considera que se tiene una flota de vehículos con diferentes capacidades y un conjunto de clientes que demandan ciertas cantidades de producto.

De acuerdo a Olivera (2004), en este tipo de problemas los costos y capacidades de los vehículos pueden variar, se define entonces un conjunto $T = \{1, \dots, T\}$ para los diferentes conjuntos de vehículos, entonces se define un subíndice $k \in T$ para establecer la capacidad de los vehículos como Q_k y sus costos fijo en el caso de que existan como f_k . Además, se tienen los costos variables de los vehículos y sus tiempos de viaje o distancias recorridas como P_k y d_{ij} respectivamente.

6.5 Problema de localización y ruteo de vehículos

El estudio de problemas combinados de logística es un área de investigación relativamente nueva, pero que ha arrojado mejores soluciones que al abordar los problemas por separado, como es el caso del problema de localización y ruteo de vehículos con restricciones de capacidad (CLRP). Actualmente este problema ha sido estudiado por varios autores que plantean soluciones para esta y otras variables del problema; Se expondrán las metodologías que más se asemejan al problema a tratar en este proyecto.⁵

Linfati, Escobar y Gatica (2014) plantean una solución general al problema de localización y ruteo de vehículos con restricciones de capacidad (CLRP), en la cual se considera una flota heterogénea de vehículos, es decir, con diferentes

⁵ Escobar, Linfati, Jaimes. Problema de localización y ruteo con restricciones de capacidad: Revisión de la literatura. 2015. p.

capacidades de almacenamiento. La solución plantea un algoritmo meta heurístico de búsqueda tabú granular, construyendo una solución inicial factible utilizando métodos de clústeres y métodos exactos, esta metodología híbrida agrupa diferentes clientes en clústeres, a los cuales se les asignan vehículos para crear una solución factible con un tiempo de cómputo relativamente reducido, para posteriormente optimizarla mediante la búsqueda tabú granular, mediante esta metodología se obtienen soluciones alto grado de efectividad.

Prins, Prodhon y Calvo (2006) dan solución al CLRP a través del algoritmo GRASP, en donde se usa el método ahorros extendido para crear una solución inicial, la cual se optimiza posteriormente mediante Path-relinking. Esta estrategia de solución genera buenas soluciones con un tiempo de costo reducido para situaciones en donde los depósitos potenciales no cuentan con restricciones de capacidad.

Duhamel et al (2010) utiliza una metodología similar a la descrita anteriormente, usando el algoritmo GRASP para plantear una solución inicial factible y posteriormente optimizarla mediante búsqueda local evolutiva (ELS).

Lopes et al (2008) utiliza un procedimiento de solución para el CLRP a través de 4 pasos generales: (1) inicialmente crea grupos de clientes con restricciones de capacidad; (2) posteriormente determina cómo se distribuyen los clientes en cada uno de los grupos; (3) utilizando el problema de viajero de negocios TSP por sus siglas en inglés, para mejorar la secuencia de los clientes; (4) finalmente realiza la localización de los depósitos para cada uno de los grupos de clientes.

Nadizadeh et al (2011) propone un método similar al anterior, basado en 4 pasos, a través de una heurística, (1) primeramente se agrupan los clientes en clústeres mediante el algoritmo greedy clustering method; (2) para el segundo paso, se calculan los centros de gravedad de los grupos de clientes generados en el paso anterior; (3) en el tercer paso se localizan los depósitos requeridos para la demanda total de los clientes agrupados; (4) por último se crean las rutas y se optimizan mediante el algoritmo de colonia de hormigas. Con esta propuesta no se obtienen resultados óptimos debido a que no se consideran los costos relacionados con la distancia recorrida desde cada grupo de clientes hasta cada depósito.

Tuzun y Burke (1999) abordan el problema a través de dos fases, por un lado, consideran la localización de los depósitos potenciales a ubicar, esto a través búsqueda tabú y posteriormente para cada localización se consideran las variables de ruteo para obtener una solución óptima por cada configuración de localización considerada.

Prins et al (2007) solucionan el CLRP a través de dos etapas, en la primera, se agrupan los clientes en rutas de “súper clientes” siguiendo restricciones de “single

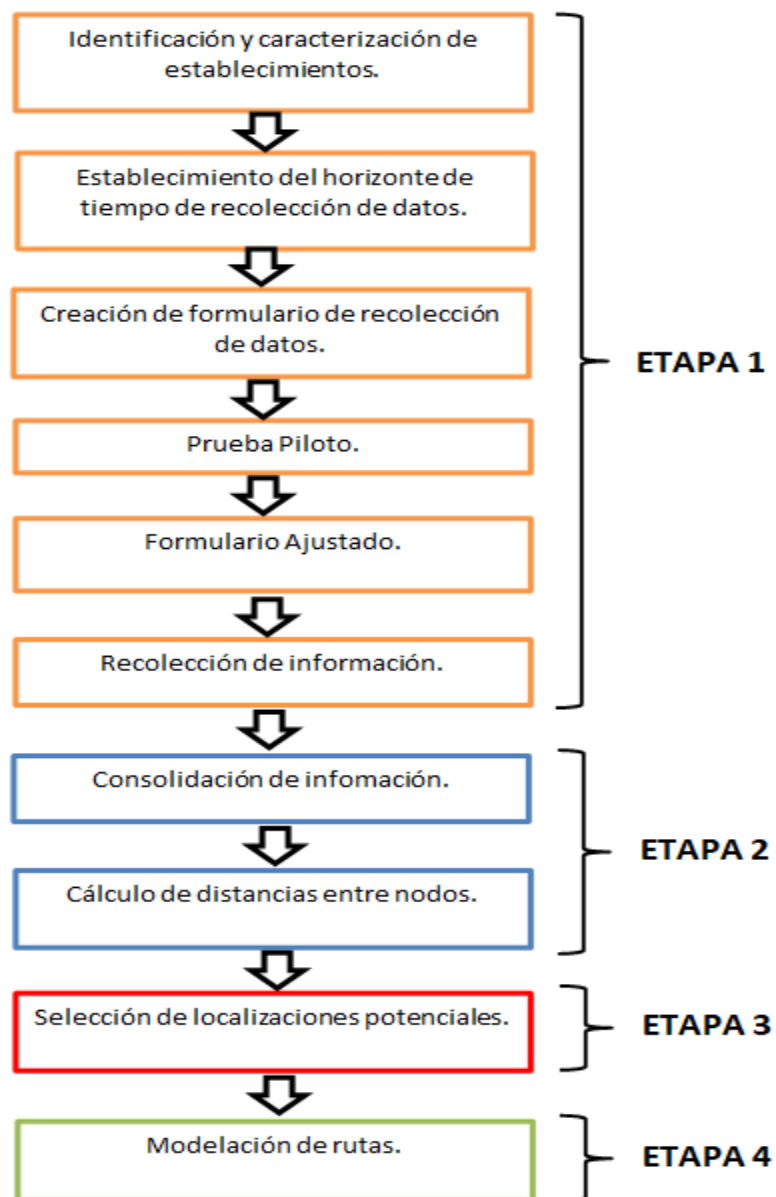
sourcing” es decir que cada “súper cliente” es asignado a un solo depósito, en este punto se resuelve el problema de las localizaciones mediante relajación langreana; En la segunda etapa se obtiene un problema de ruteo de vehículos utilizando múltiples depósitos (MDVRP) el cual se resuelve mediante búsqueda tabú granular con un solo vecindario. Esta metodología tiene gran ventaja sobre otras debido a los tiempos computacionales requeridos son bastante reducidos, esto debido a la limitación del espacio de la búsqueda local para la creación de las rutas.

Contardo et al (2011) plantea una solución basada en un método exacto para la solución del CLRP, a través de un modelo matemático de dos índices en donde se secciona el problema en columnas y se soluciona cada sub problema mediante de un conjunto de restricciones de capacidad buscando minimizar los costos de cada ruta, en esta metodología se cuenta con localizaciones potenciales para cada depósito, cada una de ellas se evalúa con la formulación matemática planteada y se determina así cual genera la solución óptima.

7 METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente trabajo y la consecución de los objetivos planteados inicialmente, a continuación, se plantean una serie de etapas que permitirán dividir el proyecto en sus diferentes fases de ejecución, así como hacer más fácil la comprensión del mismo.

FIGURA 4. *Flujograma de actividades.*



7.1 Etapa 1

Una vez conocidos los referentes bibliográficos que han abordado el problema de localización y ruteo de vehículos y planteados los objetivos del proyecto, el primero paso fue la identificación y caracterización de los puntos generadores de aceite automotor usado en la ciudad de Guadalajara de Buga, esto con el objetivo de obtener los nodos que harían parte de la red logística a desarrollar.

Se acudió inicialmente a los entes públicos de la alcaldía municipal y a la secretaría de movilidad y departamento de tránsito, con el objetivo de identificar la cantidad de establecimientos dedicados a las actividades de mecánica automotriz y cambios de aceite automotor, complementario a esto, se realizó un trabajo de campo que consistió en la identificación personal de dichos establecimiento mediante recorridos por las área de la ciudad en donde es frecuente encontrar ese tipo locales prestadores de servicio.

El segundo paso de esta etapa buscó la inclusión y el acercamiento de los establecimientos generadores como talleres y estaciones de servicio al proyecto, con el fin de realizar el levantamiento de la información correspondiente a las cantidades de aceite generadas en un periodo de tiempo que permitiera realizar una proyección y estimar el alcance de la demanda de estos puntos.

Una vez identificados estos establecimientos se procedió a visitarlos y hacerlos partícipes del proyecto como objeto de estudio.

Posteriormente, como tercera fase de esta etapa de identificación y caracterización se realizó la creación del formulario inicial de recolección de información, teniendo en cuenta que la meta principal de esta actividad era la recolección de primera mano de la información de las cantidades generadas de aceite en cada punto y considerando el entorno y las condiciones en el que se realiza dicha actividad se pensó en un diseño simple que permitiera un registro fácil, rápido y efectivo y que no comprometiera mayor cantidad de tiempo productivo de los establecimientos. En el **Anexo 1** se puede observar el formulario de registro utilizado para la recolección de información.

Se determinó un horizonte de tiempo de 4 semanas para la recolección de la información de la demanda generada en cada punto en donde cada ciclo tiene una duración de 1 semana. Durante cada semana se realizó la entrega de un formulario de registro en donde se diligenció la información correspondiente a las actividades generadoras de residuos en cada establecimiento detallando el tipo de vehículo al cual se le realizaba el cambio de aceite y la cantidad recolectada en cada uno de los cambios.

Con el fin de medir la participación y el correcto entendimiento del formulario por parte de los encargados de los establecimientos se decide realizar una prueba piloto durante una semana, en la cual cada uno de los establecimientos vinculados diligencia el formato con la información del volumen estimado de los residuos generados en los cambios de aceite automotor. Esta prueba permite dar un panorama general en cuanto a tiempo y rutas que se utilizará durante las próximas 4 semanas y recomendaciones a los encargados de la recolección de la información de los establecimientos.

Una vez se realiza la prueba piloto se identifican oportunidades de mejora buscando una mayor simplicidad del formulario y hacer más eficiente su diligenciamiento. Estos cambios se pueden evidenciar en el **Anexo 2**.

Una vez ajustado el formulario se realizaron visitas durante un periodo de ocho semanas en las que semanalmente cada lunes se recolectan los formularios entregados y se asigna uno nuevo, esto con el fin de medir el volumen aproximado recolectado en un periodo de siete días en cada uno de los establecimientos y registrar la información que será la entrada para la modelación matemática.

Cabe resaltar que no se pudo cumplir con el horizonte de tiempo planteado inicialmente de cuatro semanas para la recolección de la información, ya que algunos establecimientos no realizaron el registro de los datos en algunas semanas por olvido o razones personales de los encargados, debido a lo anterior el horizonte de tiempo se extendió cuatro semanas más.

7.2 Etapa 2

En la segunda etapa del proyecto se crearon los consolidados de cantidades generadas por los establecimientos de la ciudad de Buga, además se realizó el cálculo de las distancias necesarias para la implementación del caso de estudio, a continuación, se describirán los métodos y herramientas usados.

Inicialmente se reunió la información de las cantidades de aceite automotor usado que cada uno de los establecimientos partícipes, genera en un tiempo aproximado de un mes. Esta información fue organizada en la **Tabla 1**, como se muestra a continuación, donde además se ve que la cantidad mensual generada a recolectar es en promedio es de 2.5 toneladas de residuos.

Tabla 1. Consolidado de cantidades generadas.

Establecimiento	Cantidades por Semana				TOTAL (Kg)	Total (Ton)
	Semana1 kg	Semana 2 kg	Semana 3 kg	Semana 4 kg		
Yamamotor	12,22	6,6	6,3	7,8	32,91	0,033
Checa Motos	7,55	4,4	3,4	4,4	19,78	0,020
Furmotos	3,48	5,3	3,8	6,3	18,84	0,019
Autogas Buga	17,02	14,7	30,7	32,6	95,06	0,095
Lubriteca Salida Norte	244,66	214,7	289,9	211,6	960,82	0,961
EDS Guadalajara	43,6	27,6	31,7	32,9	135,77	0,14
Serviteca BRC	72,1	81,8	168,9	84,0	406,82	0,41
Serviautos	26,3	41,7	32,0	49,8	149,81	0,15
Serviteca Estambul	69,0	67,7	84,9	101,9	323,45	0,32
Motos Honda	8,1	16,6	6,3	8,27	39,30	0,04
Jose Motos	3,0	4,1	6,6	3,82	17,46	0,02
Toño Motos	2,9	4,1	3,8	3,76	14,48	0,01
Racing Forros	2,8	4,7	5,6	2,88	16,05	0,02
MotoShopping	7,2	4,14	5,0	5,2	21,50	0,022
JAR Motos	3,8	4,98	5,8	3,4	18,02	0,018
Alvaro Motos	6,6	4,39	8,1	5,8	24,85	0,025
DAFACO Motos	1,6	0,81	2,1	1,0	5,48	0,005
Moto Racing	12,2	4,17	10,3	5,4	32,09	0,032
Tecnimotos Fabian	7,8	5,95	5,0	2,6	21,44	0,021
Lubrimotos Juancho	20,1	26,89	18,9	23,3	89,17	0,089
TecniHonda	10,0	12,76	2,3	4,9	29,96	0,030
Moto Llantas Buga	27,6	36,17	31,9	21,7	117,31	0,117
TOTAL	569,80	551,46	725,10	593,81	2440,16	2,44

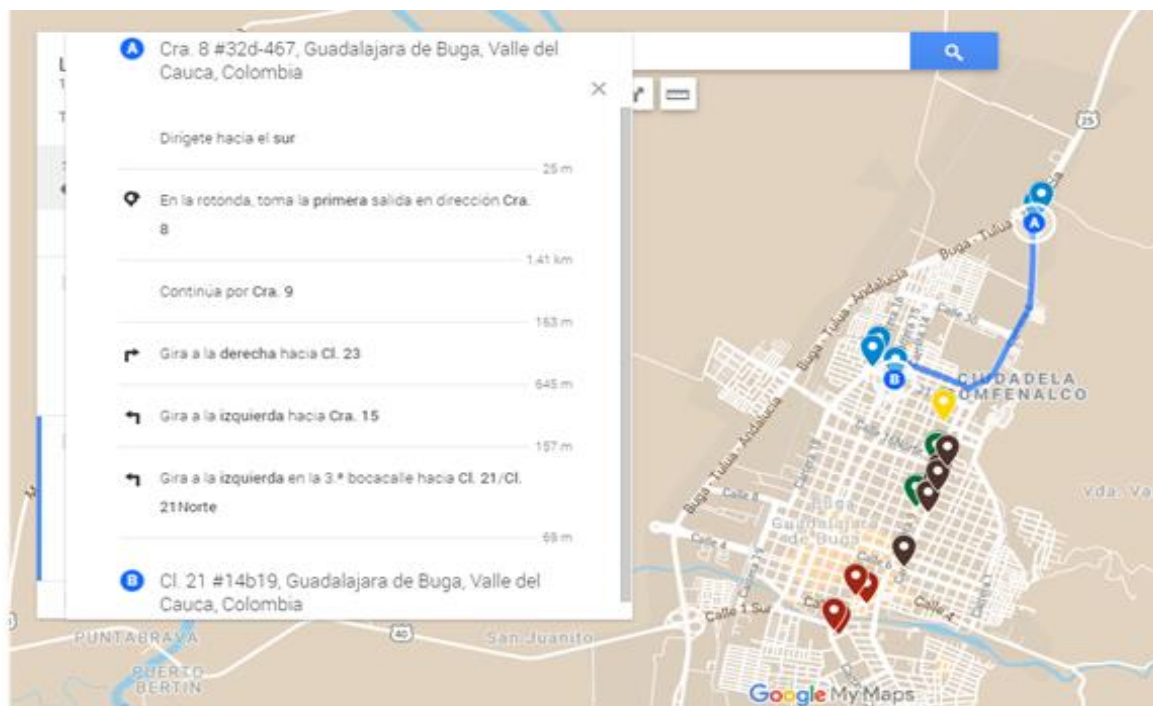
A partir de las cantidades generadas, se pudo determinar el tipo de vehículos a utilizar y sus características.

Como segunda fase de esta etapa, se ubicaron todos los establecimientos en el mapa de la ciudad y mediante Google maps, se logró determinar las indicaciones paso a paso en términos de distancia desde cada uno de los nodos hacia los demás como se puede observar en la **Figura 5**.

Las distancias calculadas mediante Google maps, corresponden a las más cortas, esto debido a que la aplicación determina las mejores rutas, teniendo en cuenta incluso el tráfico de las zonas, esto permitió construir una matriz de distancias

mucho más apegada a la realidad, que, de haber utilizado distancias rectangulares o euclidianas, calculadas a partir coordenadas.

FIGURA 5. Cálculo de distancia mediante Google Maps.



Una vez calculadas las distancias de ruta, la información se consolidó en la matriz de distancias, que posteriormente se utilizaría para obtener la solución al problema de ruteo, a través del modelo matemático.

7.3 Etapa 3

En esta etapa se determinaron las localizaciones potenciales en las cuales se podría ubicar el centro de acopio de los residuos.

Existen diversos métodos para resolver el problema de ubicación de un solo centro de distribución o almacenamiento, sin embargo, la mayoría omiten los costos de inventario, lo cual se considera un error cuando se habla de ciertos productos, pues estos costos pueden tener mayor relevancia que otros como lo son el transporte, costos fijos de operación y costos variables (Colomer et al, 1995).

Para este caso de localización de un punto único, la mayoría de los métodos que se consideraron se basan en la minimización de la suma de los costos de transporte de los residuos en la región de influencia. El problema consiste en determinar una demanda y unos costos de distribución teniendo en cuenta la ubicación de los puntos generadores.

Se consideraron los siguientes modelos de localización:

- Método del centro de gravedad
- Método de carga-distancia
- Proceso de análisis jerárquico-AHP

Se decidió determinar las mejores opciones de localización a partir de los establecimientos que estuvieran de acuerdo en servir como centro de acopio y que además contaran con las instalaciones necesarias para el manejo del residuo. En la **tabla 2** se muestran aquellos establecimientos que aceptaron ser depósitos potenciales para el centro de acopio.

Tabla 2. Localizaciones potenciales para centro de acopio

Depositos potenciales
Moto llantas Buga
Serviautos Guadalajara
Serviteca Stambul
JAR motos
Motoracing
Tecnimotos Fabian
Lubrimotos Juancho

Los métodos de localización, fueron seleccionados con base en la revisión de la literatura realizada, para ello se buscaron métodos que consideren aspectos cuantitativos, debido la información recolectada de cantidades generadas por los establecimientos y las distancias de ruta. Adicionalmente se seleccionó el método AHP con el objetivo de tener en cuenta aspectos cualitativos a la hora de determinar una posible localización para el centro de acopio, garantizando así una mejor calidad en los resultados.

Cabe resaltar que se optó por separar el problema de localización de instalaciones del de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad y flota heterogénea debido a que abordar ambos problemas en un modelo matemático conjunto, resultaría en un problema de gran complejidad computacional y no se contó con el equipo de cómputo necesario para su desarrollo.

A continuación, se describe la metodología necesaria para desarrollar cada uno de los métodos de localización planteados

7.3.1 Método de Carga-Distancia

La metodología de carga-distancia es un modelo matemático utilizado para evaluar la proximidad de las localizaciones teniendo en cuenta las cargas transportadas entre cada una de estas. El objetivo principal de esta metodología como lo definen Paz & Gómez (2012) es “minimizar las cargas que se transportan entre las localizaciones potenciales y los demás nodos de la red logística”. La distancia entre las localizaciones pueden ser aproximadas de acuerdo a coordenadas cartesianas sobre cuadrículas a escalas arbitrarias en el mapa que se encuentren ubicados los puntos, con el objetivo de calcular distancias rectangulares o euclidianas, sin embargo en la actualidad existen diversos softwares que pueden aproximar el método mucho más a la realidad calculando las distancias reales de las calles o carreteras por donde se realizaría el recorrido de los vehículos desde un nodo hasta otro

El desarrollo del método consiste en considerar un número de localizaciones potenciales, las cuales se evaluarán en base al puntaje de carga-distancia que obtengan, para ello se utiliza cualquiera de las mediciones de distancia y se multiplican las cargas que van desde cada uno de los nodos, hacia la instalación potencial por las respectivas distancias recorridas.

Las localizaciones potenciales evaluadas por el método se muestran en la **tabla 2**.

El método carga distancia es netamente cuantitativo por lo que no se consideran factores cualitativos que pueden resultar fundamentales como la disponibilidad de las áreas seleccionadas o los costos, por eso se recomienda considerar sólo ubicaciones potencialmente adecuadas.

Para lo anterior se tiene la siguiente función objetivo:

$$\text{Min } ld = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M L_{ij} D_{ij}$$

En donde:

L_{ij} : Representa la carga o cantidad de residuo a transportar desde el nodo i hasta el depósito j .

D_{ij} Representa la distancia recorrida para ir desde el nodo i hasta el depósito j

7.3.2 Método Centro de Gravedad

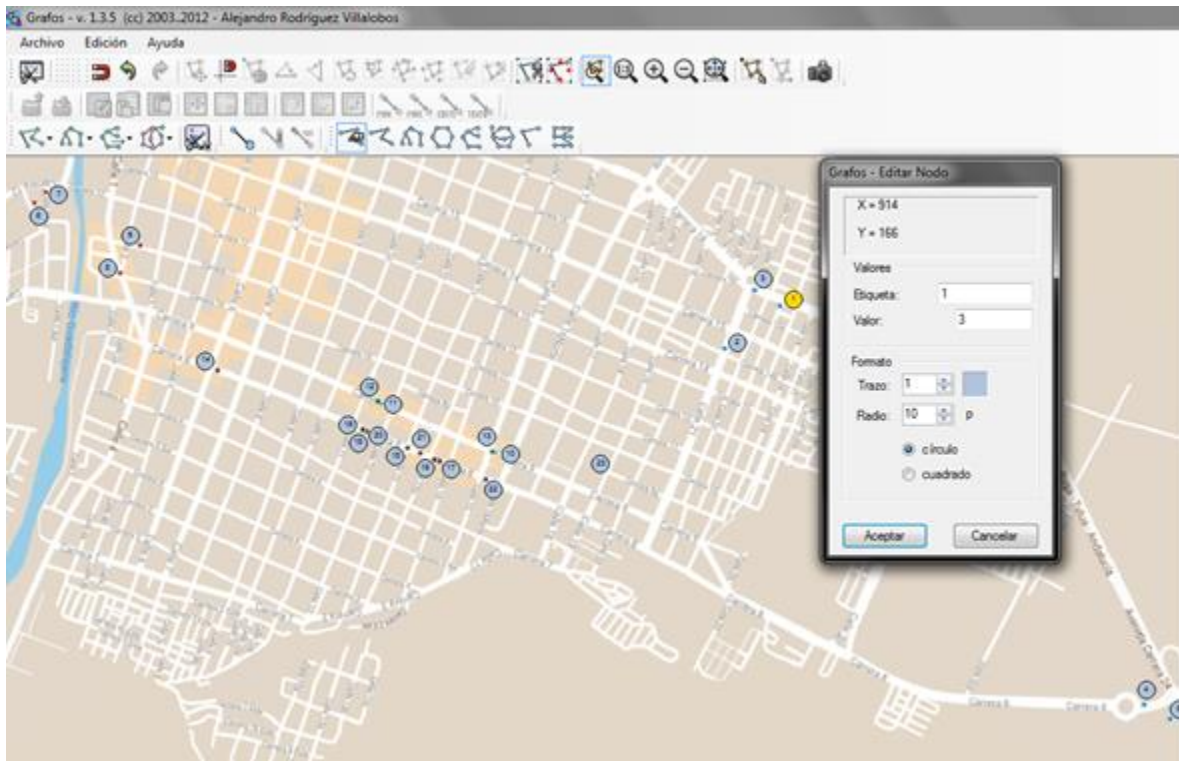
De acuerdo a Paz & Gómez (2012) esta técnica matemática es utilizada para determinar la ubicación en coordenadas de la localización ya sea un centro de distribución o acopio tomando como base la ubicación geográfica de los diferentes nodos o clientes, el volumen que se transporta a cada uno de estos y los costos de transporte asociados a cada ruta. A lo largo de la literatura esta metodología se ha usado con el principal objetivo de reducir los costos de transporte debido al balance de las distancias entre los puntos que se obtiene como resultado de la aplicación de esta metodología. En Ballou (2005) este método se clasifica como un modelo matemático de ubicación continua y estático, en el caso de que solo se busque una única localización a ubicar.

En esta metodología se asume igualdad entre los costos de entrada y salida para cada uno de los nodos y no se incluyen costos adicionales cuando las cargas no están completas.

Para el desarrollo del método de centro de gravedad fue necesario determinar las coordenadas X y Y de cada uno de los establecimientos generadores. Para lo anterior se recurrió al software llamado Grafos desarrollado por Alejandro Rodríguez Villalobos e implementado por Urango, Perez et al (2015), en su estudio denominado “Aplicación de las técnicas de centro de gravedad y AHP para la localización de un centro de distribución de productos industriales en Colombia”.

Grafos es un software completamente gratuito desarrollado para Windows 7 y creado con el objetivo de construir, editar y analizar grafos. Mediante Grafos se logró establecer las coordenadas para cada uno de los nodos de la red logística como se puede observar en la **Figura 6**.

FIGURA 6. Cálculo de coordenadas mediante el software Grafos.



Para la determinación de las coordenadas se seleccionó la imagen del mapa de la ciudad como tapiz en el interfaz de Grafos y mediante el software se localizaron los nodos correspondientes a los círculos azules, una vez establecidos los nodos, la aplicación muestra las coordenadas X y Y de cada uno haciendo click sobre ellos.

Siguiendo la metodología anterior, se consolidó la tabla de coordenadas mediante la cual se calculó el centro de gravedad.

El resultado de este método se encuentra calculando las coordenadas en Cx & Cy obteniendo como resultado el costo mínimo de transporte. Las ecuaciones que determinan las coordenadas de cada uno de los ejes para este método están dadas por las siguientes ecuaciones.

$$C_x = \frac{\sum_i^n d_{ix} W_i}{\sum_i^n W_i} \quad C_y = \frac{\sum_i^n d_{iy} W_i}{\sum_i^n W_i}$$

Donde:

C_x : Coordenada X del centro de gravedad

C_y : Coordenada Y del centro de gravedad

di_x : Coordenada X de la localidad i

di_y : Coordenada Y de la localidad i

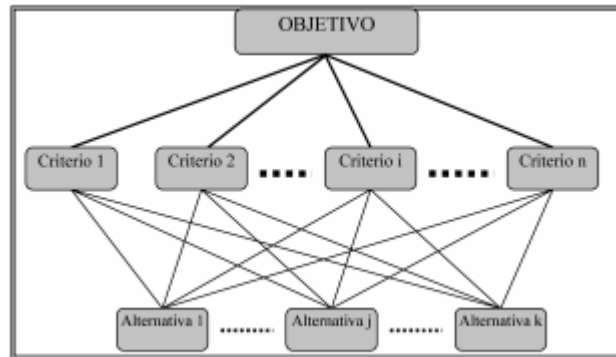
W_i : Volúmenes de carga transportados desde la localidad i

7.3.3 AHP (Analytic Hierarchy Process)

El proceso analítico jerárquico, abreviado AHP por sus siglas en inglés (Analytic Hierarchy Process) es una de las metodologías de decisión multi-criterio clásicas más usadas y confiables en la actualidad. Desarrollada por Thomas Saaty en los años 70 esta metodología de análisis de decisión multi-criterio discreta (tiene número finito de alternativas) permite abordar problemas de decisión con una estructura de niveles o jerarquías lo cual facilita organizar y descomponer la información para un mejor análisis, o como lo define Saaty (1988) “trata de desmenuzar un problema y luego unir todas las soluciones de los sub problemas en una conclusión”.

El primer nivel de decisión de la metodología AHP es la definición del objetivo principal del problema y a partir de ahí separar los componentes relevantes para el análisis de las partes del problema. El segundo nivel de la jerarquía son los criterios de selección según el contexto de la problemática y los objetivos definidos. El tercer nivel de la jerarquía son las alternativas de selección en donde se realiza una preselección de acuerdo a las características propias de cada situación. La estructura jerárquica del AHP se puede observar en la **Figura 7** donde se puede observar cómo los criterios de decisión y las alternativas terminan afectando el primer nivel de la jerarquía (objetivos).

FIGURA 7. Estructura jerárquica del modelo AHP.



La valoración de los elementos se considera como la segunda etapa del AHP, esta etapa se realiza una vez se tiene la estructura jerárquica constituida. Esta etapa consiste en asignar valores o preferencias en cada nivel de la jerarquía establecida. Esta asignación de valores subjetivos se realiza haciendo comparaciones binarias sobre la importancia relativa de la “pareja” de criterios y alternativas para poder tener un punto de partida a la hora de establecer una comparación en términos de importancia o preferencia de una cualidad frente a otra. Una de las características propias del AHP es que permite realizar comparaciones binarias teniendo en cuenta factores cualitativos y cuantitativos gracias a su escala propia de medida de 1 a 9 en donde el decisor puede expresar su preferencia entre los diferentes criterios y alternativas por medio de una escala numérica la cual está representada en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Escala numérica de comparación por pares de Saaty.

Escala numérica	Escala verbal	Explicación
1	Igual importancia	Los dos elementos tienen la misma contribución al criterio
3	Moderadamente más importante	Se favorece un elemento frente a otro de manera moderada
5	Fuertemente más importante	El juicio favorece fuertemente a un elemento frente a otro
7	Preferiblemente más importante	Hay un elemento que domina la preferencia del criterio
9	Importancia extrema	Hay un favoritismo marcado de un elemento frente a los demás

Una vez realizadas las comparaciones se elabora una matriz denominada “Matriz de comparaciones pareadas” en la cual sus componentes muestran de manera comparativa las preferencias entre los atributos del problema.

La tercera etapa es la de priorización y el objetivo de esta es calcular las prioridades de cada uno de los elementos del problema. Según Saaty (1998) “las prioridades son rangos numéricos medidos en una escala de razón. Una escala de razón es un conjunto de números positivos cuyas relaciones se mantienen igual si se multiplican todos los números por un número arbitrario positivo. El objetivo de la evaluación es emitir juicios concernientes a la importancia relativa de los elementos de la jerarquía para crear escalas de prioridad de influencia”.

La etapa final del proceso AHP es la que se denomina como análisis de sensibilidad y consiste en observar la dependencia que existe entre el resultado final y la jerarquía establecida en el proceso de decisión y los juicios emitidos sobre las variables del problema. El objetivo principal es analizar qué variables terminan siendo críticas a la hora de generar cambios en el resultado final.

Para el desarrollo del AHP se tuvieron en cuenta tres localizaciones potenciales: Serviautos Guadalajara, Serviteca Stambul y Motoracing.

Se seleccionaron solo esas tres como posibles decisiones debido a que dos de los siete establecimientos que podrían ser usados como depósitos, ya fueron considerados por el método carga distancia y otros dos están ubicados a pocos metros de Motoracing, por ende, se optó por escoger el local con mejores características.

Para la decisión de los criterios a utilizar, se tuvieron en cuenta factores que pudieran afectar directamente al costo de la ruta, a la capacidad de los vehículos y a la accesibilidad al punto generador. Para ello se escogieron criterios comunes en la literatura y que se adaptaran correctamente al problema a tratar.

Los criterios seleccionados para el desarrollo del método fueron:

- Distancia a nodos: Sumatoria de las distancias de ir desde cada uno de los nodos, al depósito potencial.
- Cantidad de residuos generados: Hace referencia a la cantidad de aceite usado generado en el depósito potencial.
- Trafico del área: Nivel de tráfico del área donde se localiza el posible depósito. Se tomó en cuenta una escala de 1 a 10, siendo 1 el menor nivel y 10 el mayor.

- Distancia a puerta de embarque: Distancia en metros, desde el lugar en donde se almacena el aceite automotor hasta donde se realizaría el descargue, para cada deposito potencial.

7.4 Etapa 4

En esta etapa se desarrolló el modelo matemático para solucionar el problema de ruteo de vehículos, para ello se recurrió a un planteamiento encontrado en la literatura, el cual hace referencia a un modelo general para la solución del problema en cuestión.

El modelo seleccionado para el proyecto permite solucionar el problema de ruteo de vehículos con capacidad limitada y flota heterogénea, además permite considerar flota homogénea y uno o múltiples vehículos.

Para la modelación, fue necesario contar con la información de las cantidades de aceite generados en los puntos, la matriz de distancias, el número de vehículos y sus respectivas capacidades, toda esta información fue recolectada y organizada en las etapas anteriores.

El modelo matemático fue implementado en AMPL y desarrollados en CPLEX, haciendo uso del servidor de web de solucionadores NEOS solvers, esta aplicación online contiene más de 60 solucionadores que pueden aplicarse a más de 12 tipos de problemas de optimización matemática, entre ellas, la tratada en el presente proyecto: Programación lineal.

Se requirió el uso de NEOS debido a que no se contaba con un equipo de cómputo lo suficientemente potente para dar solución al problema planteado. NEOS solvers cuenta con servidores que prestan la potencia de cómputo necesaria para solucionar problemas relativamente difíciles de resolver, sin embargo, problemas que involucren gran cantidad de variables, no se llegan a solucionar.

Por cuestiones de optimización matemática y carga computacional, se optó por considerar los costos de los vehículos como una relación de consumo/precio, teniendo en cuenta la distancia recorrida y la tarifa de combustible actual. Además, los costos fijos de los posibles depósitos fueron considerados externos a los de la ruta, pero se consideran al momento de decidir la óptima.

8 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA

En este capítulo se encuentra identificada la información que se recolectó para realizar una adecuada caracterización del sistema logístico que compone este trabajo dentro de lo cual se encuentra la información de los nodos generadores y su ubicación física en la ciudad de Guadalajara de Buga, los medios de transporte considerados para la recolección de los residuos generados por los nodos y las metodologías de localización del centro de acopio de residuos de aceite automotor generados en los establecimientos dedicados a la actividad automotriz y de cambio de aceite. Inicialmente se definieron los datos respectivos de cada uno de los establecimientos que decidieron ser partícipes en el objeto de estudio, posteriormente se definieron en consenso con cada uno de los puntos cuáles estarían de acuerdo en ser partícipes como centro de acopio para la demanda de aceite automotor de todos los nodos generadores para así poder definir la zona y la localización de un posible centro de acopio con sus respectivas rutas de recolección teniendo en cuenta que estos establecimientos tienen permiso de funcionamiento para el uso de este tipo de residuos según el POT de la ciudad de Guadalajara de Buga.

En el diseño de la red logística de recolección de residuos de aceite automotor usado en la ciudad de Guadalajara de Buga se identifican 3 actores en la cadena:

- Generadores de residuos.
- Transporte.
- Centro de Acopio.

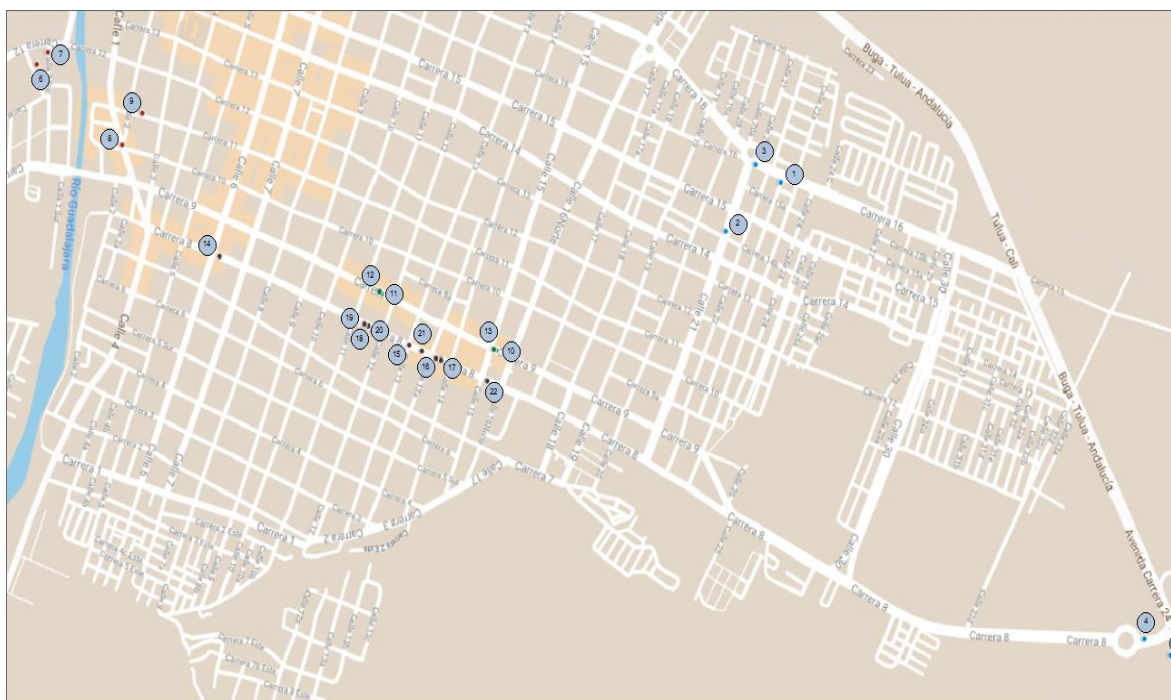
8.1 Generadores de residuos

Son los puntos generadores de residuos de aceite automotor usado, los cuales según el trabajo de campo realizado se encuentran conformados por los establecimientos dedicados a las actividades de mecánica automotriz y estaciones de servicio en las cuales se ejecuta el cambio de aceite para motores de vehículos en la ciudad de Guadalajara de Buga. Considerando lo anterior, en este estudio se buscará estimar las cantidades generadas por cada uno de los establecimientos que aceptaron ser parte del objeto de estudio y entender cómo sería posible recolectar y acopiar el volumen generado por estos establecimientos.

En total fueron 22 puntos generadores de aceite que estuvieron dispuestos a ser parte de la muestra para este trabajo de campo, teniendo en cuenta que en la ciudad de Guadalajara de Buga se encuentran registrados 29 establecimientos con autorización ambiental dedicados a las actividades de comercialización y cambio de

aceite automotriz esto representa al 75% de la población total de estudio posible. A partir de la información recolectada sobre los 22 puntos generadores se procede a ubicarlos en un plano físico de coordenadas en la ciudad. (Ver **Figura 8**)

FIGURA 8. *Nodos generadores de residuos de aceite automotor en la ciudad de Buga.*



8.2 Transporte

Son los medios de transporte utilizados para llevar los residuos generados por los establecimientos hacia el centro de acopio en la ciudad de Buga. Se identificaron las variables del sistema tales como la demanda de los puntos generadores, la capacidad de carga de los vehículos y el tamaño de los mismos teniendo en cuenta los espacios de las vías en la ciudad, los costos de transporte, la relación de consumo y las condiciones del picking en cada uno de los puntos generadores. Una vez identificadas estas variables se realizó una selección de los vehículos que cumplieran con las características para la recolección de los residuos generados. En la **Tabla 4** se puede observar el consolidado de la información relevante de los vehículos que fueron seleccionados para la modelación de la ruta de recolección de residuos.

Tabla 4. Consolidado de información técnica de vehículos seleccionados.

Vehículo	Tipo	Capacidad (T)	Capacidad (kg)	Precio	Relacion de consumo (Km/gal)	Relacion de consumo (Gal/km)	Costo (\$/km)
AYCO Force Sencillo	Motocarro	0,7	700	\$ 12.750.000	65,0	0,01539	\$ 143,1
KIA K2500	Camión	1,5	1500	\$ 70.000.000	38,4	0,02604	\$ 242,2

En el consolidado se pueden observar los vehículos seleccionados cuyas variables críticas se acoplan a las necesidades de la ruta, el espacio en las vías y la demanda de los puntos generadores. Se consideró un motocarro y un camión de carga liviana debido a las condiciones de infraestructura vial alrededor de los nodos generadores ya que son vías de alto tráfico en las que no se puede utilizar vehículos de carga pesada y por sus condiciones propias facilitan el proceso de recolección de las cargas de aceite automotor usado sin generar congestión en el tráfico de la zona, además de esto son vehículos que cumplen con la capacidad de carga que exige la demanda de los puntos generadores de residuo.

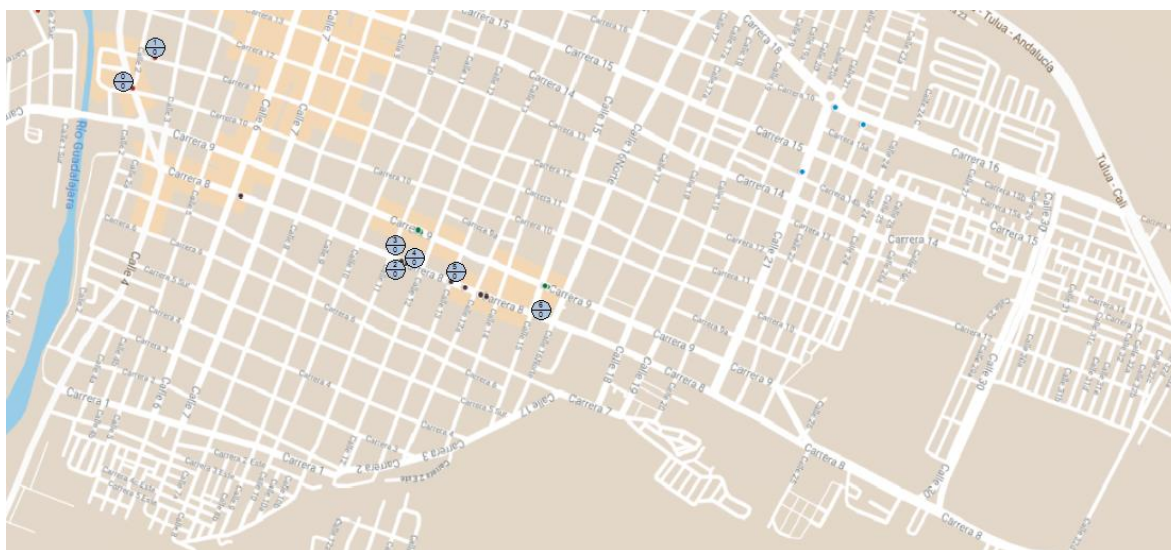
8.3 Centro de acopio

Es el lugar definido por medio de estrategias de localización para el acopio y el alistamiento de los residuos generados. Este centro de acopio deberá contar con un proceso de alistamiento para un envío a posibles clientes, una capacidad de almacenamiento derivada de las cantidades de residuo generadas y una ubicación estratégica para desarrollar el proceso de manera óptima. Durante el desarrollo del problema se consideraron varios puntos generadores como centro de acopio debido a las condiciones técnicas como el uso permitido de este tipo de residuos, el espacio de almacenamiento con el que cuentan algunos de los inmuebles y la disposición que tuvieron los encargados de los puntos generadores para ser voluntarios en el objeto de estudio.

Durante el trabajo de campo se planteó la posibilidad de que varios de los nodos generadores de residuos hicieran la función de centro de acopio teniendo en cuenta diversos factores como su espacio de almacenamiento, el acceso, su cercanía con los otros nodos generadores, su localización y la facilidad de rutas que tiene en el sistema. Al considerarse estos nodos generadores como potenciales localizaciones para el centro de acopio se realizará una evaluación de estos puntos con las diferentes metodologías para observar sus resultados en cuanto al costo de la ruta y poder compararlos con los resultados de las otras localizaciones potenciales. En

la **Figura 9** se muestran las localizaciones de los nodos dispuestos a servir de centro de acopio para el presente estudio.

FIGURA 9. Localizaciones potenciales para el centro de acopio.



8.4 Ruteo de vehículos

Para la selección del modelo matemático de ruteo, inicialmente se caracterizó el problema con el fin de conocer sus características y poder seleccionar una modelación que pudiera abordar dichas características.

Se determinó que el problema en cuestión se trata de un ruteo de vehículos con restricciones de capacidad y flota heterogénea, en el cual se cuenta con un único depósito y cada vehículo inicia y termina en él. Para satisfacer la demanda de los clientes, se consideró un solo depósito, debido a que todos los depósitos potenciales cuentan con la capacidad suficiente para satisfacer las diferentes demandas.

Se realizó una revisión de la literatura para encontrar un modelo que pudiera ser adaptado adecuadamente al problema a tratar en el presente proyecto, al finalizar este proceso, los modelos seleccionados fueron los presentados por Olivera (2004) y Toth y Vigo (2014).

Se realizó una adaptación a dichos modelos para simplificar el conjunto de restricciones y hacerlas más sencillas, esto para reducir la carga computacional requerida para la solución.

El modelo seleccionado cuenta con una serie de nodos que corresponden al depósito y los N clientes los cuales son representados por los subíndices i y j ($i \neq j$). El nodo 1 hace referencia al depósito y los nodos 2, ..., N a los clientes.

A continuación, se expone el modelo seleccionado:

8.4.1 Conjuntos:

Nodos = N , indexados en i y j en donde i = nodo de partida y j = nodo de llegada

Tipos de vehículos diferentes = M , indexados en k

8.4.2 Parámetros

p_k : Costo de operación del vehículo k por kilómetro

c_{ij} : Distancia del nodo i al j en kilómetros

q_i : Cantidad de aceite a recolectar en el nodo i en toneladas

Q_k : Capacidad del vehículo

8.4.3 Variables

X_{ijk} : Variable binaria que toma el valor de 1 si el vehículo k atiende al cliente j desde el cliente i , de lo contrario toma el valor de 0

U_i : Secuencia de visita de los nodos

8.4.4 Función objetivo

Minimizar el costo total de transporte

$$\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_k c_{ij} X_{ijk}$$

8.4.5 Restricciones

$$1. \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N X_{ijk} = 1, \quad \forall j = 2, \dots, N$$

2. $\sum_{i=1}^N X_{ihk} = \sum_{j=1}^N X_{hjk}, \quad \forall k = 1, \dots, M ; h = 1, \dots, N$
3. $U_j \geq U_i - Q_k + (q_j + Q_k) * \sum_{i=1}^N X_{ijk}, \quad \forall i = 1, \dots, N ; j = 2, \dots, N$
4. $U_1 = 0$
5. $U_j \leq \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N Q_k X_{ijk} \quad \forall j = 2, \dots, N$
6. $X_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall j = 1, \dots, N ; k = 1, \dots, M$

La restricción (1) garantiza que cada punto será visitado solo una vez por el vehículo. La restricción (2) indica que lo que salga del nodo i debe ser igual a lo que llegue al nodo j , usando el subíndice artificial h para definir la secuencia de i hasta j . Las restricciones (3) y (5) hacen que la capacidad de los vehículos no sea superada, permitiendo el retorno al depósito en caso de que se agote dicha capacidad. La restricción (4) asegura que el vehículo salga vacío del depósito. La restricción (6) regula que la variable X sea binaria.

9 RESULTADOS

Con el fin de sustentar la metodología propuesta, es necesario exponer de manera clara y detallada los resultados obtenidos en cada una de las etapas descritas anteriormente. A continuación, se exponen los resultados obtenidos para resolver el problema de localización y ruteo de vehículos en el caso de estudio planteado en los objetivos del proyecto.

9.1 Identificación de los establecimientos generadores

En el proceso de identificación de los establecimientos generadores de aceite automotor o nodos de la red logística, estos fueron clasificados según la zona de la ciudad a la que pertenecen, las categorías determinadas fueron: Zona norte, zona sur y zona central.

Una vez determinada la localización exacta de los puntos, se recurrió a google maps para ubicarlos en el mapa de la ciudad, como se mostrará a continuación.

En la **Tabla 5** aparece el listado de los 22 establecimientos que voluntariamente se vincularon al proyecto para ser muestra de estudio y de recolección de datos dentro del período de tiempo destinado para el levantamiento de la información.

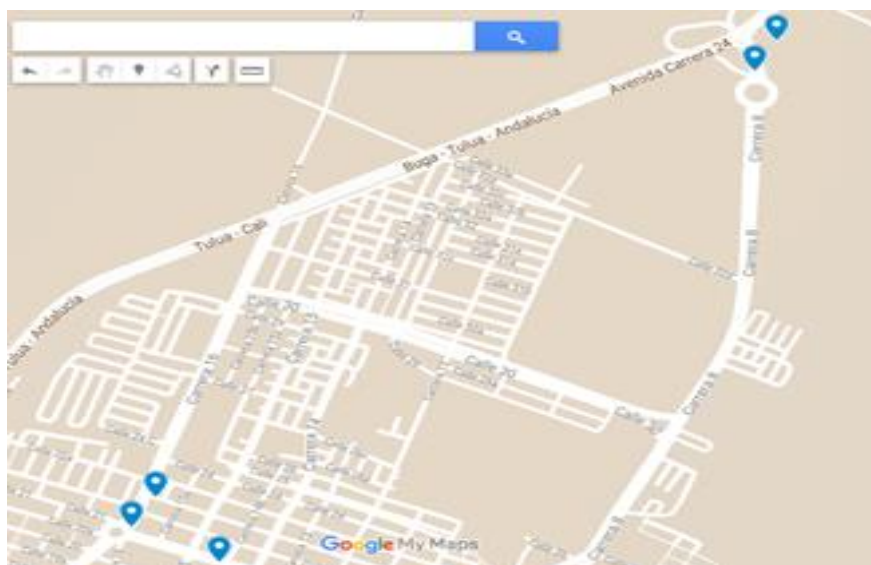
Tabla 5. Establecimientos vinculados al proyecto.

Nombre	Localización	Zona
Yamamotor	Calle 22a # 15b-24	Zona norte
Checa Motos	Calle 21 # 14-07	
Furmotos	Carrera 16 # 21-14	
Autogas Buga	Salida norte Buga	
Lubriteca Salida Norte	Salida norte Buga	
EDS Guadalajara	Carrera 12 3-61 sur	Zona sur
Serviteca BRC	Carrera 12 # 2s-11	
Serviautos	Calle 2 # 10-02	
Serviteca Estambul	Carrera 11 # 1-45	
Motos Honda	Carrera 9 # 15-28	Zona central
Jose Motos	Carrera 9 # 11-55	
Toño Motos	Carrera 9 # 11-49	
Racing Forros	Carrera 9 # 15 17	
MotoShopping	Carrera 8 # 6-26	
JAR Motos	Carrera 8 # 13-02	
Alvaro Motos	Carrera 8 # 13a-29	
DAFACO Motos	Carrera 8 # 13a-55	
Moto Racing	Carrera 8 # 11-52	
Tecnimotos Fabian	Carrera 8 # 11-40	
Lubrimotos Juancho	Carrera 8 # 11-53	
TecniHonda	Carrera 8 # 13-52	
Moto Llantas Buga	Carrera 8 # 15-27	

9.1.1 Zona norte

Todos aquellos establecimientos localizados a partir de la calle veintiuna hasta la salida norte de la ciudad. Se incluyen en el proyecto 5 establecimientos pertenecientes a esta área de la ciudad, a continuación, en la **Figura 10**, se pueden apreciar sus y localizaciones en un mapa de la ciudad.

FIGURA 10. Establecimientos de la Zona norte.



9.1.2 Zona sur

La zona sur de la ciudad fue determinada a partir de la calle sexta hasta la salida sur de la ciudad, en este caso solo se incluyeron cuatro establecimientos generadores, siendo así la zona con menor concentración de nodos, en la **Figura 11** se puede apreciar la localización geográfica de los nodos en la ciudad.

FIGURA 11. Establecimientos de la zona sur.



9.1.3 Zona central

Representa la sección de la ciudad que inicia en la calle sexta y finaliza en la calle veintiuna, esta zona es la de mayor relevancia ya que en ella se localiza la mayor concentración de talleres automotrices de la ciudad.

En la carrera novena se identificaron 4 establecimientos y en la carrera octava otros 9, para un total de 13 puntos generadores en la zona, en la **Figura 12** se pueden observar con mayor claridad.

FIGURA 12. *Establecimientos de la zona central.*



Como se puede observar en la **Figura 13** el 59% de los establecimientos se encuentra en la zona central de la ciudad, la cual corresponde a las carreras octava y novena, es decir que más de la mitad de los puntos generadores se encuentra concentrada en esta área.

Lo anterior hace de la zona central la principal candidata para localizar el centro de acopio de los residuos a simple vista.

FIGURA 13. Concentración de establecimientos por zonas.



9.2 Recolección de información para modelo matemático

La información necesaria para el desarrollo del modelo matemático planteado, hace referencia a los establecimientos de cambio de aceite, las cantidades de aceite automotor usado generado por cada establecimiento en el mismo horizonte de tiempo y las distancias de ruta para llegar a cada nodo desde cualquier otro.

9.2.1 Cantidades de aceite generadas

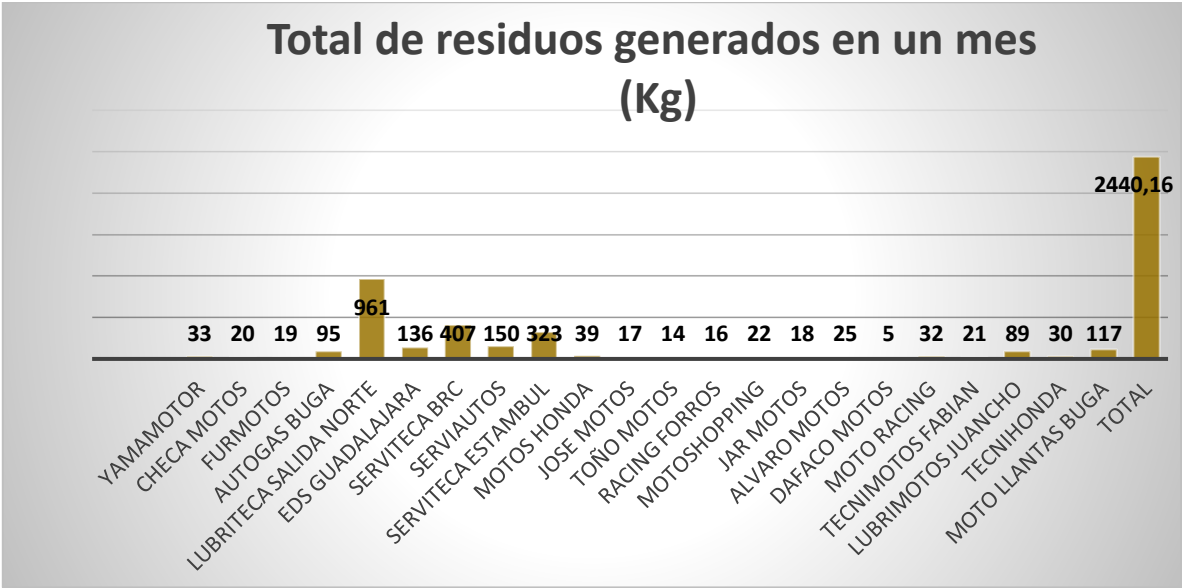
En la sección de anexos se pueden apreciar los resultados obtenidos a través del formato de registro de cantidades de aceite automotor usado, para cada establecimiento (**Anexo 3**)

La información fue proporcionada por los establecimientos generadores en mililitros, una vez recolectados, los datos fueron transformados a una unidad de peso para que coincidieran con la unidad de capacidad de los vehículos, en este caso, kilogramos y toneladas.

Se determinó que en un periodo de tiempo de un mes aproximadamente, se generan alrededor de 2,5 toneladas de aceite automotor usado por parte.

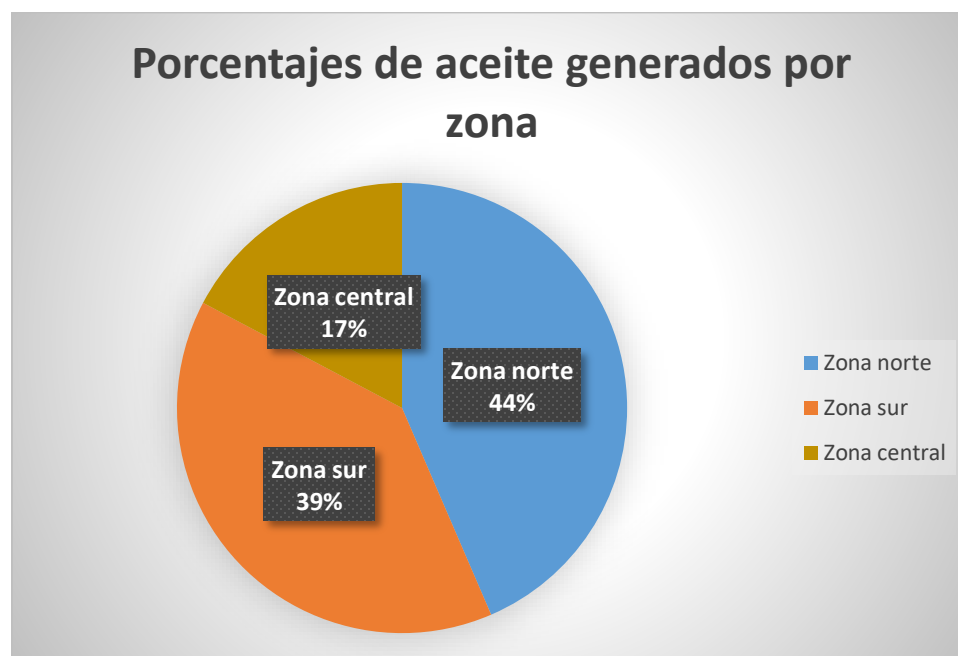
de los establecimientos incluidos en el proyecto, esto se pueda apreciar mejor en la **Figura 14.**

FIGURA 14. Total, de residuos generados en un mes.



También se logró apreciar, que a pesar de que la zona presenta la mayor concentración de establecimientos generadores, es la que menos cantidad de residuos genera, como se puede observar en la **Figura 15.** tan solo genera 447 kilogramos de residuos en un mes, lo que representa el 17% de la cantidad total generada, por otra parte, las zonas norte y sur generan 1.127 y 1.015 kilogramos lo que representa en 44 y 39% respectivamente.

FIGURA 15. Porcentajes de aceite generados por zona



9.2.2 Distancias de ruta calculadas

Se calcularon las distancias de ir de cada uno de los nodos, hasta todos los demás, a continuación, se presenta la **Tabla 6**, que corresponde al consolidado de distancias obtenido en unidades de kilómetros.

La matriz de distancias calculadas representa uno de los insumos principales para la construcción del modelo matemático, además al considerar dichas distancias como las rutas más cortas a través de la ciudad, hace que el problema represente adecuadamente la realidad.

Tabla 6. Consolidado de distancias.

	Moto llantas Buga	Yamamoto	Checa motos	Fur motos	Autogas Buga	Lubriteca	EDS Guadalajara	Serviteca BRC	Serviautos Guadalajara	Serviteca Stambul	Motos Honda	Jose motos	Toño motos	Racing forros	Motoshoppi ng	JAR motos	Alvaro motos	Dafaco motos	Motoracing	Tecnimotos Fabian	Lubrimotos Juancho	Tecnihonda
	Distancia km																					
Moto llantas Buga	0,0	1,6	1,4	1,4	3,2	2,3	2,2	2,2	1,7	1,8	0,4	0,8	0,8	0,4	1,5	0,7	0,6	0,7	0,9	0,9	0,9	0,7
Yamamoto	1,8	0,0	0,3	0,2	2,0	2,3	3,2	3,2	2,7	2,5	1,4	1,8	1,8	1,4	2,5	1,9	2,0	2,1	2,2	2,2	2,2	2,0
Checa motos	1,5	0,7	0,0	0,6	2,4	2,5	2,9	3,0	2,5	2,4	1,1	1,5	1,5	1,3	2,2	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	1,7
Fur motos	1,8	0,1	0,3	0,0	2,0	2,4	3,2	3,2	2,7	2,5	1,4	1,8	1,8	1,4	2,5	2,0	2,1	2,1	2,2	2,2	2,2	2,0
Autogas Buga	2,7	2,7	2,5	2,5	0,0	0,3	4,1	4,1	3,7	3,7	2,3	2,7	2,7	2,3	3,4	2,9	2,9	3,0	3,1	3,1	3,1	2,9
Lubriteca	14,9	15,5	15,3	15,4	14,4	0,0	19,3	19,1	18,0	17,0	14,6	15,0	15,0	14,6	15,6	15,1	15,2	15,2	15,3	15,3	15,3	15,1
EDS Guadalajara	1,9	2,9	3,0	2,8	6,2	6,5	0,0	0,2	0,6	0,9	2,3	1,8	1,8	2,3	1,0	1,6	1,7	1,7	1,5	1,4	1,5	1,7
Serviteca BRC	1,9	2,8	2,9	2,7	6,1	6,4	0,2	0,0	0,5	0,8	2,1	1,6	1,6	2,1	1,0	1,6	1,7	1,7	1,5	1,5	1,5	1,7
Serviautos	1,4	2,7	2,7	2,6	4,6	3,7	0,7	0,7	0,0	0,3	1,6	1,1	1,1	1,6	0,5	1,1	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0	1,2
Serviteca Stambul	1,5	3,1	3,1	2,9	4,8	3,9	0,8	0,9	0,1	0,0	1,7	1,3	1,3	1,7	0,6	1,3	1,4	1,4	1,1	1,1	1,1	1,3
Motos Honda	0,3	1,5	1,6	1,4	3,4	2,7	1,8	1,8	1,4	1,4	0,0	0,4	0,4	0,0	1,1	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8	0,6
Jose motos	0,8	1,8	2,1	1,9	4,0	3,1	1,4	1,4	1,0	1,0	0,9	0,0	0,0	0,9	0,7	0,5	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,6
Toño motos	0,8	1,8	2,0	1,9	4,0	3,1	1,4	1,4	1,0	1,0	0,9	0,0	0,0	0,4	0,7	0,5	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,6
Racing forros	0,3	1,5	1,6	1,4	3,4	2,7	1,8	1,8	1,3	1,4	0,0	0,4	0,4	0,0	1,1	0,5	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	0,6
Motoshoppi ng	0,9	2,5	2,5	2,4	4,2	3,3	1,2	1,2	0,7	0,8	1,3	0,9	0,9	1,3	0,0	0,7	0,7	0,8	0,5	0,5	0,5	0,7
JAR motos	0,3	1,8	1,8	1,7	2,8	2,6	1,6	1,7	1,2	1,3	0,7	0,2	0,2	0,7	0,9	0,0	0,1	0,1	0,6	0,6	0,6	0,0
Alvaro motos	0,2	1,7	1,7	1,6	2,7	2,5	2,0	2,1	1,6	1,7	0,6	0,6	0,6	0,6	1,3	0,5	0,0	0,0	0,8	0,7	0,8	0,6
Dafaco motos	0,2	1,7	1,7	1,6	3,4	2,5	2,0	2,0	1,6	1,6	0,6	0,6	0,6	0,6	1,3	0,5	0,0	0,0	0,7	0,7	0,7	0,6
Motoracing	0,4	2,0	2,0	1,9	3,7	1,8	1,8	1,8	1,3	1,4	0,8	0,4	0,4	0,8	1,0	0,2	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0	0,2
Tecnimotos Fabian	0,4	2,0	2,0	1,9	3,7	1,8	1,8	1,8	1,3	1,4	0,8	0,4	0,4	0,8	1,0	0,2	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0	0,2
Lubrimotos	0,4	2,0	2,0	1,9	3,7	1,8	1,8	1,9	1,3	1,4	0,8	0,4	0,4	0,8	1,0	0,1	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,2
Tecnihonda	0,2	1,8	1,8	1,7	3,5	2,6	1,7	1,8	1,3	1,4	0,6	0,3	0,3	0,6	1,0	0,6	0,1	0,1	0,8	0,8	0,8	0,0

9.2.3 Localizaciones potenciales

Se determinaron las mejores cuatro posibles localizaciones para el centro de acopio mediante los métodos planteados en la metodología, en esta sección se presentarán los resultados obtenidos de cada uno de los métodos.

9.2.3.1 Método de carga-distancia

En primera instancia para resolver este método, se determinaron las cargas generadas por cada uno de los establecimientos como se muestra a continuación en la **Tabla 7**

Tabla 7. Matriz de cargas L_{ij} .

Cantidades generadas		
Establecimiento	Kg)	(Ton)
Moto Llantas Buga	117,31	0,117
Yamamotor	32,91	0,033
Checa Motos	19,78	0,020
Furmotos	18,84	0,019
Autogas Buga	95,06	0,095
Lubriteca Salida Norte	960,82	0,961
EDS Guadalajara	135,77	0,140
Serviteca BRC	406,82	0,410
Serviautos	149,81	0,150
Serviteca Estambul	323,45	0,320
Motos Honda	39,3	0,040
Jose Motos	17,46	0,020
Toño Motos	14,48	0,010
Racing Forros	16,05	0,020
MotoShopping	21,5	0,022
JAR Motos	18,02	0,018
Alvaro Motos	24,85	0,025
DAFACO Motos	5,48	0,005
Moto Racing	32,09	0,032
Tecnimotos Fabian	21,44	0,021
Lubrimotos Juancho	89,17	0,089
TecniHonda	29,96	0,030

En la segunda instancia se creó la matriz de distancias D_{ij} , en donde se encuentran las distancias de ir desde cada uno de los establecimientos a las localizaciones potenciales de los depósitos. Esto se observa en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Matriz de distancias Dij.

Depositos j	Serviautos Guadalajara	Serviteca Stambul	JAR motos	Motoracing	Tecnimotos Fabian	Lubrimotos Juancho	Moto llantas Buga
Nodos i	Distancia (m)						
Moto llantas Buga	1745	1820	690	915	905	917	0
Yamamotor	2650	2510	1945	2215	2205	2217	1800
Checa motos	2485	2370	1670	1920	1910	1922	1470
Fur motos	2655	2520	1980	2225	2215	2227	1810
Autogas Buga	3665	3740	2850	3098	3088	3100	2650
Lubriteca	17995	16955	15095	15345	15335	15347	14895
EDS Guadalajara	640	895	1600	1458	1448	1460	1880
Serviteca BRC	475	755	1615	1473	1463	1475	1890
Serviautos Guadalajara	0	280	1130	990	980	992	1405
Serviteca Stambul	135	0	1265	1125	1115	1127	1540
Motos Honda	1355	1430	540	790	780	792	340
Jose motos	955	1035	530	390	380	392	800
Toño motos	950	1030	525	385	375	387	795
Racing forros	1345	1420	530	780	770	782	330
Motoshopping	700	835	650	510	500	512	920
JAR motos	1180	1260	0	615	605	617	270
Alvaro motos	1575	1650	525	750	740	752	175
Dafaco motos	1555	1635	510	735	725	737	160
Motoracing	1320	1400	150	0	10	2	406
Tecnimotos Fabian	1330	1410	150	10	0	12	420
Lubrimotos Juancho	1318	1398	148	2	12	0	408
Tecnihonda	1295	1375	575	795	785	797	225

Finalmente se aplicó la ecuación de la función objetivo del método en forma de matriz para concluir con la sumatoria de las columnas y obtener así el puntaje de carga-distancia LD de cada una de las localizaciones potenciales.

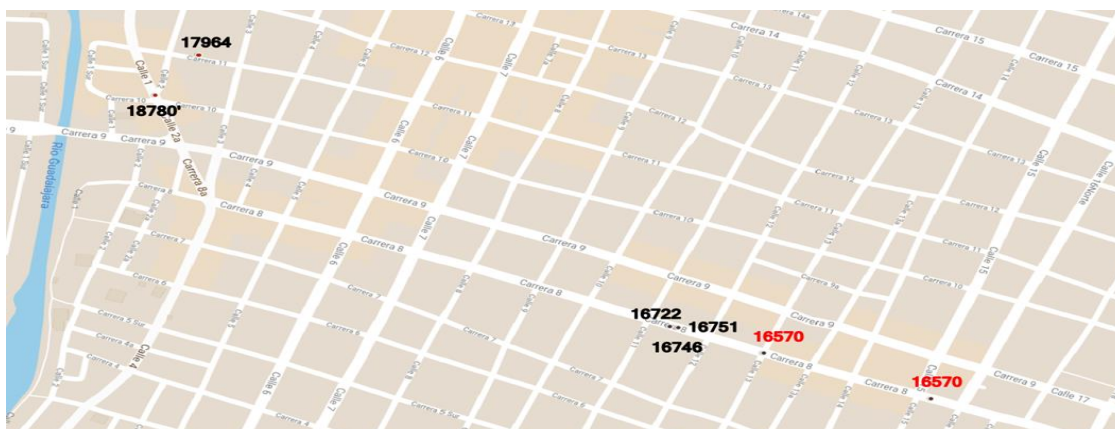
El resultado apreciado en la **Tabla 9** indica dos localizaciones con el mismo puntaje, por ende, se decidió considerar ambas localizaciones como posibles centros de acopio en el modelo matemático.

Tabla 9. Matriz de carga-distancia LD.

Serviautos Guadalajara	Serviteca Stambul	JAR motos	Motoracing	Tecnimotos Fabian	Lubrimotos Juancho	Moto llantas Buga
87,5	82,8	64,2	73,1	72,8	73,2	59,4
49,7	47,4	33,4	38,4	38,2	38,4	29,4
50,4	47,9	37,6	42,3	42,1	42,3	34,4
348,2	355,3	270,8	294,3	293,4	294,5	251,8
17293,2	16293,8	14506,3	14746,5	14736,9	14748,5	14314,1
89,6	125,3	224,0	204,1	202,7	204,4	263,2
194,8	309,6	662,2	603,9	599,8	604,8	774,9
0,0	42,0	169,5	148,5	147,0	148,8	210,8
43,2	0,0	404,8	360,0	356,8	360,6	492,8
54,2	57,2	21,6	31,6	31,2	31,7	13,6
19,1	20,7	10,6	7,8	7,6	7,8	16,0
9,5	10,3	5,3	3,9	3,8	3,9	8,0
26,9	28,4	10,6	15,6	15,4	15,6	6,6
15,4	18,4	14,3	11,2	11,0	11,3	20,2
21,2	22,7	0,0	11,1	10,9	11,1	4,9
39,4	41,3	13,1	18,8	18,5	18,8	4,4
7,8	8,2	2,6	3,7	3,6	3,7	0,8
42,2	44,8	4,8	0,0	0,3	0,1	13,0
27,9	29,6	3,2	0,2	0,0	0,3	8,8
117,3	124,4	13,2	0,2	1,1	0,0	36,3
38,9	41,3	17,3	23,9	23,6	23,9	6,8
204,2	212,9	80,7	107,1	105,9	107,3	0,0
18780	17964	16570	16746	16722	16751	16570

En la **Figura 16** se pueden observar los establecimientos considerados por este método, su respectivo puntaje de carga distancia y también las localizaciones seleccionadas para la modelación matemática.

FIGURA 16. Establecimientos seleccionados para modelación matemática.



9.2.3.2 Método de centro de gravedad

La **Tabla 10** se muestra a continuación, en ella se encuentran las coordenadas calculadas, las cantidades generadas y el cálculo de los factores del centro de gravedad.

Tabla 10. Componentes del centro de gravedad.

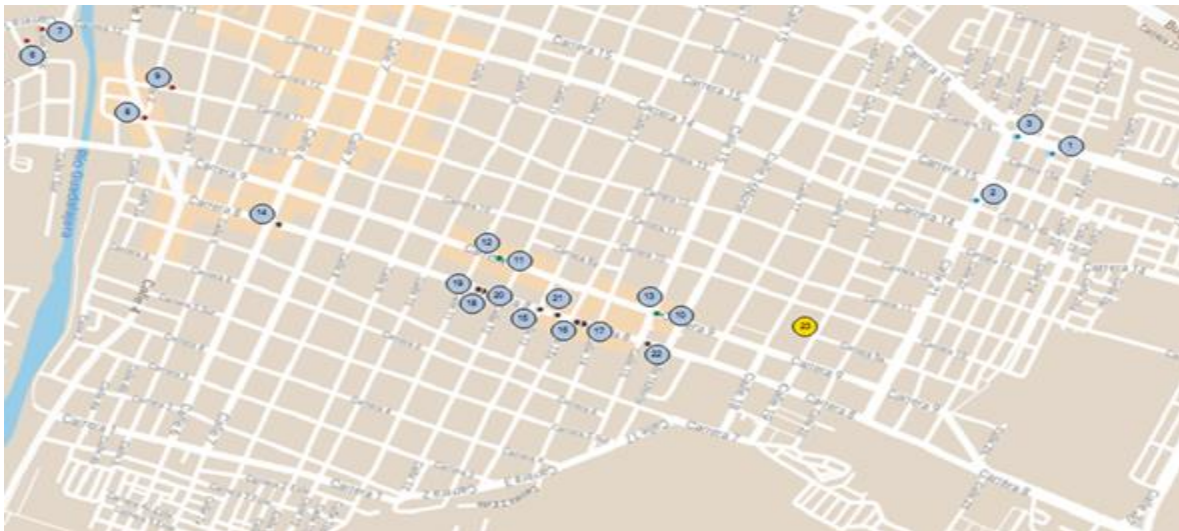
Nombre	X	Y	Cantidad generada (Ton)	$Dx \cdot Wi$	$Dy \cdot Wi$
Yamamotor	853	164	0,03	28,15	5,41
Checa Motos	792	213	0,02	15,84	4,26
Furmotos	823	147	0,02	15,64	2,79
Autogas Buga	1254	604	0,10	119,13	57,38
Lubriteca Salida Norte	1282	619	0,96	1232,00	594,86
EDS Guadalajara	33	53	0,14	4,62	7,42
Serviteca BRC	46	42	0,41	18,86	17,22
Serviautos	127	128	0,15	19,05	19,20
Serviteca Estambul	150	98	0,32	48,00	31,36
Motos Honda	541	325	0,04	21,64	13,00
Jose Motos	416	272	0,02	8,32	5,44
Toño Motos	409	269	0,01	4,09	2,69
Racing Forros	534	324	0,02	10,68	6,48
MotoShopping	235	235	0,02	5,17	5,17
JAR Motos	442	320	0,02	7,96	5,76
Alvaro Motos	473	334	0,03	11,83	8,35
DAFACO Motos	480	336	0,01	2,40	1,68
Moto Racing	397	301	0,03	12,70	9,63
Tecnimotos Fabian	391	300	0,02	8,21	6,30
Lubrimotos Juancho	402	303	0,09	35,78	26,97
TecniHonda	459	326	0,03	13,77	9,78
Moto Llantas Buga	530	354	0,12	62,01	41,42
Total			2,597	1705,842	882,571

Aplicando las siguientes ecuaciones se obtuvieron las coordenadas del centro de gravedad, el cual fue ubicado en el mapa de la ciudad usando Grafos.

$$C_x = \frac{\sum_i^n di_x W_i}{\sum_i^n W_i} = 656,8 \quad C_y = \frac{\sum_i^n di_y W_i}{\sum_i^n W_i} = 339,8$$

En la siguiente figura se muestra la ubicación geográfica de las coordenadas calculadas, la cual hace referencia al nodo de color amarillo. (Ver **Figura 17**)

FIGURA 17. Localización del centro de gravedad calculado.



Cabe resaltar que la localización correspondiente al nodo de color amarillo, arroja una zona de la ciudad en donde no se ubican bodegas o posibles lugares para el almacenamiento de los residuos de aceite usado, por ese motivo y por cuestión de optimización matemática, se optó por aproximar este centro de gravedad al nodo diez, que representa el establecimiento motos honda y es el más cercano al centro de gravedad calculado.

En la **Figura 18** se muestra más claramente el nodo seleccionado como centro de gravedad.

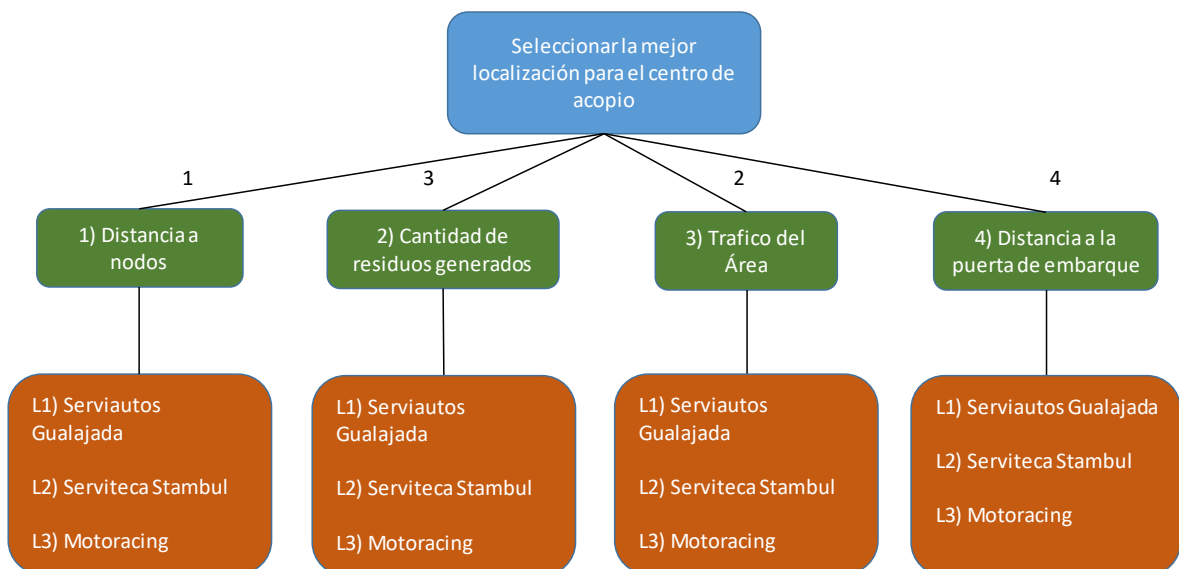
FIGURA 18. Centro de gravedad aproximado.



9.2.3.3 Proceso de análisis jerárquico-AHP

El primer paso para resolver el AHP fue la definición del objetivo y de los criterios a utilizar, esto se observa en la **Figura 19**.

FIGURA 19. Estructura jerárquica del problema.



Una vez definida la estructura jerárquica se realizó la comparación entre los criterios como se muestra a continuación.

Tabla 11. Comparación de criterios de decisión.

Comparación criterios
La distancia a nodos es fuertemente preferida a la cantidad de residuos generados
La distancia a nodos es moderadamente preferida a el tráfico del área
La distancia a nodos es muy fuertemente preferida a la distancia a la puerta de embarque
La cantidad de residuos generados es moderadamente preferido a la distancia a la puerta de embarque
El tráfico del area es moderadamente preferido a la cantidad de residuos generados
El tráfico del area es fuertemente preferido a la distancia a la puerta de embarque

Para finalizar con el proceso de comparación de criterios se construyó otra tabla de comparación de criterios mediante la escala de medida Saaty. Se validó su consistencia, en la tabla 12 se muestra el vector prioridad obtenido.

Tabla 12. Evaluación de criterios mediante escala de Saaty.

Comparación de criterios										VECTOR PRIORIDAD	
MARIZ DE COMPARACIÓN					MARIZ DE NORMALIZADA						
	Dist. Nod.	Cant. Resid.	Traf. Area	Dist. Puert	Dist. Nod.	Cant. Resid.	Traf. Area	Dist. Puert			
Dist. Nod.	1	5	3	7	34/57	15/28	45/68	4/9		0,56	
Cant. Resid.	1/5	1	1/3	3	8/67	3/28	5/68	1/5		0,12	
Traf. Area	1/3	3	1	5	1/5	9/28	15/68	1/3		0,26	
Dist. Puert	1/7	1/3	1/5	1	4/47	1/28	3/68	1/16		0,06	
Σ	12/3	9 1/3	4 1/2	16							

Posterior a la evaluación de los criterios se realizó la comparación de las alternativas, para ello fue necesario establecer referencias objetivas de comparación, las cuales se pueden apreciar en la **Tabla 13**.

Tabla 13. Datos para comparación de alternativas.

		Distancia a nodos (m)	Cantidad de Res (kg)	Trafico del area	Distancia a puerta (m)
L1	Serviautos Guadalajara	33067	149,8	3	2
L2	Serviteca Stambul	36427	323,4	6	6
L3	Motoracing	22166	32,1	10	4

En base a la tabla anterior se logró realizar la comparación de alternativas para cada uno de los tres criterios, estas comparaciones se realizaron mediante la escala de Saaty y se puede observar en el **Anexo 4**.

A partir de las comparaciones realizadas, se obtuvo la matriz de vectores prioridad, el vector prioridad de criterios y el vector de decisión.

Tabla 14. Vector decisión.

MATRIZ VECTORES PRIORIDAD					VECTOR PRIORIDAD CRITERIOS	VECTOR DECISIÓN	VECTOR DECISIÓN
	Dist. Nod.	Cant. Resid.	Traf. Area	Dist. Puert			
L1	1/7	2/7	2/3	5/8	0,56	0,3269681	33%
L2	0,09	2/3	2/7	1/9	0,12	0,2133231	21%
L3	3/4	0,07	0,06	1/4	0,26	0,4597087	46%
Σ					0,06		

Como se puede observar, el vector de decisión indica que la localización tres es la mejor opción, la cual corresponde a Motoracing, en la **Figura 20** se tiene la ubicación geográfica del establecimiento.

FIGURA 20. Depósito potencial calculado mediante AHP.



9.3 Modelo matemático

A continuación, se muestra el código en lenguaje de programación del modelo seleccionado:

```

param N >= 0 integer; # Número de nodos
param M >= 0 integer; # Numero de vehículos
param c{1..N, 1..N} >= 0; # Distancia entre nodos
param q{i in 1..N}; # Cantidades de aceite generadas en los puntos
param Q{k in 1..M}; # Capacidad de vehículos
param p{k in 1..M}; # Relación de costo vehículos

var X{1..N, 1..N, 1..M} >= 0 binary;
var U{1..N} >= 0;

```

Minimize Distancia: $\sum\{k \text{ in } 1..M\} \sum\{i \text{ in } 1..N\} \sum\{j \text{ in } 1..N\} p[k]*c[i,j]*X[i,j,k];$

subject to R1 $\{j \text{ in } 2..N\}$: $\sum\{k \text{ in } 1..M\} \sum\{i \text{ in } 1..N\} X[i,j,k] = 1;$ # Cada punto será visitado solo una vez por el vehículo

subject to R2 $\{k \text{ in } 1..M, h \text{ in } 1..N\}$: $\sum\{i \text{ in } 1..N\} X[i,h,k] = \sum\{j \text{ in } 1..N\} X[h,j,k];$ # Lo que salga del nodo i debe ser lo mismo que llegue al j

subject to R3 $\{i \text{ in } 1..N, j \text{ in } 2..N\}$: $U[j] \geq U[i] - Q[M] + (q[j] + Q[M])* \sum\{k \text{ in } 1..M\} X[i,j,k];$ # Capacidad de los vehículos

subject to R4 : $U[1] = 0;$ # Que el vehículo salga vacío desde el centro de acopio

subject to R5 $\{j \text{ in } 2..N\}$: $U[j] \leq \sum\{k \text{ in } 1..M\} \sum\{i \text{ in } 1..N\} Q[k]*X[i,j,k];$ # Capacidad de los vehículos

9.4 Resultados computacionales

Una vez ajustado el modelo matemático al lenguaje de programación AMPL, se realizaron las pruebas computacionales a través de NEOS solvers.

Los costos fijos de los depósitos se suman en la respectiva tabla de resultados de cada una de las rutas, es necesario aclarar, que estos costos, representan el precio de los arriendos de los establecimientos seleccionados, ajustado a la unidad temporal de medida de la ruta, es decir a días.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los depósitos potenciales

9.4.1 Depósito potencial 1

En la primera iteración, se consideró uno de los establecimientos arrojados por el método carga distancia, el cual hace referencia a Moto Llantas Buga. El nodo se ubica en la carrera 8 # 15-27. En la siguiente tabla se tienen los resultados obtenidos.

Tabla 15. Resultados de Neos – Carga distancia 1.

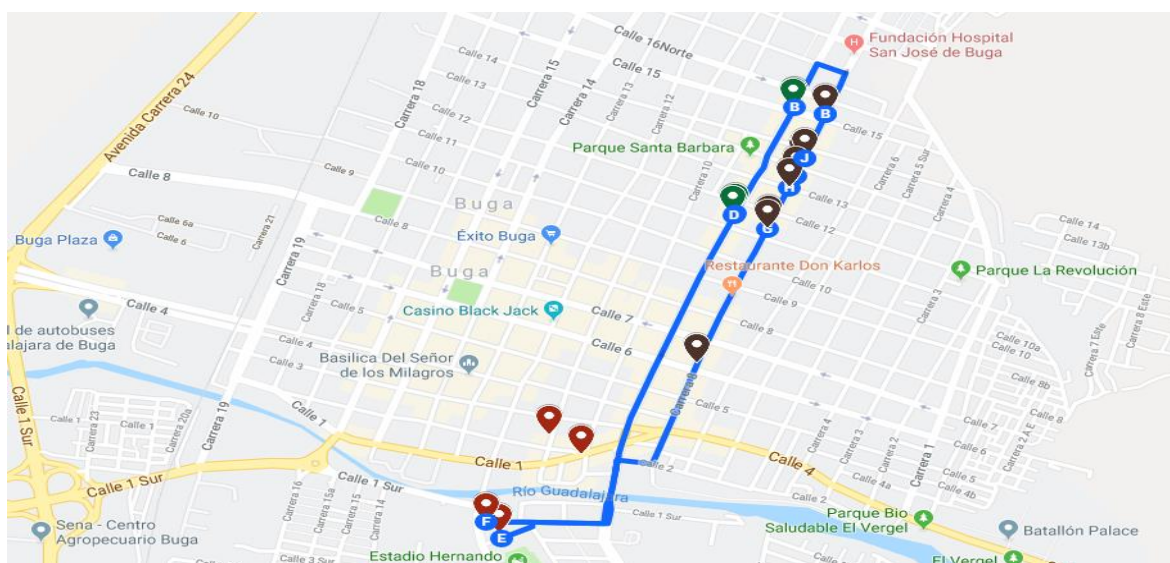
Ruta Establecida	Vehículos	Capacidad del vehículo	Capacidad Utilizada (T)	% de Utilización	Distancia de Recorrido (M)	Localización Potencial	Costo Fijo	Función Objetivo	Costo Total
1-8-9-10-1-13-14-11-16-20-19-21-1	AYCO	0,7	1,212	173%	5913	Jar Motos	\$ 40.000,00	\$ 5.652,02	\$ 45.652,02
1-22-17-18-2-4-5-3-6-7-12-15-1	K2500	1,5	1,36	91%	20030				

Como se puede observar en la **Tabla 15** se tienen dos rutas, una para cada uno de los vehículos, en donde el vehículo 1 (AYCO) presenta un porcentaje de utilización del 121%, esto indica que el vehículo debe retornar al depósito para descargar el residuo antes de continuar con la ruta, recorriendo una distancia total de 7.695 metros. Por otro lado, el vehículo 2 (K2500) solo ocupa el 75% de capacidad antes de regresar al depósito, recorriendo un total de 19.521 metros.

También se puede apreciar que el costo calculado a partir de la distancia recorrida (\$5.824,5) concuerda con el arrojado por la función objetivo (\$5.775,37). El tiempo de computo requerido por NEOS solvers, fue de 25 minutos.

A continuación, se muestra la ruta establecida por la solución en el mapa de la ciudad para cada uno de los vehículos, creada mediante Google maps.

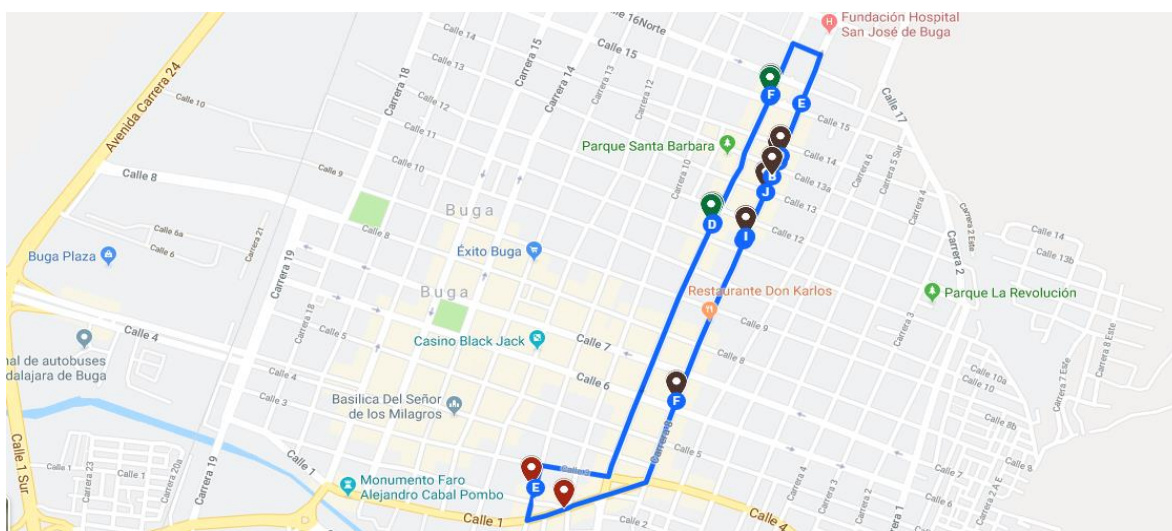
FIGURA 21. Ruta 1 del vehículo AYCO. Metodología carga-distancia 1.



En el primero recorrido, partiendo desde el deposito potencial uno, el vehículo alcanza casi el máximo de su capacidad, razón por la cual debe volver al depósito a descargar, posteriormente sale nuevamente desde el deposito sin ninguna carga y realiza el recorrido dos, el cual puede observarse en la **Figura 21**.

Se puede apreciar en ambas figuras, que el vehículo uno (AYCO) satisface la demanda de los establecimientos localizados en las zonas sur y centro de la ciudad.

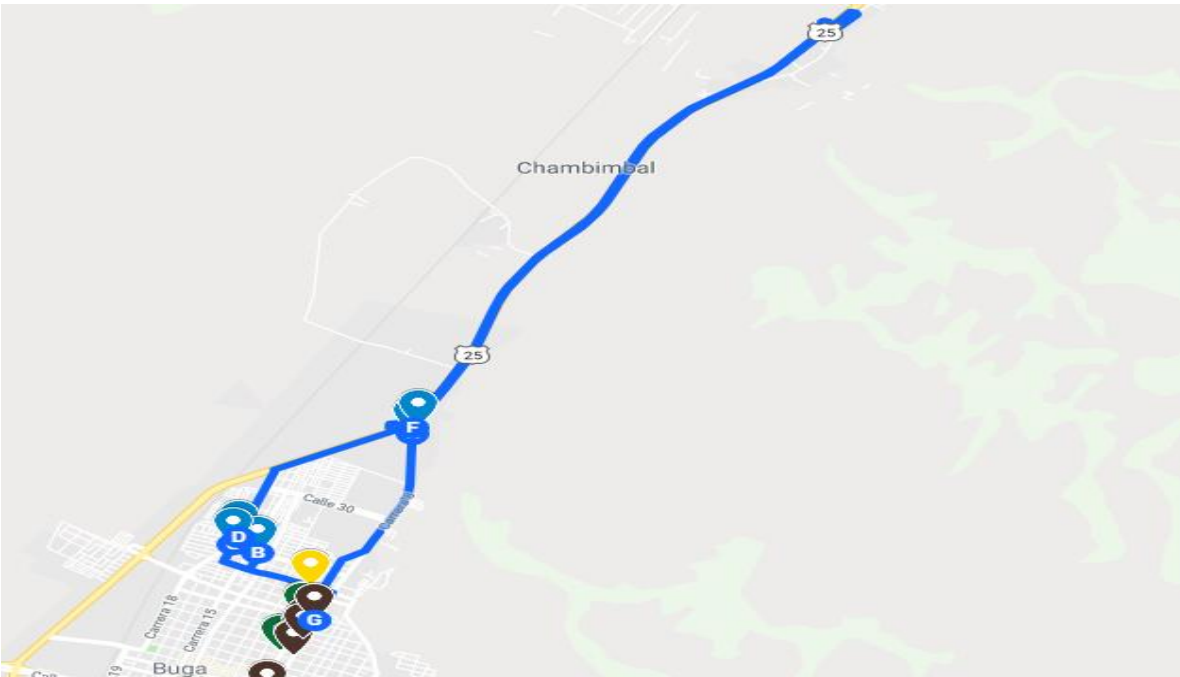
FIGURA 22. Ruta 2 del vehículo AYCO. Metodología carga-distancia 1.



Por otro lado, el segundo vehículo recorre los establecimientos de la zona norte únicamente, es bueno apreciar que se selecciona el vehículo con más capacidad (K2500) para esta zona, debido a que es la que mayor cantidad de residuos genera.

Otro factor a analizar en la ruta del vehículo dos es que gran parte del recorrido se debe al trayecto que debe realizar para retornar a la ciudad una vez es atendido el nodo de Lubriteca salida norte, debido a que este punto se encuentra sobre la carretera Variante. Esto implica un costo mucho mayor al generado por el vehículo uno en sus dos recorridos.

FIGURA 23. Ruta 1 del vehículo K2500. Metodología carga-distancia 1.



9.4.2 Depósito potencial 2

El segundo deposito potencial fue seleccionado al igual que el anterior, mediante el método de carga-distancia, en este caso, representa a JAR motos, el cual se encuentra localizado en la zona central de la ciudad, más específicamente en la carrera 8 # 13-02. En la **Tabla 16** se tienen los resultados seleccionado este nodo como depósito.

Tabla 16. Resultados de Neos – Carga distancia 2.

Carga distancia 2									
Ruta Establecida	Vehículos	Capacidad del vehículo	Capacidad Utilizada (T)	% de Utilización	Distancia de Recorrido (M)	Localización Potencial	Costo Fijo	Función Objetivo	Costo Total
1-8-9-10-1-13-14-11-16-20-19-21-1	AYCO	0,7	1,212	173%	5913	Jar Motos	\$ 40.000,00	\$ 5.652,02	\$ 45.652,02
1-22-17-18-2-4-5-3-6-7-12-15-1	K2500	1,5	1,36	91%	20030				

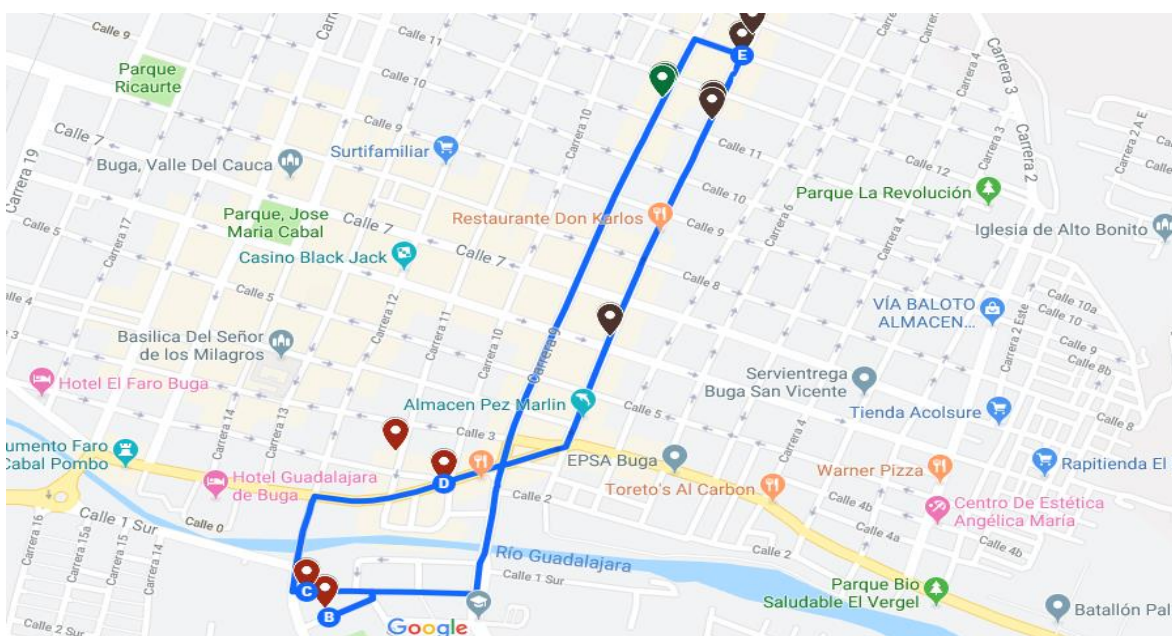
En la **Figura 24** se indican nuevamente dos rutas, una para cada uno de los vehículos, en este caso el vehículo uno (AYCO) tiene un porcentaje de utilización de su capacidad del 173%, haciendo que deba retornar al depósito en la cuarta iteración de la primera ruta.

El vehículo dos (K2500) por su parte alcanzó a utilizar el 91% de su capacidad total antes de regresar al depósito.

De acuerdo a las distancias recorridas por los vehículos uno (5.913 metros) y dos (20.030) se calculó el costo total de su recorrido como la multiplicación de las distancias por las respectivas tarifas de consumo de los vehículos, obteniéndose un costo aproximadamente igual (\$ 5692,8) al calculado por el modelo matemático (\$ 5652,02). El tiempo de cómputo que conllevó esta solución fue de 12 segundos.

En las figuras siguientes, se mostrará el recorrido de los vehículos, partiendo desde el depósito potencial dos.

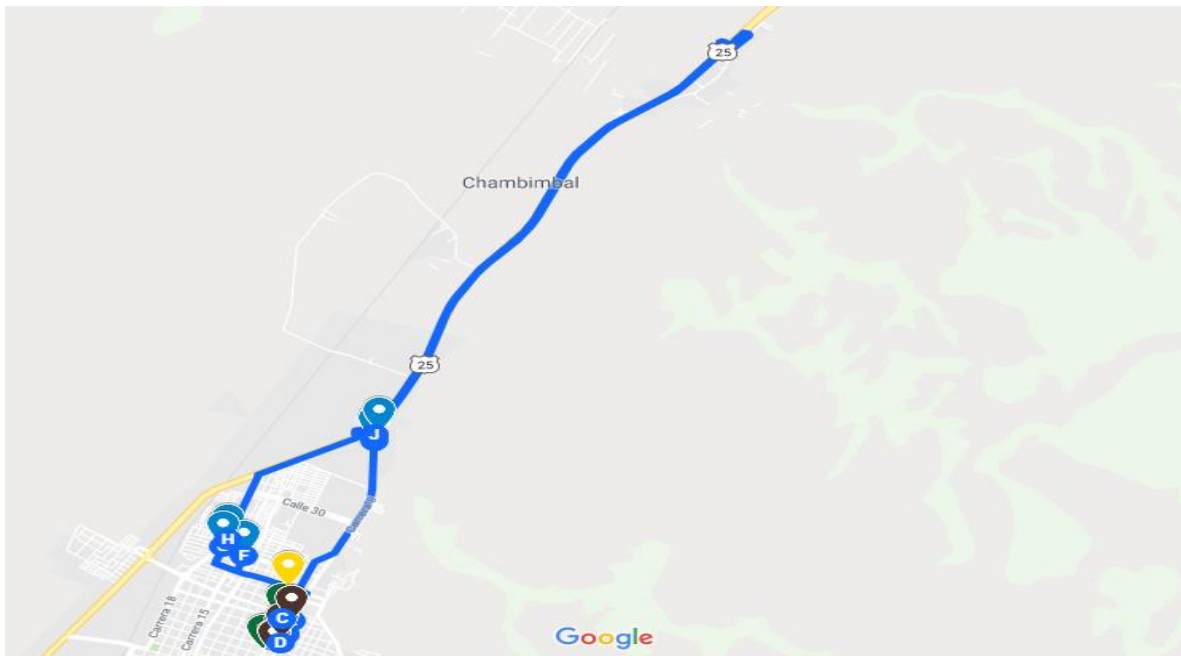
FIGURA 24. Ruta 1 del vehículo AYCO. Metodología carga-distancia 2.



De igual manera que el caso anterior, el vehículo uno alcanza el máximo de su capacidad, por lo cual debe retornar al depósito, una vez recolecta la demanda del nodo D de la **Figura 24**.

Posteriormente, una vez desocupado, el vehículo parte y realiza un segundo recorrido, el cual se tiene a continuación

FIGURA 26. Ruta 1 del vehículo K2500. Metodología carga-distancia 2.



La ruta seguida por el vehículo dos (K2500) se muestra en la **Figura 26**, en este caso se puede observar como el vehículo atiende los clientes de la zona norte, pero aparte de eso y a diferencia del método carga distancia 1, también se encarga de algunos nodos ubicados en la zona central, debido a esto se justifica el aumento en el porcentaje de utilización usado.

9.4.3 Depósito potencial 3

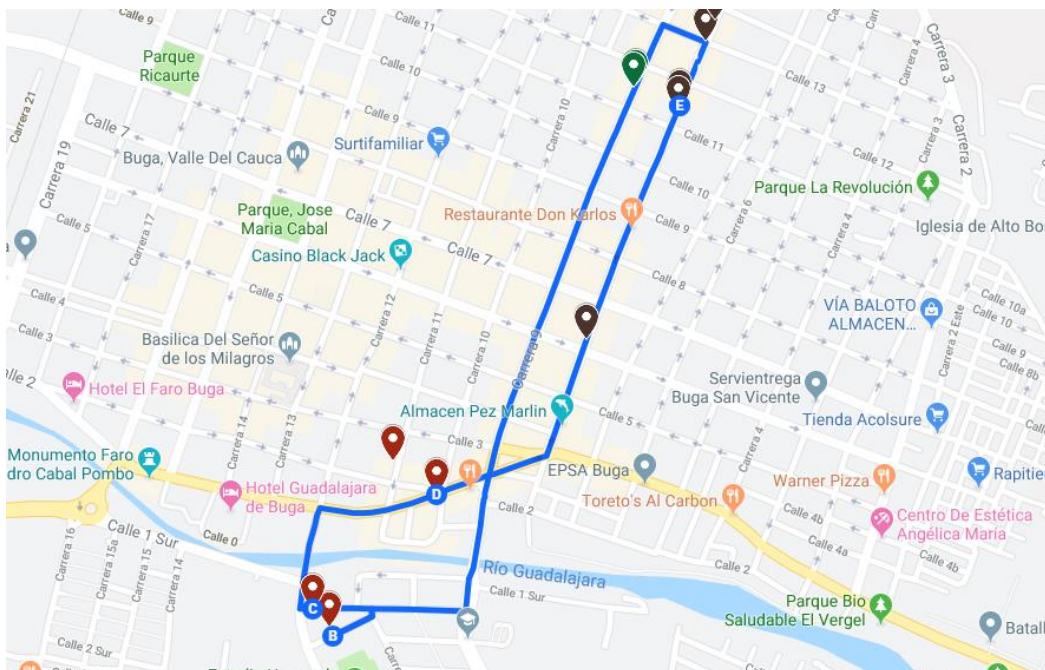
El resultado del tercer depósito obtenido bajo la metodología AHP (Ver **Tabla 17**) ubicado en Moto Racing en la carrera 8 # 11-52. Esta localización considera los criterios de distancia entre nodos, la cantidad de residuos que genera cada nodo, el tráfico del área y la distancia a la puerta de embarque.

Tabla 17. Resultados de Neos - Método AHP.

AHP									
Ruta Establecida	Vehículos	Capacidad del vehículo	Capacidad Utilizada (T)	% de Utilización	Distancia de Recorrido (M)	Localización Potencial	Costo Fijo	Función Objetivo	Costo Total
1-8-9-10-1-21-17-13-14-11-16-20-1	AYCO	0,7	1,198	171%	6064	Moto Racing	\$ 20.000,00	\$ 5.746,64	\$ 25.746,64
1-22-18-19-2-4-5-3-6-7-12-15-1	K2500	1,5	1,36	91%	20306				

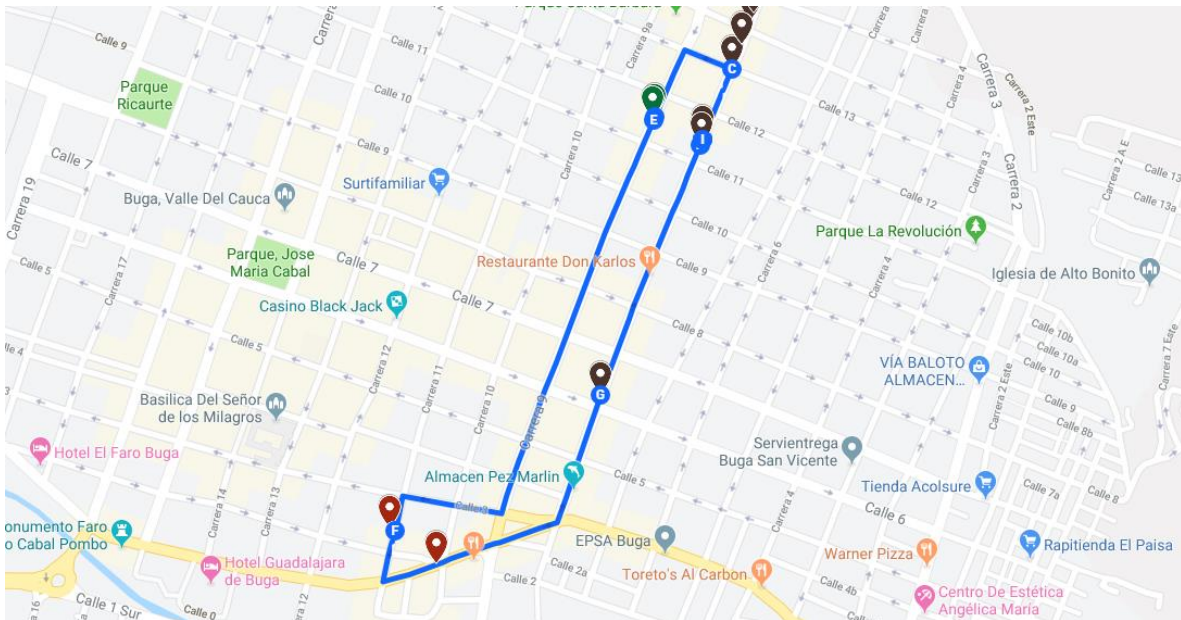
Con esta metodología al igual que con los métodos de carga distancia también se utilizan los dos vehículos en dos rutas. El vehículo AYCO atiende la demanda de la zona céntrica y sur de la ciudad y debe volver al depósito para descargar los residuos y atender nuevamente una ruta por los mismos sectores. (Ver **Figura 27**)

FIGURA 27. Ruta 1 del vehículo AYCO. Metodología AHP.



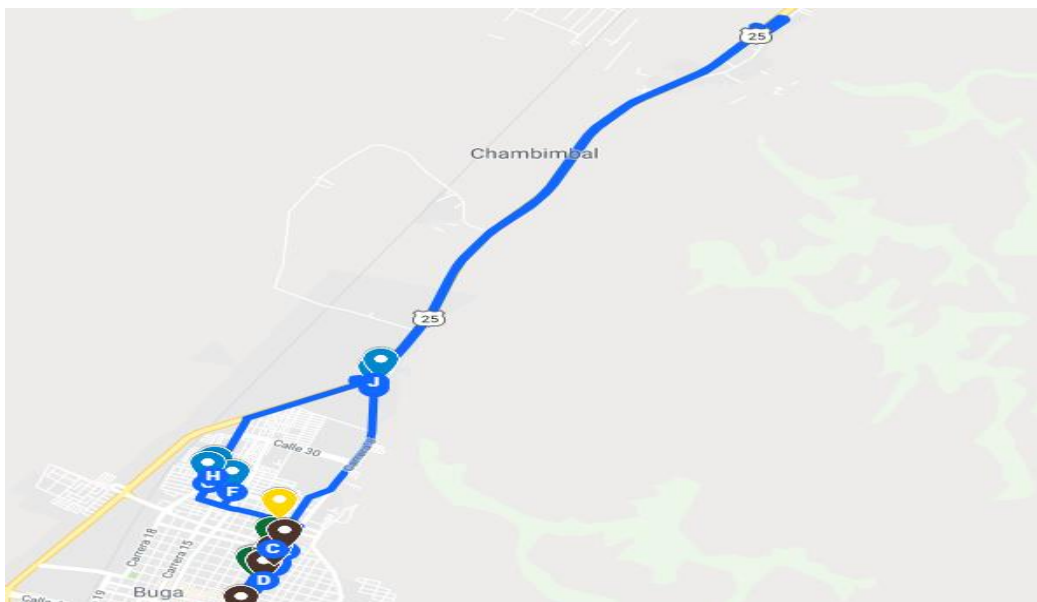
Como se puede observar en la **Figura 28**, el vehículo realiza una segunda ruta en donde alcanza el 71% de utilización para descargar en el depósito y finalizar su recorrido.

FIGURA 28. Ruta 2 del vehículo AYCO. Metodología AHP.



El vehículo K2500 atiende la zona norte de la ciudad y esto ratifica un patrón entre las rutas y los vehículos propiamente determinado por la demanda de cada una de las zonas. Para esta ruta el porcentaje de utilización fue de 91% y el recorrido de 20,3 km. (Ver **Figura 29**)

FIGURA 29. Ruta 1 del vehículo K2500. Metodología AHP.



El tiempo computacional para este método fue de 18 segundos utilizando el Solver AMPL CPLEX mediante NEOS y el costo calculado por la función objetivo (\$5.746,6) concuerda con el costo calculado por la distancia recorrida (\$5.781,2).

9.4.4 Depósito potencial 4

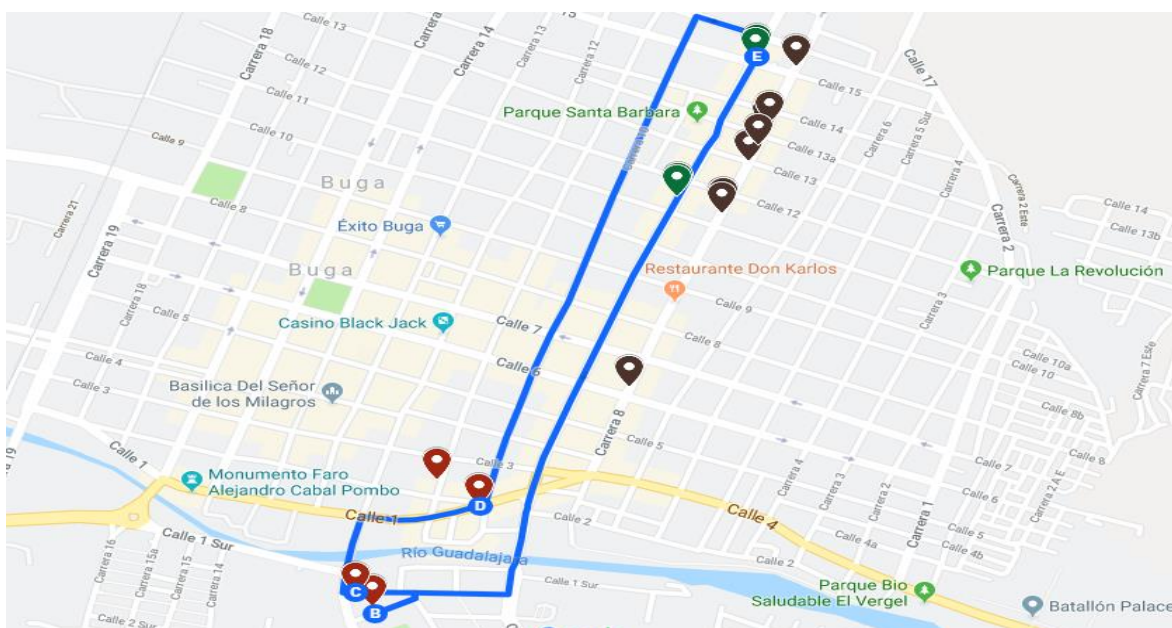
Los resultados de la cuarta localización potencial, obtenida utilizando el método centro de gravedad arrojaron como resultado Motos Honda teniendo en cuenta que por capacidad computacional se tuvo que aproximar a este nodo, ubicado en la Carrera 9 # 15-28. (Ver **Tabla 18**)

Tabla 18. Resultados Neos - Método Centro de Gravedad.

Centro de Gravedad									
Ruta Establecida	Vehículos	Capacidad del vehículo	Capacidad Utilizada (T)	% de Utilización	Distancia de Recorrido (M)	Localización Potencial	Costo Fijo	Función Objetivo	Costo Total
1-8-9-10-1-14-12-13-11-15-20-19-21-16-22-17-18-2-1	AYCO	0,7	1,42	203%	6866	Motos Honda	\$ 13.333,33	\$ 5.689,91	\$ 19.023,24
1-5-3-4-6-7-1	K2500	1,5	1,127	75%	19137				

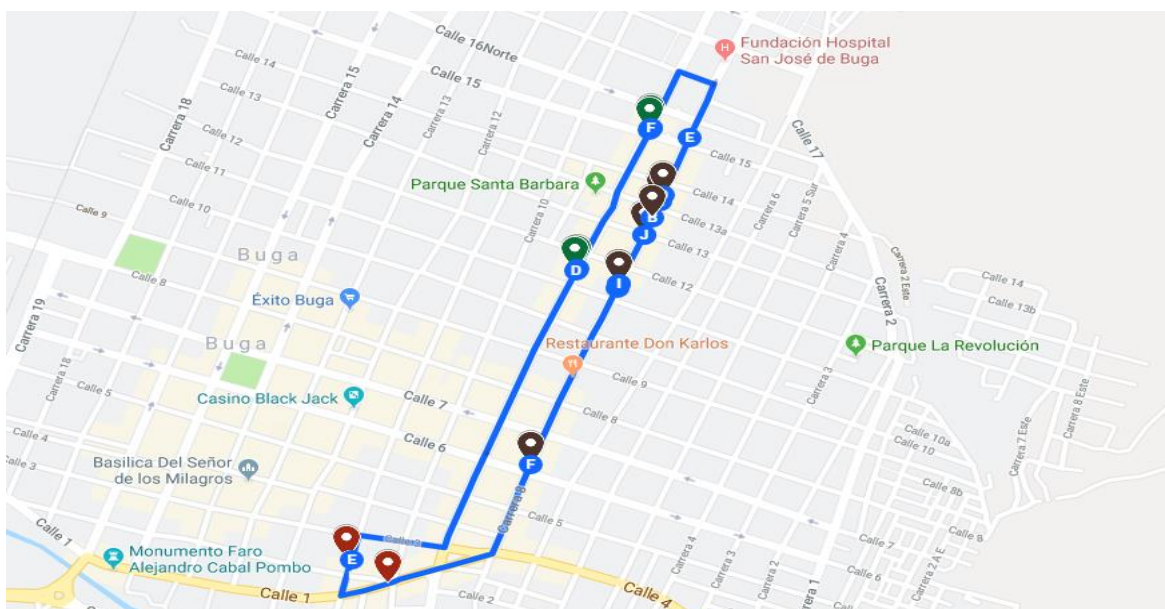
Los resultados para las dos rutas del vehículo AYCO se observan en la **Figura 30**. en donde cubre una primera ruta, realiza una descarga en el depósito y la segunda ruta obtiene un porcentaje de utilización de 103% con un costo de \$981,8.

FIGURA 30. Ruta 1 del vehículo AYCO. Metodología centro de gravedad.



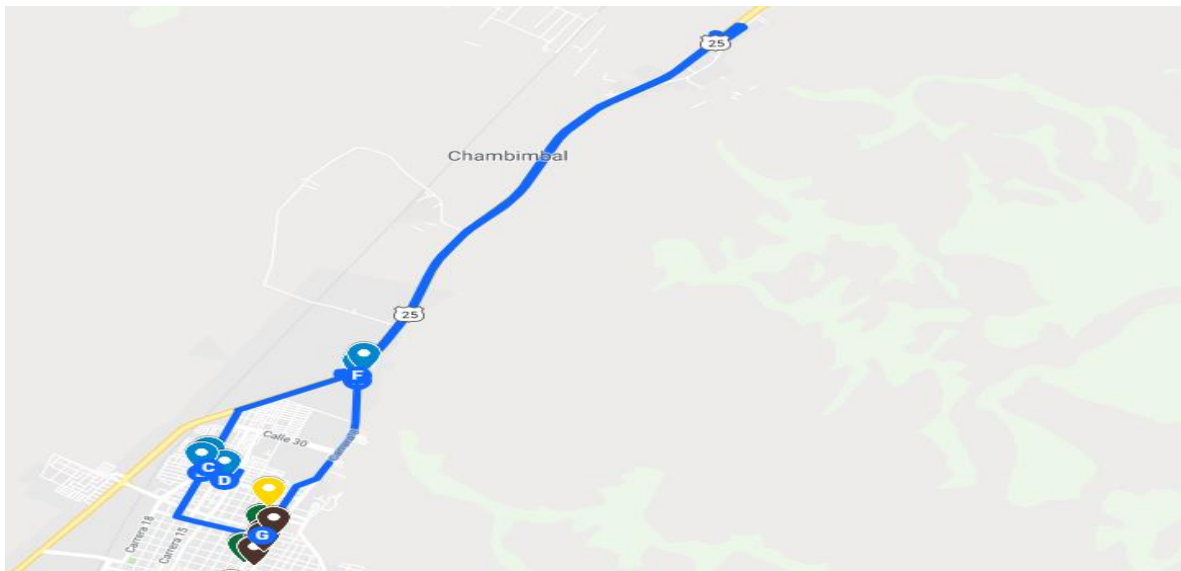
Los resultados de la segunda ruta del vehículo AYCO (Ver Figura 31).

FIGURA 31. Ruta 2 del vehículo AYCO. Metodología centro de gravedad.



El vehículo K2500 recorre 19,1 kilómetros en su ruta cubriendo el norte con un costo de \$4.631. (Ver Figura 32

FIGURA 32. Ruta 1 del vehículo K2500. Metodología centro de gravedad.



Con esta metodología los costos calculados por la distancia recorrida \$5613 se asemejan a los costos de la función objetivo \$5.689.9. El tiempo computacional fue de 2 minutos y 37 segundos.

10 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Con base en la metodología propuesta para la solución del problema de localización y ruteo de vehículos con restricciones de capacidad y flota heterogénea, se realiza un análisis de los resultados obtenidos, así como también de algunos parámetros que es necesario explicar para comprender de mejor manera el presente proyecto.

Mediante el modelo matemático, se logró determinar la mejor ubicación para el centro de acopio, para ello, cada uno de los establecimientos potenciales fueron validados y se realizó una comparación de cada uno en términos de: Costo de ruteo generado, costo total obtenido teniendo en cuenta los costos fijos de los establecimientos y tiempo computacional requerido por NEOS solvers. (**Ver tabla 19**)

Tabla 19. Comparación de resultados.

Localización Potencial	Metodo de selección	Costo Fijo	Funcion objetivo	Costo Total	Tiempo computacional (s)
Moto Llantas Buga	Carga-distancia (1)	\$ 16.667	\$ 5.775,37	\$ 22.442	745
Jar Motos	Carga-distancia (2)	\$ 40.000	\$ 5.652,02	\$ 45.652	12
Moto Racing	AHP	\$ 20.000	\$ 5.746,64	\$ 25.747	18
Motos Honda	Centro de gravedad	\$ 13.333,33	\$ 5.689,91	\$ 19.023,24	157

Se puede observar que, en términos de la función objetivo, todos los resultados son bastante aproximados, esto se debe principalmente a la reducida área de la ciudad en donde se realiza el ruteo. Sin embargo, el establecimiento obtenido mediante el método carga distancia (JAR motos) presenta el menor costo de ruta calculado (\$5652,02), a pesar de esto, no se puede concluir que esta fue la mejor localización para el deposito sin analizar los otros aspectos comparativos.

Los costos obtenidos por la función objetivo, hacen referencia a la multiplicación de la distancia total recorrida en kilómetros, por la relación de consumo de cada uno de los vehículos. Esto se puede apreciar de mejor manera en las siguientes fórmulas de equivalencia:

$$\text{Costos del vehículo } k (\$/\text{km}) = \text{Tarifa de gasolina } (\$/\text{gal}) * \text{consumo del vehículo } k (\text{gal}/\text{km})$$

Entonces:

$$\text{Costo de ruta (\$)} = \text{Costos del vehículo } k (\$/\text{km}) * \text{Distancia recorrida (km)}$$

De acuerdo a los costos fijos obtenidos mediante el trabajo de campo de la etapa 1 del proyecto, se logró determinar los costos totales de localizar y rutear en cada uno de los depósitos. (Ver figura 33)

FIGURA 33. Costos totales obtenidos.



En el caso de JAR motos, el cual hace referencia al método carga-distancia (2) se puede apreciar que presenta el mayor costo total de los depósitos, debido a un elevado costo fijo en el caso de que se decidiera tomar como centro de acopio. Es importante resaltar que este costo fijo sale de llevar a las unidades de medida de la ruta, el costo mensual de arrendamiento de cada uno de los establecimientos, en este caso, días.

De acuerdo a lo anterior se determinó que JAR motos representa la peor opción como centro de acopio de los residuos.

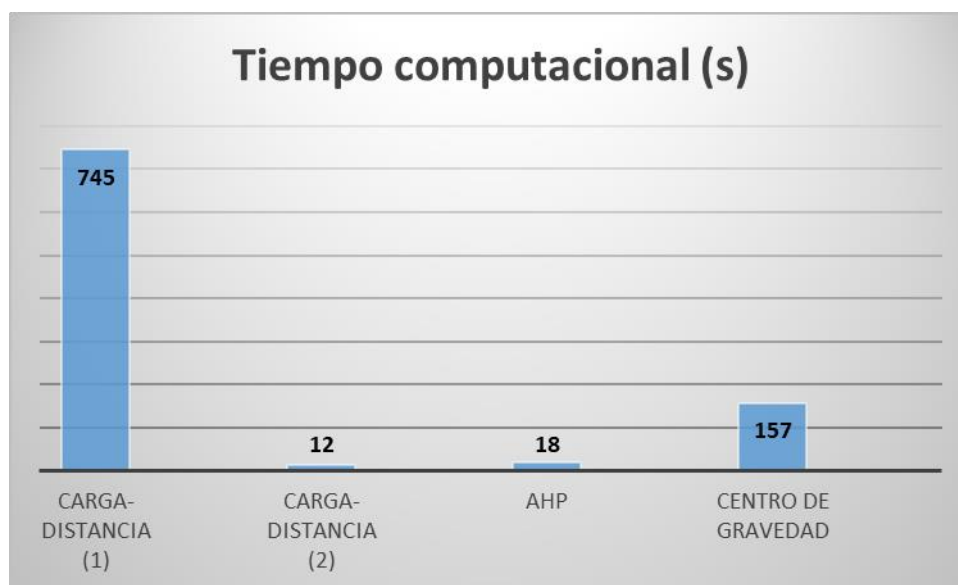
Las opciones de carga-distancia (1), AHP y centro de gravedad, presentan resultados muy similares, debido a que están localizados muy cerca uno del otro, esto sin tener en cuenta los tiempos computacionales obtenidos.

En este tipo de problemas, el tiempo computacional suele representar un factor clave, para determinar como buena opción una solución exacta, esto debido a que, en ocasiones, los tiempos requeridos por los equipos de cómputo son demasiado

elevados lo que resulta en una pérdida de eficiencia de los métodos exactos, respecto a otros métodos de solución.

Los tiempos computacionales obtenidos para cada uno de los depósitos potenciales se presenta a continuación en la **Figura 34**.

FIGURA 34. *Tiempos computacionales de ruteo.*



De acuerdo a la Figura 34 los tiempos computacionales obtenidos fueron muy cortos, y el menor fue el obtenido por el método de carga-distancia (2), a pesar de ello, esta localización potencial fue descartada debido a su alto costo total.

Por otro lado, el método carga-distancia además de no ser la mejor opción en términos de costo total, presenta unos requerimientos de cómputo mucho mayores a los de los otros métodos. Debido a esto tampoco se consideró como una buena opción para servir como centro de acopio.

Las dos mejores opciones de depósitos potenciales, fueron los métodos de AHP y centro de gravedad, obteniendo puntajes muy aproximados en costos totales. Sin embargo, el tiempo computacional de ambos difiere bastante. Por un lado, la localización propuesta por el AHP requiere de tan solo 18 segundos para arrojar la solución óptima, por otro lado, el centro de gravedad propone un depósito para el cual se requieren más de dos minutos para realizar la configuración óptima de las rutas.

Se tiene entonces que la mejor opción de localización para el centro de acopio fue la obtenida mediante el proceso de análisis jerárquico (AHP), debido a que es la más equilibrada en relación de costo total y tiempo computacional requerido.

El método AHP consideró al igual que los métodos de centro de gravedad y carga-distancia, los criterios de distancia a nodos y cargas de residuo a transportar. Además, consideró los factores del tráfico del área y de distancia a puerta de embarque.

De acuerdo a los criterios considerados por el AHP se puede entender como un método más completo, que considera aspecto tanto cuantitativos como cualitativos, razón por la cual se obtienen resultados más coherentes con la realidad.

11 CONCLUSIONES

A través de la revisión bibliográfica realizada, se concluyó que el problema de localización y ruteo de vehículos, está compuesto por dos problemáticas de gran impacto en los costos y nivel de servicio de las empresas, este hecho hace que abordar el problema de manera conjunta traiga mayores beneficios para las organizaciones, ya que, a pesar de ser dos tipos de decisiones diferentes en cuestión de horizonte temporal, tienen una gran relación entre sí.

Se presentó una metodología de solución al problema de localización y ruteo de vehículos, basada en localizar primero y rutear después. Con esta separación del problema en dos fases, no se obtienen las mejores soluciones, sin embargo, se lograron resultados buenos en tiempos computacionales muy cortos.

Se logró plantear una red logística unificada que involucra a la mayoría de los puntos generadores de aceite automotor usado en la ciudad de Buga, con ello se pudieron establecer los parámetros para la recolección de la mayoría de este residuo en la ciudad, a un costo relativamente bajo, lo que representa beneficios ambientales para la ciudad.

El modelo de solución planteado se puede considerar como una opción relativamente económica y sencilla de implementar con grandes capacidades de adaptación a diferentes situaciones reales, como por ejemplo empresas que cuenten con su propia flota de vehículos y deban atender una serie de clientes que demanden una cantidad conocida de productos para finalmente retornar al depósito inicial.

El modelo matemático propuesto, puede ser abordado para investigaciones futuras, para tratar otros tipos de problemas de ruteo de vehículos, como pueden ser los de flota subcontratada, sin retorno al depósito o considerando múltiples depósitos.

12 REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍA

MANUAL TÉCNICO PARA EL MANEJO DE ACEITES LUBRICANTES USADOS DE ORIGEN AUTOMOTOR E INDUSTRIAL. 2da. Ed.: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014

D. Tuzun, y L.I. Burke, "A two-phase tabú search approach to the location routing problem", *European Journal of Operational Research*, vol. 116(1), pp. 87-99, 1999.

R. Linfati, J.W Escobar, y G. Gatica. (2014) "Un algoritmo metaheurístico para el problema de localización y ruteo con flota heterogénea.

R. B. Lopes et al., "A decision-support tool for a capacitated location-routing problem", *Decision Support Systems*, vol. 46(1), pp. 366-375, 2008.

C. Prins et al., "Solving the capacitated location routing problem by a cooperative Lagrangean relaxation-granular tabú search heuristic", *Transportation Science*, vol. 41(4), pp. 470-483, 2007.

C. Prins, C. Prodhon and R. W. Calvo, "A Memetic Algorithm with Population Management (MA|PM) for the Capacitated Location-Routing Problem", *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3906, pp. 183-194, 2006.

C. Duhamel et al., "A memetic approach for the capacitated location routing problem", In *Proceedings of the 9th EU/Meeting on Metaheuristics for Logistics and Vehicle Routing*, Troyes, France. 2008.

V. F. Yu et al., "A simulated annealing heuristic for the capacitated location routing problem", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 58(2), pp. 288-299, 2010.

A. Nadizadehet al., "Using greedy clustering method to solve capacitated location-routing problem", *African Journal of Business Management*, vol. 5(21), pp. 8470-8477, 2011.

Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2006). *Manual técnico para el manejo de aceites lubricantes usados*. Bogotá.

Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2014). *Manual técnico para el manejo de aceites lubricantes usados*. Bogotá.

Molina, S. N (2013) *Avance exploratorio del manejo y disposición final del aceite automotor usado, como residuo peligroso generado en las actividades de cambio de aceite en diferentes establecimientos de la ciudad de Cali*. Cali.

Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2004) *Gestión de aceites usados en Colombia*. Bogotá.

Superintendencia de industria y comercio. (2012) Estudio del sector automotor en Colombia. Bogotá.

Revista motor. (2016). Parque automotor de Colombia es de 12.5 millones de vehículos.

R. H. Ballou, Business Logistics/Supply Chain Management. Prentice Hall, 2004. C. Prins, C. Prodhon, A. Ruiz, P. Soriano, and R. W. Calvo, "Solving the capacitated location-routing problem by a cooperative lagrangean relaxation granular tabu search heuristic," Transportation Science, vol. 41, no. 4, pp. 470–483, 2007.

P. Toth and D. Vigo, "The granular tabu search and its application to the vehicle-routing problem," INFORMS Journal on Computing, vol. 15, no. 4, pp. 333–346, 2003.

D. Ocampo Jaramillo (2017) "Propuesta de un algoritmo heurístico para el problema de ruteo del sistema del sistema de recolección de residuos industriales de la empresa incineradores industriales S.A.S E.S.P"

R. Linfati, J.W Escobar, y G. Gatica. (2015) Problema de Localización y Ruteo con Restricciones de Capacidad: Revisión de la Literatura.

J. Jiménez, J.A. Cardona "Diseño de una red de logística inversa para recolectar aceite vehicular usado en la ciudad de Pereira implementando CVRP"

M. Prieto Montoya (2016) "Diseño de una red de logística inversa para envases Tetra Pak en la ciudad de Manizales"

Arboleda et al (2017) "Propuesta de ruteo de vehículos con flota heterogénea y ventanas de tiempo (hfvrtw) aplicada a una comercializadora pyme de la ciudad de Cali" Fundación Universidad de América, vol. 11 n° 1, pp. 39-55

Olivera (2004) "Heurísticas para problemas de ruteo de vehículos" Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

Toro Campo (2016) "Solución del problema de localización y ruteo usando un modelo matemático flexible y considerando efectos ambientales" Universidad tecnológica de Pereira

Velásquez et al (2013) "Localización de depósitos internos para residuos sólidos hospitalarios utilizando técnicas multicriterio" Escuela de Ingeniería Industrial y la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente de la Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Osorio & Orejuela (2008) "El proceso de análisis jerárquico (ahp) y la toma de decisiones multicriterio. ejemplo de aplicación." Scientia et Technica Año XIV, No 39

Soto de la Vega et al (2013) "Metodología para localización de centros de distribución a través de análisis multicriterio y optimización" Dyna, vol. 81, núm. 184, abril, 2014, pp. 28-35

Paz y Gonzales "Localización de instalaciones" Universidad nacional de Mar del Plata

Urango, O., Pérez, G. y Romo, G. (2015). Aplicación de las técnicas de gravedad y AHP para la localización de un centro de distribución de productos industriales en Colombia. Revista CEA, 1(2), 79-97

Anexo 1. Formulario Inicial para la recolección de información.

Formulario para la recolección de Información del Aceite Automotor usado

Establecimiento:

Encargado:

Dirección:

Teléfono:



Semana No.	Actividad	Vehículo	Marca	Modelo	Cilindraje	Cantidad recolectada (ml)	Tipo de aceite

Anexo 2. Formulario definitivo para la recolección de información del aceite automotor usado.

Formulario para la recolección de Información del Aceite Automotor usado

Establecimiento:

Encargado:

Dirección:

Teléfono:



Semana No.	Actividad	Vehículo	Cilindraje	Cantidad recolectada (ml)

Anexo 3. Cantidades generadas por establecimientos.

Establecimiento: Moto racing
Encargado: Yamil Carmona
Dirección: Cra 8 11-52
Teléfono: 3176674172

	Actividad	Cantidad de aceite (ml)
Semana 1	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	1200
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	1200
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	650
	Cambio de aceite	2500
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	950
	Cambio de aceite	900
Semana 2	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	1000
Semana 3	Cambio de aceite	1200
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	1200
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	650
	Cambio de aceite	650
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	1200
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	1000
Semana 4	Cambio de aceite	700
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	650
	Cambio de aceite	750
	Cambio de aceite	700
	Cambio de aceite	450
	Cambio de aceite	750
	Cambio de aceite	900

Establecimiento: Tecnimotos Fabian
Encargado: Juliana Escandon
Dirección: Cra 8 11-40
Teléfono: 3182611920

	Actividad	Cantidad de aceite (ml)
Semana 1	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	1030
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	724
	Cambio de aceite	430
	Cambio de aceite	810
	Cambio de aceite	833
	Cambio de aceite	840
	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	814
	Cambio de aceite	930
	Cambio de aceite	745
	Cambio de aceite	300
Semana 2	Cambio de aceite	720
	Cambio de aceite	1100
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	856
	Cambio de aceite	507
	Cambio de aceite	650
	Cambio de aceite	810
	Cambio de aceite	614
	Cambio de aceite	750
	Cambio de aceite	427
Semana 3	Cambio de aceite	518
	Cambio de aceite	533
	Cambio de aceite	770
	Cambio de aceite	443
	Cambio de aceite	508
	Cambio de aceite	760
	Cambio de aceite	380
	Cambio de aceite	473
	Cambio de aceite	560
	Cambio de aceite	800
Semana 4	Cambio de aceite	380
	Cambio de aceite	408
	Cambio de aceite	365
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	760
	Cambio de aceite	500

Establecimiento: Lubrimotos Juancho

Encargado: Sergio Arenas

Dirección: Cra 8 11-53

Teléfono: 3235275817

	Actividad	Cantidad de aceite (ml)
Semana 1	Cambio de aceite	2750
	Cambio de aceite	3256
	Cambio de aceite	3017
	Cambio de aceite	3767
	Cambio de aceite	4755
	Cambio de aceite	4080
	Cambio de aceite	3000
Semana 2	Cambio de aceite	3030
	Cambio de aceite	2768
	Cambio de aceite	3500
	Cambio de aceite	3800
	Cambio de aceite	4230
	Cambio de aceite	4080
	Cambio de aceite	2765
	Cambio de aceite	2040
	Cambio de aceite	2770
	Cambio de aceite	4030
Semana 3	Cambio de aceite	3260
	Cambio de aceite	3090
	Cambio de aceite	4670
	Cambio de aceite	3000
	Cambio de aceite	3700
	Cambio de aceite	3156
	Cambio de aceite	2300
Semana 4	Cambio de aceite	3748
	Cambio de aceite	5030
	Cambio de aceite	4340
	Cambio de aceite	4975
	Cambio de aceite	4380
	Cambio de aceite	3083
	Cambio de aceite	3070

Establecimiento: Tecnihonda
Encargado: Cesar Cardenas
Dirección: Cra 8 13-52
Teléfono: 3154037032

	Actividad	Cantidad de aceite (ml)
Semana 1	Cambio de aceite	805
	Cambio de aceite	865
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	816
	Cambio de aceite	854
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	765
	Cambio de aceite	1125
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	855
	Cambio de aceite	658
	Cambio de aceite	1005
	Cambio de aceite	652
	Cambio de aceite	746
Semana 2	Cambio de aceite	1020
	Cambio de aceite	768
	Cambio de aceite	755
	Cambio de aceite	903
	Cambio de aceite	908
	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	890
	Cambio de aceite	876
	Cambio de aceite	904
	Cambio de aceite	1035
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	1070
	Cambio de aceite	678
	Cambio de aceite	450
	Cambio de aceite	578
	Cambio de aceite	640
	Cambio de aceite	678
	Cambio de aceite	553
	Cambio de aceite	1030
Semana 3	Cambio de aceite	756
	Cambio de aceite	1247
	Cambio de aceite	840
Semana 4	Cambio de aceite	840
	Cambio de aceite	1070
	Cambio de aceite	890
	Cambio de aceite	750
	Cambio de aceite	505
	Cambio de aceite	670
	Cambio de aceite	600
	Cambio de aceite	640

Establecimiento: Moto llantas buga
Encargado: Leo Torres
Dirección: carrera 8 15-27
Teléfono: 2275216

Semana 1	Actividad	Cantidad de aceite (ml)
	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	960
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	1050
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	1200
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	1300
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800

Semana 2	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	750
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	1200
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	1200
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	1200
	Cambio de aceite	750
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	1800
	Cambio de aceite	1200
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	750
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800

Semana 3	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	1200
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	946
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	700
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	1200
	Cambio de aceite	1200
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	946
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	1200

Semana 4	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	950
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	1200
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	946
	Cambio de aceite	946
	Cambio de aceite	700
	Cambio de aceite	750
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	1100
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	700
	Cambio de aceite	700
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	650
	Cambio de aceite	946

Establecimiento: Racing forros
Encargado: Jhon Mejia
Dirección: carrera 9 15 17
Teléfono: 3152059136

	Actividad	Cantidad de aceite (ml)
Semana 1	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	946
Semana 2	Cambio de aceite	887
	Cambio de aceite	905
	Cambio de aceite	942
	Cambio de aceite	908
	Cambio de aceite	756
	Cambio de aceite	618
	Cambio de aceite	610
Semana 3	Cambio de aceite	864
	Cambio de aceite	672
	Cambio de aceite	940
	Cambio de aceite	847
	Cambio de aceite	710
	Cambio de aceite	762
	Cambio de aceite	758
	Cambio de aceite	641
	Cambio de aceite	833
	Cambio de aceite	666
Semana 4	Cambio de aceite	606
	Cambio de aceite	738
	Cambio de aceite	699
	Cambio de aceite	814
	Cambio de aceite	814

Establecimiento: Toño Motos
Encargado: Jose Antonio Vergara
Dirección: Cra 9 11-49
Teléfono: 3152100219

	Actividad	Cantidad de aceite (ml)
Semana 1	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	500
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	600
Semana 2	Cambio de aceite	720
	Cambio de aceite	650
	Cambio de aceite	580
	Cambio de aceite	500
	Cambio de aceite	600
	Cambio de aceite	630
	Cambio de aceite	760
	Cambio de aceite	500
Semana 3	Cambio de aceite	510
	Cambio de aceite	685
	Cambio de aceite	562
	Cambio de aceite	680
	Cambio de aceite	710
	Cambio de aceite	680
	Cambio de aceite	597
Semana 4	Cambio de aceite	510
	Cambio de aceite	535
	Cambio de aceite	550
	Cambio de aceite	560
	Cambio de aceite	506
	Cambio de aceite	680
	Cambio de aceite	595
	Cambio de aceite	680

Establecimiento: Jose Motos
Encargado: Jose David Gomez
Dirección: Cra 9 11-55
Teléfono: 3148918434

	Actividad	Cantidad de aceite (ml)
Semana 1	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	900
Semana 2	Cambio de aceite	790
	Cambio de aceite	840
	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	780
	Cambio de aceite	860
Semana 3	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	890
	Cambio de aceite	760
	Cambio de aceite	870
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	670
	Cambio de aceite	750
	Cambio de aceite	700
Semana 4	Cambio de aceite	780
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	830
	Cambio de aceite	790
	Cambio de aceite	690
	Cambio de aceite	800

Establecimiento: Motos Honda
Encargado: Luis Alberto Ulloa
Dirección: Cra 9 15-28
Teléfono: 2279220

	Actividad	Cantidad de aceite (ml)
Semana 1	Cambio de aceite	840
	Cambio de aceite	840
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	840
	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	1000
Semana 2	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	980
	Cambio de aceite	1020
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	1100
	Cambio de aceite	1070
Semana 3	Cambio de aceite	945
	Cambio de aceite	920
	Cambio de aceite	870
	Cambio de aceite	1028
	Cambio de aceite	870
	Cambio de aceite	870
	Cambio de aceite	1090
	Cambio de aceite	92
	Cambio de aceite	1050
Semana 4	Cambio de aceite	960
	Cambio de aceite	830
	Cambio de aceite	600
	Cambio de aceite	790
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	745
	Cambio de aceite	980
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	830
	Cambio de aceite	960
	Cambio de aceite	840

Establecimiento: Checa Motos
Encargado: Andres Giovanny
Dirección: Calle 21 14-07
Teléfono: 3156996672

	Actividad	Cant aceite (ml)
Semana 1	Cambio de aceite	904
	Cambio de aceite	810
	Cambio de aceite	630
	Cambio de aceite	814
	Cambio de aceite	630
	Cambio de aceite	822
	Cambio de aceite	830
	Cambio de aceite	844
	Cambio de aceite	856
	Cambio de aceite	604
	Cambio de aceite	406
	Cambio de aceite	1106
Semana 2	Cambio de aceite	1004
	Cambio de aceite	951
	Cambio de aceite	822
	Cambio de aceite	653
	Cambio de aceite	808
	Cambio de aceite	1005
Semana 3	Cambio de aceite	500
	Cambio de aceite	514
	Cambio de aceite	534
	Cambio de aceite	956
	Cambio de aceite	441
	Cambio de aceite	606
	Cambio de aceite	614
Semana 4	Cambio de aceite	898
	Cambio de aceite	501
	Cambio de aceite	651
	Cambio de aceite	645
	Cambio de aceite	839
	Cambio de aceite	524
	Cambio de aceite	677
	Cambio de aceite	655

Establecimiento: Yamamotor
Encargado: Jhon Jairo Martinez
Dirección: Calle 22A 15B-24
Teléfono: 2353541

	Actividad	Cantidad aceite (ml)
Semana 1	Cambio de aceite	600
	Cambio de aceite	803
	Cambio de aceite	840
	Cambio de aceite	769
	Cambio de aceite	805
	Cambio de aceite	687
	Cambio de aceite	806
	Cambio de aceite	1048
	Cambio de aceite	805
	Cambio de aceite	755
	Cambio de aceite	830
	Cambio de aceite	678
	Cambio de aceite	580
	Cambio de aceite	565
	Cambio de aceite	670
	Cambio de aceite	805
	Cambio de aceite	700
	Cambio de aceite	649
	Cambio de aceite	804
	Cambio de aceite	783
Semana 2	Cambio de aceite	747
	Cambio de aceite	797
	Cambio de aceite	962
	Cambio de aceite	810
	Cambio de aceite	977
	Cambio de aceite	632
	Cambio de aceite	592
	Cambio de aceite	896
	Cambio de aceite	762
	Cambio de aceite	875
Semana 3	Cambio de aceite	995
	Cambio de aceite	648
	Cambio de aceite	908
	Cambio de aceite	834
	Cambio de aceite	866
	Cambio de aceite	950
	Cambio de aceite	919
	Cambio de aceite	749
Semana 4	Cambio de aceite	846
	Cambio de aceite	844
	Cambio de aceite	824
	Cambio de aceite	885
	Cambio de aceite	653
	Cambio de aceite	927
	Cambio de aceite	719
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	882
	Cambio de aceite	926
	Cambio de aceite	637
	Cambio de aceite	743
	Cambio de aceite	632

Establecimiento: Furmotos
Encargado: Orlando Garcia
Dirección: Cra 16 21-14
Teléfono: 3162700877

	Actividad	Cantidad de aceite (ml)
Semana 1	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	650
Semana 2	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	900
Semana 3	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	700
	Cambio de aceite	650
Semana 4	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	1200
	Cambio de aceite	450
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	900
	Cambio de aceite	750
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	800

Establecimiento: Autogas Buga SAS
Encargado: Andrés Angel
Dirección: Salida norte Buga
Teléfono: 3186657542

	Actividad	Cantidad aceite (ml)
Semana 1	Cambio de aceite	3800
	Cambio de aceite	8690
	Cambio de aceite	8400
Semana 2	Cambio de aceite	3784
	Cambio de aceite	946
	Cambio de aceite	8514
	Cambio de aceite	950
	Cambio de aceite	3792
Semana 3	Cambio de aceite	8090
	Cambio de aceite	8532
	Cambio de aceite	8640
	Cambio de aceite	8505
	Cambio de aceite	3784
Semana 4	Cambio de aceite	7890
	Cambio de aceite	7580
	Cambio de aceite	8456
	Cambio de aceite	8700
	Cambio de aceite	7548

Establecimiento: Lubriteca

Encargado:

Dirección: Salida norte Buga

Teléfono:

	Actividad	Cantidad de aceite (ml)
Semana 1	Cambio de aceite	41415
	Cambio de aceite	41415
	Cambio de aceite	37650
	Cambio de aceite	37650
	Cambio de aceite	41415
	Cambio de aceite	33885
	Cambio de aceite	2800
	Cambio de aceite	30120
	Cambio de aceite	33885
Semana 2	Cambio de aceite	37650
	Cambio de aceite	37650
	Cambio de aceite	41415
	Cambio de aceite	33885
	Cambio de aceite	26355
	Cambio de aceite	45180
	Cambio de aceite	41415
Semana 3	Cambio de aceite	41415
	Cambio de aceite	45180
	Cambio de aceite	41415
	Cambio de aceite	37650
	Cambio de aceite	26355
	Cambio de aceite	30120
	Cambio de aceite	41415
	Cambio de aceite	2500
	Cambio de aceite	3000
	Cambio de aceite	41415
Semana 4	Cambio de aceite	45180
	Cambio de aceite	37650
	Cambio de aceite	33885
	Cambio de aceite	30120
	Cambio de aceite	41415
	Cambio de aceite	37650
	Cambio de aceite	45180
	Cambio de aceite	33885

Establecimiento: Serviteca Stambul
Encargado: Manuel
Dirección: Carrera 10a #25
Teléfono: 23701338

	Actividad	Cantidad de aceite (cuartos)	Cantidad de aceite (ml)
Semana 1	Cambio de aceite	6	5676
		4	3784
		4	3784
		3	2838
		6	5676
		4	3784
		4	3784
		4	3784
		5	4730
		5	4730
		5	4730
		4	3784
		4	3784
		4	3784
		8	7568
		4	3784
		5	4730
		5	4730
		5	4730
Semana 2	Cambio de aceite	7	6622
		4	3784
		5	4730
		6	5676
		5	4730
		4	3784
		3	2838
		3	2838
		7	6622
		8	7568
		8	7568
		6	5676
		5	4730
		6	5676
		7	6622
		4	3784

Semana 3	Cambio de aceite	3	2838
		6	5676
		4	3784
		8	7568
		4	3784
		5	4730
		7	6622
		8	7568
		4	3784
		5	4730
		6	5676
		5	4730
		7	6622
		4	3784
		3	2838
		7	6622
		6	5676
		4	3784
		3	2838
		4	3784
		7	6622
Semana 4	Cambio de aceite	5	4730
		5	4730
		6	5676
		6	5676
		5	4730
		6	5676
		8	7568
		3	2838
		5	4730
		3	2838
		7	6622
		4	3784
		6	5676
		4	3784
		6	5676
		8	7568
		6	5676
		6	5676
		7	6622
		3	2838
		5	4730
		4	3784
		8	7568
		108	5676

Establecimiento: Serviteca BRC
Encargado: Blanca Castrillón
Dirección: Carrera 12 # 2S-11
Teléfono: 2372828

	Actividad	Cantidad de aceite (cuartos)	Cantidad de aceite (ml)
Semana 1	Cambio de aceite	5	4730
		5	4730
		4	3784
		7	6622
		4	3784
		4	3784
		4	3784
		4	3784
		4	3784
		9	8514
		4	3784
		4	3784
		5	4730
		4	3784
		5	4730
		4	3784
		8	7568
		4	3784
		4	3784
Semana 2	Cambio de aceite	4	3784
		4	3784
		5	4730
		13	12298
		7	6622
		5	4730
		5	4730
		9	8514
		4	3784
		6	5676
		3	2838
		6	5676
		4	3784
		4	3784
		4	3784
		8	7568
		4	3784
		4	3784
		7	6622

Semana 3	Cambio de aceite	10	9460
		13	12298
		9	8514
		5	4730
		8	7568
		8	7568
		5	4730
		7	6622
		7	6622
		12	11352
		5	4730
		12	11352
		12	11352
		8	7568
		11	10406
		5	4730
		10	9460
		11	10406
		8	7568
		13	12298
		6	5676
		9	8514
		5	4730
		9	8514
		11	10406
Semana 4	Cambio de aceite	4	3784
		4	3784
		10	9460
		4	3784
		9	8514
		13	12298
		6	5676
		7	6622
		8	7568
		8	7568
		5	4730
		12	11352
		9	8514
		10	9460

Establecimiento: Serviautos Guadalajara
Encargado: Mauricio Campo
Dirección: Calle 2 10-02
Teléfono: 3184446141

	Actividad	Cantidad de aceite (ml)
Semana 1	Cambio de aceite	2838
	Cambio de aceite	3319
	Cambio de aceite	3560
	Cambio de aceite	3310
	Cambio de aceite	2838
	Cambio de aceite	4500
	Cambio de aceite	4500
	Cambio de aceite	3560
	Cambio de aceite	3500
	Cambio de aceite	3500
	Cambio de aceite	3500
Semana 2	Cambio de aceite	2956
	Cambio de aceite	3790
	Cambio de aceite	3566
	Cambio de aceite	4431
	Cambio de aceite	4406
	Cambio de aceite	4139
	Cambio de aceite	4346
	Cambio de aceite	3005
	Cambio de aceite	4500
	Cambio de aceite	4365
	Cambio de aceite	4196
	Cambio de aceite	3353
	Cambio de aceite	3910
	Cambio de aceite	3910
Semana 3	Cambio de aceite	3767
	Cambio de aceite	3376
	Cambio de aceite	4120
	Cambio de aceite	3285
	Cambio de aceite	3091
	Cambio de aceite	3736
	Cambio de aceite	3123
	Cambio de aceite	3837
	Cambio de aceite	3724
	Cambio de aceite	3344
	Cambio de aceite	3688
Semana 4	Cambio de aceite	3853
	Cambio de aceite	3865
	Cambio de aceite	4492
	Cambio de aceite	4012
	Cambio de aceite	3854
	Cambio de aceite	3509
	Cambio de aceite	4116
	Cambio de aceite	4221
	Cambio de aceite	4061
	Cambio de aceite	4479
	Cambio de aceite	3811
	Cambio de aceite	3949
	Cambio de aceite	3937
	Cambio de aceite	4495
	Cambio de aceite	4422

Establecimiento: EDS Guadalajara
Encargado: Andrés Hernandez
Dirección: Cra 12 3-61 sur
Teléfono: 2373878

	Actividad	Cantidad de aceite (ml)
Semana 1	Cambio de aceite	3785
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	3785
	Cambio de aceite	2838
	Cambio de aceite	3311
	Cambio de aceite	800
	Cambio de aceite	850
	Cambio de aceite	8514
	Cambio de aceite	3311
	Cambio de aceite	3785
	Cambio de aceite	650
	Cambio de aceite	3311
	Cambio de aceite	4731
	Cambio de aceite	1000
	Cambio de aceite	3311
	Cambio de aceite	3311
	Cambio de aceite	3311
	Cambio de aceite	3784
Semana 2	Cambio de aceite	3604
	Cambio de aceite	3604
	Cambio de aceite	2431
	Cambio de aceite	2665
	Cambio de aceite	3710
	Cambio de aceite	1676
	Cambio de aceite	1164
	Cambio de aceite	1900
	Cambio de aceite	1009
	Cambio de aceite	675
	Cambio de aceite	2245
	Cambio de aceite	2737
	Cambio de aceite	1500
	Cambio de aceite	1970
	Cambio de aceite	1480
	Cambio de aceite	1285

Semana 3	Cambio de aceite	1100
	Cambio de aceite	2470
	Cambio de aceite	1280
	Cambio de aceite	2000
	Cambio de aceite	2034
	Cambio de aceite	3594
	Cambio de aceite	1754
	Cambio de aceite	3462
	Cambio de aceite	675
	Cambio de aceite	1420
	Cambio de aceite	1032
	Cambio de aceite	1912
	Cambio de aceite	1270
	Cambio de aceite	925
	Cambio de aceite	702
	Cambio de aceite	2975
	Cambio de aceite	2872
	Cambio de aceite	3366
	Cambio de aceite	2783
	Cambio de aceite	1066
Semana 4	Cambio de aceite	3154
	Cambio de aceite	3297
	Cambio de aceite	3186
	Cambio de aceite	1982
	Cambio de aceite	3033
	Cambio de aceite	1713
	Cambio de aceite	1837
	Cambio de aceite	3590
	Cambio de aceite	1732
	Cambio de aceite	2219
	Cambio de aceite	2056
	Cambio de aceite	3289
	Cambio de aceite	2194
	Cambio de aceite	3164
	Cambio de aceite	2457
	Cambio de aceite	1625

Anexo 4. Comparación de alternativas.

CRITERIOS ALTERNATIVAS		4		3	
Criterio: Distancia rios					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	L1	L2	L3		
L1	1	2	1/6		
L2	1/2	1	1/7		
L3	6	7	1		
Σ	7	1/2	10	113/42	
Criterio: Cantidad de residuos generados					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	L1	L2	L3		
L1	1	1/5	5		
L2	3	1	7		
L3	1/5	1/7	1		
Σ	4	1/5	13/21	13	
Criterio: Tiempo de énea					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	L1	L2	L3		
L1	1	3	9		
L2	1/3	1	7		
L3	1/9	1/7	1		
Σ	1	4/9	4	1/7	17
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	L1	L2	L3		
L1	1	5	3		
L2	1/5	1	1/3		
L3	1/3	3	1		
Σ	1	8/15	9	4	1/3
Comparación de criterios					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	5	3	7	
Qant. Resid.	1/5	1	1/3	3	
Tief. Áreas	1/3	3	1	5	
Det. Puert.	1/7	1/5	1/3	1	
Σ	1	7/3	9/13	41/2	46
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1/7	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criterio: Distancia a las redes de alcantarillado					
MATRIZ DE COMPARACIÓN					
	Det. Mod.	Qant. Resid.	Tief. Áreas	Det. Puert.	
L1	1	2/7	2/3	5/8	
L2	0/8	2/5	2/7	1/9	
L3	3/4	0/7	0/5	1/4	
Σ					
Criter					

