



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN FASE I

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS DE LA CIUDAD DE LA PAZ
MEDIANTE CVRP**

PRESENTADO POR:

11541190 RICARDO DAVID FLORES CANACA

ASESOR: ING.DANIEL MONTENEGRO

CAMPUS UNITEC; JULIO, 2020

DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS

El resultado de este proyecto está dedicado a Dios, mis padres y todas aquellas personas que estuvieron incondicionalmente para mí. Dios por ser el pilar principal que me ayudara a llegar a este momento tan anhelado; mis padres por ese sacrificio incondicional que a lo largo de muchos años hicieron; mi novia, Andrea Barrientos y mi mejor amigo y colega, Luis Casas por nunca alejarse, ser fuentes de motivación e inspiración y por enseñarme a nunca rendirme jamás.

RESUMEN EJECUTIVO

La siguiente investigación tuvo como objetivo principal estandarizar las rutas de recolección de residuos en la ciudad de La Paz. Primero, se obtuvieron datos sobre lugares y distancias para comprender la manera de cómo se realizaba la programación de las rutas, y así obtener las distancias totales, capacidades utilizadas de los vehículos y cantidad de rutas de cada uno de los recorridos.

Se creó un modelo de optimización basándose en el problema del agente viajero (TSP), y se decidió optar por el CVRP, un tipo de VRP caracterizado por priorizar las capacidades máximas de cada vehículo. Luego de resolver el modelo en OpenSolver, se utilizó la técnica de Vecino Más Cercano porque en un problema de esta magnitud se debe auxiliar de una técnica heurística o metaheurística para obtener respuestas más exactas.

Se crearon dos escenarios para evaluar el impacto de las variables de investigación, cantidad de vehículos y capacidad utilizada, y determinar qué escenario favorecía más. El escenario 1 utilizando un único vehículo de mayor capacidad presentó una distancia total de 33.81 kms, mientras que el escenario 2 utilizando dos vehículos y una nueva distribución presentó un total de 46.6 kms, es decir, que el escenario 1 es favorable porque elimina 12.79 kms del recorrido. Este cambio solo ocurrió para la ruta de lunes y jueves, mientras que los demás días se mantuvieron iguales.

En cuanto al impacto económico, el escenario 1 presentó un costo total de L. 4, 204, 400 y el escenario 2 de L. 1, 175, 900; considerando al escenario 2 como el más factible ya que presenta un ahorro del 72.03% en comparación al escenario 1. También se considera más realista porque utiliza los recursos existentes, mientras que el escenario 1 propone la compra de una unidad vehicular de mayor capacidad que cubra todas las rutas.

ABSTRACT

The following research had as its main objective to standardize the waste collection routes in the city of La Paz. First, data on places and distances were obtained to understand the way in which the route scheduling was carried out, and thus obtain the total distances, used capacities of the vehicles and number of routes for each of the routes.

An optimization model was created based on the traveling agent problem (TSP), and it was decided to opt for CVRP, a type of VRP characterized by prioritizing the maximum capabilities of each vehicle. After solving the model in OpenSolver, the Nearest Neighbor technique was used because in a problem of this magnitude, a heuristic or metaheuristic technique should be used to obtain more exact answers.

Two scenarios were created to assess the impact of the research variables, number of vehicles and capacity used, and determine which scenario favored more. Scenario 1 using a single vehicle of greater capacity presented a total distance of 33.81 km, while scenario 2 using two vehicles and a new distribution presented a total of 46.6 km, that is, scenario 1 is favorable because it eliminates 12.79 km of the route. This change only occurred for the route on Monday and Thursday, while the other days remained the same.

Regarding the economic impact, scenario 1 presented a total cost of L. 4, 204, 400 and scenario 2 of L. 1, 175, 900; considering scenario 2 as the most feasible since it presents a savings of 72.03% compared to scenario 1. It is also considered more realistic because it uses existing resources, while scenario 1 proposes the purchase of a vehicle unit with a greater capacity that covers all routes.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN	2
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
2.1 PRECEDENTES DEL PROBLEMA.....	3
2.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	7
2.3 JUSTIFICACIÓN.....	8
2.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	8
2.5 OBJETIVOS.....	8
2.5.1 OBJETIVO GENERAL.....	8
2.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
III. MARCO TEÓRICO	9
3.1 INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES.....	9
3.2 PROGRAMACIÓN LINEAL.....	10
3.3 MODELO MATEMÁTICO.....	10
3.3.1 VARIABLES DE DECISIÓN.....	11
3.3.2 FUNCIÓN OBJETIVO.....	11
3.3.3 RESTRICCIONES.....	11
3.4 TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN.....	12
3.5 EL PROBLEMA DE LAS RUTAS DE VEHÍCULOS.....	13
3.6 INVESTIGACIONES SIMILARES.....	14
3.6.1 OPTIMIZACIÓN DE RECORRIDOS PARA LA RECOLECCIÓN DE RESIDUOS INFECCIOSOS.....	14
3.6.2 MODELO MATEMÁTICO ESTOCÁSTICO PARA EL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS EN LA RECOLECCIÓN DE PRODUCTOS PERECEDEROS.....	15
3.6.3 OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE RECOLECCIÓN DE DESECHOS SÓLIDOS DE LA CIUDAD DE AMBATO MEDIANTE EL DISEÑO DE UN MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE REDES.....	17
3.7 IMPACTO ECONÓMICO.....	18
3.7.1 FACTORES INFLUYENTES EN EL IMPACTO ECONÓMICO.....	18
IV. METODOLOGÍA	19
4.1 ENFOQUE.....	19
4.2 VARIABLES DE INVESTIGACIÓN.....	19
4.2.1 CAPACIDAD DEL VEHÍCULO.....	19
4.2.2 CANTIDAD DE VEHÍCULOS.....	19
4.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS.....	20

4.3.1 TÉCNICAS.....	20
4.3.2 INSTRUMENTOS	20
4.4 POBLACIÓN Y MUESTRA	20
4.5 METODOLOGÍA DE ESTUDIO	20
4.6 METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN.....	21
4.7 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	21
V. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	22
5.1 MODELAMIENTO MATEMÁTICO Y PROPUESTA DE SOLUCIÓN.....	22
5.1.1 PLANTEAMIENTO MATEMÁTICO	22
5.2 RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	24
5.2.1 LUNES & JUEVES (MODELO ACTUAL & OPTIMIZADO).....	25
5.2.2 MARTES & VIERNES (MODELO ACTUAL & OPTIMIZADO)	30
5.2.3 MIÉRCOLES & SÁBADO (MODELO ACTUAL & OPTIMIZADO).....	34
5.2.4 DOMINGO (MODELO ACTUAL & OPTIMIZADO).....	37
5.2.5 ANÁLISIS & RESULTADOS GENERALES.....	38
5.3 ESCENARIOS	39
5.3.1 ESCENARIO 1 (LUNES & JUEVES)	40
5.3.2 ESCENARIO 1 (MARTES & VIERNES)	42
5.3.3 ESCENARIO 1 (MIÉRCOLES & SÁBADO).....	42
5.3.4 ESCENARIO 2 (LUNES & JUEVES)	43
5.3.5 ESCENARIO 2 (MARTES & VIERNES)	45
5.3.6 ESCENARIO 2 (MIÉRCOLES & SÁBADO).....	46
5.4 IMPACTO ECONÓMICO DE LOS DISTINTOS ESCENARIOS.....	47
5.4.1 MODELO OPTIMIZADO VS ESCENARIO 1	47
5.4.2 MODELO OPTIMIZADO VS ESCENARIO 2	49
VI. CONCLUSIONES	53
VII. RECOMENDACIONES.....	53
VIII. APLICABILIDAD/ IMPLEMENTACIÓN	54
IX. EVOLUCIÓN DE TRABAJO ACTUAL/ TRABAJO FUTURO	54
BIBLIOGRAFÍA	55
ANEXOS	57

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 - Recorrido del vehículo 1.....	26
Ilustración 2 - Recorrido del vehículo 2.....	26
Ilustración 3 - Recorrido del vehículo 1 sin aplicar Vecino Más Cercano (Izquierda) y recorrido final del vehículo 1(Derecha).....	27
Ilustración 4 - Recorrido del vehículo 2 sin aplicar Vecino Más Cercano (Izquierda) y Recorrido final del vehículo 2 (Derecha).....	28
Ilustración 5 - Comparación de distancias entre modelos.....	28
Ilustración 6 - Comparación de capacidades entre modelos.....	29
Ilustración 7 - Recorrido del vehículo 1.....	30
Ilustración 8 - Recorrido del vehículo 2.....	30
Ilustración 9 - Comparación de distancias entre modelos.....	33
Ilustración 10 - Comparación de capacidades entre modelos.....	33
Ilustración 11 - Recorrido del vehículo 1 y 2.....	34
Ilustración 12 - Recorrido final del vehículo 1 y 2.....	35
Ilustración 13 - Comparación de distancias entre modelos.....	36
Ilustración 14 - Comparación de capacidades entre modelos.....	36
Ilustración 15 - Porcentaje de cambio de distancia para cada vehículo.....	38
Ilustración 16 - Porcentaje de cambio de capacidad para cada vehículo.....	39
Ilustración 17 - Primer subrecorrido.....	40
Ilustración 18 - Segundo subrecorrido.....	41
Ilustración 19 - Ruta final, Escenario 1.....	41
Ilustración 20 - Recorrido del vehículo 1 sin aplicar Vecino Más Cercano (Izquierda) y recorrido final del vehículo 1 (Derecha).....	42
Ilustración 21 - Recorrido del vehículo 1 y 2.....	42
Ilustración 22 - Recorrido del vehículo 1 sin aplicar Vecino Más Cercano (Izquierda) y recorrido final del vehículo 1 (Derecha).....	44
Ilustración 23 - Recorrido del vehículo 2 sin aplicar Vecino Más Cercano (Izquierda) y recorrido final del vehículo 2 (Derecha).....	44
Ilustración 27 - Modelo Optimizado vs Escenario 1(Distancia).....	47
Ilustración 28 - Modelo Optimizado vs Escenario 1 (Distancia).....	48
Ilustración 29 - Modelo Optimizado vs Escenario 1 (Distancia).....	48
Ilustración 30 - Modelo Optimizado vs Escenario 2 (Distancia).....	50
Ilustración 31 - Modelo Optimizado vs Escenario 2 (Capacidad Utilizada).....	50
Ilustración 32 - Modelo Optimizado vs Escenario 2 (Distancia).....	51
Ilustración 33 - Modelo Optimizado vs Escenario 2 (Distancia).....	51
Ilustración 34 - Modelo Optimizado vs Escenario 2 (Capacidad Utilizada).....	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Características de las técnicas para problemas de optimización.....	12
Tabla 2 - Principales características de los distintos tipos de VRP.....	13

Tabla 3 - Resultados de optimización.....	16
Tabla 4 - Comparativo de indicadores de desempeño del sistema.....	16
Tabla 5 - Cronograma de actividades.....	21
Tabla 6 - Cronograma de actividades.....	21
Tabla 7 - Descripción de subíndice "i"	22
Tabla 8 - Descripción del subíndice "j".....	22
Tabla 9 - Descripción del subíndice "k".	23
Tabla 10 - Programación de recorridos.	25
Tabla 11 - Ruta de Lunes & Jueves.....	25
Tabla 12 - Modelo de Optimización.....	27
Tabla 13 - Ruta de Martes & Viernes.....	30
Tabla 14 - Modelo de Optimización.....	31
Tabla 15 - Ruta de Miércoles & Sábado.....	34
Tabla 16 - Modelo de Optimización.....	35
Tabla 17 - Ruta de Domingos.....	37
Tabla 18 - Nueva distribución de los vehículos	43
Tabla 19 - Modelo de Optimización.....	43
Tabla 20 - Modelo de Optimización.....	45
Tabla 21 - Modelo de Optimización.....	46
Tabla 22 - Gastos detallados del Escenario 1.	49
Tabla 23 - Gastos detallados del Escenario 2.	52

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 - Pestaña #1 de Google My Maps.....	57
Anexo 2 - Pestaña #2 de Google My Maps.....	57
Anexo 3 - Pestaña #3 de Google My Maps.....	58

LISTA DE SIGLAS Y GLOSARIO

CVRP	Problema de Ruteo Vehicular con Capacidad Limitada
GAMS	General Algebraic Modeling System/ Sistema de Modelado Algebraico General
OEFA	Organización de Evaluación y Fiscalización Ambiental
OCDE	Organización de Cooperación y Desarrollo Económico
OPS	Organización Panamericana de la Salud
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SEDESOL	Secretaria de Desarrollo Social de México
TPS	Traveling Salesman Problem/ Problema del Agente Viajero
VRP	Problema de Ruteo Vehicular

I. INTRODUCCIÓN

La gestión de residuos sólidos es una tarea compleja porque tiene consecuencias sociales, tecnológicas, económicas y ambientales. La recolección de residuos representa un servicio indispensable para la sociedad, pero en algunos casos no se le concede la suficiente importancia y no se cumple con la función principal del servicio. La falta de un previo estudio conlleva a una planificación incorrecta, ya que esta se realiza de manera instintiva sin tomar en cuenta algunos factores del entorno, por lo que el funcionamiento de este "modelo intuitivo" no es el óptimo y representa una oportunidad de amplias mejoras.

La programación lineal es la técnica de resolución más importante de IO, ya que busca la optimización de determinada función objetivo bajo diversas restricciones en cuanto a sus variables. Su objetivo principal es resolver situaciones reales para aumentar la productividad de sus recursos, y así poder obtener el máximo de sus beneficios. Se le considera como un método simple de optimización que sirvió como base para el desarrollo de nuevos métodos y técnicas más complejas para la resolución de problemas de optimización con nuevas características, cuya dificultad es aún mayor.

La investigación tendrá como objetivo optimizar las rutas de recolección de residuos en la ciudad de La Paz. Para esto se necesitará crear un modelo de optimización de rutas para posteriormente compararlo en distintos escenarios y determinar las variables más significativas. Luego, se definirá el impacto económico que cada uno de estos escenarios representa.

En primer lugar, este documento presentará el planteamiento del problema que describirá los precedentes del problema, justificación, preguntas de investigación y los objetivos. Luego, se presentará la revisión de literatura necesaria para complementar el marco teórico de la investigación y que sea respaldo de la metodología a utilizar. Por último, se presentará el análisis de resultados obtenido del estudio para las posteriores conclusiones y recomendaciones.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 PRECEDENTES DEL PROBLEMA

Ventura (2012) considera a la contaminación ambiental como uno de los problemas más críticos del mundo, y con el paso de los años ha ido creciendo. El desarrollo económico y social, que son características de la industrialización, han impulsado el crecimiento rápido de este fenómeno. La contaminación ambiental se genera a partir de diversos tipos de desechos o residuos, como ser: líquidos, sólidos, orgánicos, médicos, entre muchos otros más.

La OCDE afirma:

Se denominan residuos sólidos a "aquellas materias generadas en las actividades de producción y consumo que no han alcanzado un valor económico en el contexto en que son producidos". (p. 1)

Diariamente se desecha basura en grandes cantidades, y en algunas ocasiones no se cuenta con métodos o acciones para un adecuado procesamiento y tratamiento. Debido a la carencia de métodos de procesamiento y tratamiento, esta basura es depositada en lugares no convenientes que dañan el entorno que los rodea.

Ventura (2012) afirma: "La descarga de los residuos domésticos en los "botaderos municipales" y a cielo abierto altera las características físicas y biológicas del suelo y en algunos casos las características químicas al depositar desechos industriales".

Torres (2008) afirma que se deben tomar en cuenta el desarrollo y crecimiento socioeconómico de una población, y la industrialización para crear un plan para el manejo y disposición adecuado de los desechos sólidos. Las políticas correctas y necesarias en cuanto al manejo adecuado de los desechos sólidos tendrán un impacto positivo no solo en el ambiente, sino que también en la salud de la población.

La no existencia de una política unificada para el manejo y disposición de los desechos sólidos ni de los impactos que por la descomposición que genera contaminación en suelos, agua y aire tanto por los lixiviados como por las emisiones atmosféricas esta situación puede y ha ocasionado impactos ambientales a la salud, con costos asociados extremadamente altos. (López, 2007)

El proceso de recolección de los desechos es tan importante como el proceso de tratado que se le debe dar cuando estos son transportados a la estación o establecimiento final. Ventura (2012) afirma que la basura es responsable de muchas enfermedades, y es por eso que debe manejarse con cuidado, depositarse en lugares correspondientes y tratarse de la mejor manera. Un proceso de recolección de residuos adecuado y estandarizado evita la contaminación de suelos, aguas y aire, ya que esta creado para tener un funcionamiento óptimo en cuanto a las características del proceso, como ser los tiempos y distancias de las respectivas rutas.

Moreno & Arriaga (2006) afirma: "La recolección de residuos es, en términos generales, el transportar los residuos sólidos desde su almacenamiento en la fuente generadora hasta el vehículo recolector y luego trasladarlos hasta el sitio de disposición final o a la estación de transferencia".

En diversos países alrededor del mundo se ha mostrado preocupación debido a los altos de contaminación, principalmente en los países que se encuentran en vías de desarrollo que cuentan con poco o ningún tipo de apoyo de parte de sus gobiernos municipales para el tratamiento de residuos sólidos. Debido a que en algunos países tienen una cobertura limitada de este servicio, no se aplica a todas sus regiones y estas deficiencias impactan al medioambiente y la población.

OPS (1991) afirma: "Parece haber un consenso en la comunidad científica relacionado con las crecientes preocupaciones por los problemas ambientales que genera la producción de residuos sólidos urbanos".

Son varios los países en América Latina que han realizado estudios sobre sistemas de recolección y tratamiento de residuos, y los principales factores de la existencia de estas incidencias se resumen a la falta de educación de la comunidad, carencia de interés para mejorar y falta de apoyo en cuanto a este tipo de proyectos. La falta de educación también incluye la poca o nula preparación de los encargados de esta situación, y la carencia de conocimientos hace que no se pueda mejorar en ningún sentido.

En algunos países de América Latina existe la incidencia de esta misma problemática, como Perú, Ecuador y Honduras. Se asemejan en el manejo inadecuado que les dan a los residuos, en la falta de conocimientos para un adecuado tratamiento y en la falta de conciencia ambiental. Por ejemplo, (Liza & Urdiales, 2016) mencionan algunas dificultades en el distrito de Reque, Perú. Arrojar los residuos en espacios abiertos y la quema de los residuos fueron en los que se enfocaron, ya que se consideran extremadamente dañinos para la población y el medioambiente, debido a sus altos niveles de contaminación. Hacen mucho énfasis en la falta de educación, en la falta de apoyo para crear conciencia sobre este tema y en la falta de apoyo por parte del gobierno y de otras entidades.

Quezada & León (2019) afirma:

En lo que concierne a nuestro país (Ecuador), el manejo inadecuado de los residuos sólidos es una de las principales problemáticas que mayor impacto ambiental genera hacia las fuentes naturales, primordialmente en cantones donde no cuentan con un área (relleno sanitario) propia para su disposición final.

En Honduras, esta problemática suele ser un tema de mucha discusión y preocupación para la población hondureña, ya que existen muchos lugares que no cuentan con un servicio de recolección de basura. Esto conlleva a la acumulación de basura, degradación del lugar y población a sus alrededores y a la creación de basureros clandestinos. (OPS, 2019) revela en su informe, Análisis Sectorial de Residuos Sólidos, que apenas 11 de 298 municipios cuentan con maquinaria y equipo para el manejo adecuado de los residuos sólidos.

Torres (2008) afirma: "En Honduras no existe una política unificada para el manejo y disposición de los desechos sólidos, ni de los impactos que por la disposición que genera contaminación en suelos, agua y aire tanto por los lixiviados como por emisiones atmosféricas".

Solamente el 20% de los 298 municipios cuentan con un sistema de recolección, pero este sistema difiere entre ellos y no se aplica de manera uniforme. Esto es debido a la falta de interés para su aplicación, falta de personal especializado y falta de indicadores de eficiencia. El proceso de recolección de residuos juega un papel muy importante en el tema ambiental, ya que si no se realiza de manera correcta puede abrir paso a la contaminación. Si no se cumple con una programación adecuada de recolección, no se respetarán los horarios y las zonas de recolección; lo que influiría en la acumulación de residuos.

Torres (2008) afirma:

El manejo inadecuado de residuos sólidos conlleva a impactos ambientales notorios como son: la contaminación de aguas superficiales por la disposición de residuos en cauces de ríos, contaminación del suelo y los acuíferos; contaminación del aire por la quema incontrolada de desechos y el deterioro del paisaje. Adicionalmente, las consecuencias del deficiente servicio de recolección y disposición de residuos sólidos incluyen la alta incidencia de enfermedades gastrointestinales y respiratorias en la población de la región. (p. 2)

También existe otro factor de contaminación, conocido como desperdicio de combustible. (McLeod & Cherrett, 2008) explican que debido a que los camiones dan vueltas a las colonias a muy baja velocidad e incluso realizan recorridos innecesarios, esto está asociado con la producción de mayores emisiones de gases contaminantes, ruido y congestión del tránsito vehicular.

Un caso de estudio realizado en el municipio de Santa Ana de Yusgüare en Honduras que se enfocaba en determinar la factibilidad de la construcción de un relleno sanitario, determinó que a pesar que el servicio de recolección abarcaba a 260 familias de 400 del casco urbano, contaban con altos niveles de contaminación. Esto quiere decir que aún existe un 45% de las familias que se encuentran expuestas a contraer enfermedades, debido a que no contaban con un único destino para los residuos.

La carencia de políticas, normas y un sistema de gestión para el manejo de desechos sólidos crean barreras que impiden el desarrollo de un país. El no contar con un sistema adecuado para el manejo de desechos implica que no se cuenta con los recursos necesarios para proveer a la población un servicio indispensable, ya que este servicio ayuda a la limpieza y mejora del medioambiente, que tiene un efecto en cadena. Si se cuenta con un entorno limpio, entonces se tendrá un medioambiente y una población sanos; no habrá repercusiones ambientales y el impacto económico será muy bajo.

2.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El encargado del área de recolección de residuos, al ser entrevistado, comentó que en la ciudad de La Paz no se cuenta con un modelo de programación de rutas, que estas habían sido establecidas de manera intuitiva, sin un previo estudio. Estas rutas están divididas por días y sectores, y se cuenta únicamente con el tiempo de duración total de cada jornada laboral diaria. También comentó la existencia de algunos problemas en cuanto al amplio tiempo de ocio existente al finalizar algunos recorridos, pocas unidades de vehículos e incumplimiento de recolección en algunos sectores. Estos problemas suelen darse ya que no existe una programación adecuada, que tome en cuenta todos estos factores para optimizar esta tarea y poder utilizar todos sus recursos de la mejor manera posible.

2.3 JUSTIFICACIÓN

La tarea de recolección de residuos es muy compleja y se necesita de un proceso bien definido y estructurado para realizarlo de la mejor manera. Una estandarización de la programación de rutas de recolección ayudará a reducir y eliminar problemáticas en cuanto al cumplimiento del servicio, ya que el resultado obtenido de esta investigación simulará el comportamiento en el mejor de los escenarios y está enfocado al cumplimiento pleno del servicio de manera óptima tomando en cuenta cada uno de sus recursos y características.

Este proyecto planea utilizar la combinación de herramientas tecnológicas e ingenieriles, y mejorar la manera en que el servicio de recolección de residuos se efectúa en la ciudad de La Paz. Con la ayuda de técnicas que forman parte de la investigación de operaciones se determinará un método en específico que se apegue al comportamiento del entorno de la ciudad para desarrollarlo y obtener una respuesta óptima.

2.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1. ¿Se puede crear un modelo que represente el comportamiento de la situación?
2. ¿Cómo sería el comportamiento del modelo si se efectuarán distintos cambios en las variables?
3. ¿Cuál sería el impacto económico debido a la aplicación de los distintos escenarios?

2.5 OBJETIVOS

2.5.1 OBJETIVO GENERAL

Estandarizar las rutas de recolección de residuos en la ciudad de La Paz mediante la programación lineal entera mixta y el modelo CVRP (problema de ruteo vehicular).

2.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Crear un modelo de optimización de rutas para la recolección de residuos en la ciudad de La Paz.
- Contrastar el modelo en varios escenarios, tomando en cuenta distintas variables.
- Determinar el impacto económico de los distintos escenarios.

III. MARCO TEÓRICO

3.1 INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

La Investigación de operaciones es la aplicación del método científico a problemas de toma de decisiones que proporciona métodos que permiten representar y resolver mediante modelos matemáticos un problema real de un sistema, encontrando y controlando las relaciones entre los componentes de forma que se evalúen los resultados asociados a los objetivos planteados y se establezcan las acciones necesarias para modificar los patrones de comportamiento de dichos componentes. (Liza & Urdiales, 2016, p. 37)

A través de la investigación de operaciones se permite la obtención de soluciones más eficientes de manera metódica en comparación con las que se obtienen mediante la toma de decisiones de manera intuitiva y sin ningún tipo de estudio preliminar (Liza & Urdiales, 2016, p. 37). Los resultados se caracterizan por ser más económicos, en cuanto a aumento de rentabilidad, minimización de costos, maximización de utilización, entre otros.

Hillier & Lieberman (2006) afirman que el objetivo principal de una investigación de operación es encontrar una mejor solución, conocida como *solución óptima*, ya que no es posible la existencia de muchas soluciones que puedan considerarse como la mejor. (p. 4)

Un estudio de investigación de operaciones cuenta con distintas fases o etapas, que lo caracterizan por ser estructurado, y según (Carrillo, 2014) son los siguientes:

- 1- Definición del problema y recolección de datos.
- 2- Formulación de un modelo matemático que describa la situación actual.
- 3- Obtención de soluciones a partir de este modelo.
- 4- Validación del modelo.
- 5- Preparación para aplicar el modelo.
- 6- Implementación del modelo.

3.2 PROGRAMACIÓN LINEAL

En la investigación de operaciones no se tiene una sola técnica general con la que se resuelvan todos los modelos matemáticos que surgen en la práctica. En lugar de ello, la clase y la complejidad del modelo matemático determina la naturaleza del método de solución. (Taha, 2004, p. 4)

Taha (2004) considera que la programación lineal es la técnica más importante de investigación de operaciones, cuyo diseño es para modelos con función objetivo y restricciones estrictamente lineales. La programación lineal utiliza un modelo matemático para describir y transcribir el problema y su finalidad es encontrar una respuesta factible. El calificativo *lineal* refiere a que todas las funciones matemáticas del modelo deben ser *funciones lineales*, es decir, que se encuentren dentro del rango de valores reales. Al referirse a programación, se habla sobre planeación. Por lo tanto, (Hillier & Lieberman, 2010) explican que programación lineal involucra la planeación de actividades para obtener un resultado óptimo.

Taha (2012) afirma: "La programación entera está relacionada con la resolución de problemas de optimización en los cuales al menos algunas de las variables deben tomar sólo valores enteros. Cuando todos los términos son lineales se habla de programación lineal entera".

3.3 MODELO MATEMÁTICO

Los modelos matemáticos funcionan como una representación real de determinado problema a estudiar. Se toman en cuenta todas las características de un problema y se plantean a través de fórmulas matemáticas para hacer una representación de este mismo lo más real posible.

Hillier & Lieberman (2006) afirman que "Los modelos matemáticos también son representaciones idealizadas, pero están expresados en términos de símbolos y expresiones matemáticas." (p. 7)

El modelo de programación lineal, como en cualquier modelo de investigación de operaciones, según Taha (2004) tiene tres componentes básicos:

- 1- Las **variables** de decisión que se trata de determinar.
- 2- El **objetivo** (la meta) que se trata de optimizar.
- 3- Las **restricciones** que se deben satisfacer.

3.3.1 VARIABLES DE DECISIÓN

J.J. Ruz (s.f.) las define como representaciones de los elementos del sistema a modelar que son controlables por el decisor.

Las variables de decisión se consideran enigmas a resolver, ya que son las que estarán variando durante la resolución del modelo y pueden tomar distintos valores. Carrillo (2014) propuso en su investigación un modelo de programación de rutas, en el cual se asignan vehículos y clientes en un centro de distribución de productos veterinarios. Una de las variables de decisión que utilizaron fue la Z_k , que representa si el vehículo K es utilizado; esta variable asume el valor de 1 si determinado vehículo es utilizado, y asume el valor de 0 en el caso contrario. A este tipo de variable se le conoce como variable binaria, que es un tipo de variable que puede tener solamente dos estados, 1 o 0.

3.3.2 FUNCIÓN OBJETIVO

Hillier & Lieberman (2006) afirman que la función objetivo es la medida de desempeño del sistema como una función matemática de las variables de decisión.

La función objetivo, ya puede ser maximizar o minimizar, siempre busca obtener la mejor solución de un determinado problema. Lozano, Cascante & Martínez (2017) en su investigación acerca de optimizar el proceso de recolección de residuos sólidos mediante un modelo de distribución de redes, definieron como su función objetivo la minimización de costos por horario de uso, que está sujeta al tipo y número de camiones empleados en la operación.

3.3.3 RESTRICCIONES

J.J. Ruz (s.f.) explica que las restricciones representan las limitaciones prácticas de algunos recursos y las imposiciones físicas de la realidad.

Las restricciones son todas aquellas limitantes que se imponen a los valores de las variables de decisión para apegarlos a la realidad del problema. Simón, Demaldé, Hernández & Carnero (2012) nos explican que en su investigación acerca de problema de ruteo vehicular para recolección de residuos infecciosos utilizaron restricciones basándose en la conectividad y capacidad, es decir, que tenían restricciones sobre capacidad de rutas, entrada y salida única de cada nodo, capacidad de carga del vehículo y cantidad de vehículos. Estas restricciones dependerán de la naturaleza del problema, pero en su mayoría suelen ser las mismas.

Lozano, Cascante & Martínez (2017) en su investigación hace redundancia a que en el uso de estos modelos es común tener este tipo de restricciones: capacidad del vehículo, tiempo total, tiempo de paradas, relaciones de conectividad entre nodos y el número de depósitos.

3.4 TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN

Existen diferentes técnicas para la resolución de problemas de optimización que pueden aplicarse en diferentes áreas de ingeniería, y (Chirva, Cruz & López-Santana, 2016) afirman que también aplican para el caso específico de enrutamiento en los sistemas de gestión de residuos.

Estas técnicas pueden ser exactos y aproximados, y según (Pacheco & Gallo, 2017) la principal diferencia se centra en la manera de resolución y tiempo de resolución del problema. En la tabla 1 se explican las ventajas y desventajas de estas técnicas.

Tabla 1 - Características de las técnicas para problemas de optimización.

Técnicas	Definición	Otros Métodos
Exactos	- Se caracteriza por encontrar la solución óptima mediante cualquier instancia de cualquier problema en un tiempo acotado. - El tiempo de desarrollo es bastante elevado, suele tardar la resolución del problema.	<ul style="list-style-type: none"> • Branch & Bound • Branch & Cut • Branch & Price • Método Simplex
Aproximados	- Se caracteriza por encontrar una solución en tiempos razonables. - Algunas soluciones no son las óptimas, y se consideran cercanas a estas.	<ul style="list-style-type: none"> • Heurísticas • Metaheurísticas

Fuente: Elaboración propia.

3.5 EL PROBLEMA DE LAS RUTAS DE VEHÍCULOS

Girol & Antón (2000) afirma:

El problema de las rutas de vehículos es un problema NP-Hard dentro de la optimización combinatoria o híbrida. Es decir, se conjetura que no es posible encontrar algoritmos que proporcionen la solución óptima en un tiempo razonable para casos de tamaño mediano o grande. De esta manera, se tiene que tender a utilizar algoritmos que proporcionen aproximaciones de la solución óptima.

Se le llama problema de ruteo de vehículos (VRP) ya que debe atender cierta demanda de productos o servicios por parte de los clientes que se encuentran dispersos en distintas localidades, para los cuales se cuenta con una determinada flota de vehículos que llegan a una o más depósitos finales. La solución de este problema especifica que clientes son servidos por determinado vehículo en un determinado orden; considerando varias restricciones para lograr cumplir con la función objetivo.

Existe una gran variedad de problemas de ruteo vehicular, donde cada uno cuenta con características particulares, y en la tabla 2 se explican la principal diferencia entre ellos.

Tabla 2 - Principales características de los distintos tipos de VRP.

Tipos de VRP	Características
Ventanas de tiempo (VRPTW)	- Minimizar flota, tiempos de espera y costos. -Enfoque en los tiempos de viaje y de espera; ventanas de tiempo hard y soft.
Múltiples bodegas (MDVRP)	Tiene varias bodegas, y cada una tiene asociada una flota de vehículos.
VRP con backhauls	Los clientes pueden recibir o entregar productos a los vehículos.
VRP con entrega dividida (SDVRP)	El mismo cliente puede ser servido por diferentes vehículos, si esto reduce el costo total.
VRP con despacho y recolección (VRPPD)	Los clientes pueden devolver productos. No se permiten intercambios entre clientes.
VRP con demandas estocásticas (VRPSD)	Consta de entrega de productos o servicios a clientes, cuyas demandas son inciertas.
VRP con capacidad limitada (CVRP)	Flota de vehículos con capacidades uniformes para satisfacer la demanda de los clientes mediante varias rutas.

Fuente: Elaboración propia.

En esta investigación se utilizará el CVRP, ya que es el modelo que mejor se apega a las condiciones del entorno a estudiar. El entorno actual tiene las mismas características que el CVRP; cuenta con vehículos con capacidad homogénea, diferentes rutas a cubrir y únicamente un depósito final donde se dirigen todos los residuos al finalizar el proceso.

3.6 INVESTIGACIONES SIMILARES

3.6.1 OPTIMIZACIÓN DE RECORRIDOS PARA LA RECOLECCIÓN DE RESIDUOS INFECCIOSOS

En la ciudad de Río-Cuarto ubicada en Argentina existe la problemática sobre la ineficiencia en la recolección de residuos. Luego de analizar y delimitar el problema, (Simón, Demaldé, Hernández & Carnero, 2012) consideran que se trata de un problema de ruteo de vehículos periódico (PRVP) porque se necesita encontrar un conjunto óptimo de rutas diarias para un periodo de tiempo dado, lo que lo vuelve periódico.

Al resolver un PRVP, se está dando respuesta a dos problemas implícitos: 1) problema de planeamiento y 2) problema de ruteo de vehículos. Debido a esto, este tipo de problemas se dividen en dos etapas. Optaron por el método heurístico de búsqueda local utilizando el algoritmo de búsqueda exacta, y modelando el problema con el software comercial GAMS. (Pisinger & Ropke, 2007) explican que, al aplicar la búsqueda local tanto a PRVP como a otras variantes de PRV, se pueden utilizar algunos algoritmos simples para solucionarlo. Cada uno de estos algoritmos simples se va probando, hasta que la nueva solución satisfaga todos los criterios previamente establecidos. Debido a esto, modelaron el problema como un TPS y así poder evaluar las posibles mejoras mediante un algoritmo simple.

La combinación entre métodos complejos y simples hacen que la dificultad del estudio se vuelva interesante, ya que comienza la búsqueda de los métodos más adecuados que se apeguen al determinado modelo y poder obtener una solución óptima. Este estudio en Argentina tiene una variable cuyo comportamiento es sumamente difícil de predecir, y además juega un papel muy importante porque quieren establecer un modelo que funcione mediante distintos períodos de tiempo.

3.6.2 MODELO MATEMÁTICO ESTOCÁSTICO PARA EL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS EN LA RECOLECCIÓN DE PRODUCTOS PERECEDEROS

En Colombia se realizó un estudio acerca del problema de ruteo de vehículos con componentes estocásticos en demanda, tiempos de entrega y servicio para productos perecederos. Se enfocaron en las flores, ya que el sector floricultor está teniendo un amplio desarrollo. Debido a esta oportunidad de mejora es que se decide crear un modelo que represente el comportamiento del suministro de flores, considerando un modelo estocástico ya que la demanda del producto es incierta, y no es siempre la misma debido a la naturaleza de este mismo.

Gonzalez-L, Adarme-Jaimes & Orjuela-Castro (2014) afirma: "En el ruteo de productos perecederos se encuentran trabajos que modelan un VRP considerando las condiciones de temperatura o daño a los productos debido a las operaciones de distribución y transporte. (p. 200)

Crearon un modelo matemático que consta de tres métodos de solución: programación estocástica restringida, programación estocástica de doble etapa con funciones de recursos y optimización robusta. Estos tres métodos se utilizaron para clusterizar puntos de recolección por cercanía geográfica, asignar vehículos a rutas y generar rutas pre-diseñadas respectivamente.

Al momento de resolverlo se dividió en cinco etapas; siendo la primera la clusterización de nodos, que tiene como objetivo elegir los nodos con menor distancia utilizando la técnica clúster conocida como Método Linkage Simple Aglomerativo. La segunda etapa trata sobre el diseño de las rutas que comenzó siendo un VRP, pero debido a su complejidad se subdividió en cinco sub problemas y resolvieron cada uno como un TSP. La tercera etapa refiere a la asignación de rutas, y para esto se hizo uso de Open Solver en Excel. En la cuarta etapa se realizó una simulación de tres escenarios para determinar si el comportamiento del modelo era el adecuado según lo que se había planteado, y la última etapa trata sobre un modelo de regresión para verificar la existencia de correlación entre las variables de investigación.

Con este modelo de regresión se obtuvieron dos tablas de datos, donde la tabla 3 se refiere a los resultados para encontrar una solución óptima, mientras que la tabla 4 presenta una comparación entre la situación actual y la propuesta.

Tabla 3 - Resultados de optimización.

Costo Diario \$	Distancia	Tiempo total	Cantidad restante	Cantidad acumulada	Punto de reabastecimiento
120.590	40	9,749	6666	25185	0,76

Fuente: (Gonzalez-L, Adarme-Jaimes & Orjuela-Castro, 2014)

Tabla 4 - Comparativo de indicadores de desempeño del sistema.

Variable	Actual		Propuesta		Indicadores		Unidades	%	Efecto
	Media	Desv. Estand.	Media	Desv. Estándar	Actual	Propuesta			
Distancia (Km)	113,00	21,88	62,08	21,49	77	290	Tallos/Km	73	Incremento
Tiempo por punto de recolección (Horas)	1,07	1,42	1,71	0,15	18.638	14.482	\$/hora de operación	-29	Disminución
Cantidad Recogida (Tallos)	8.732	12.863	17.999	4.286	1.364	1.754	Tallos /hora	22	Incremento
Costo Diario de operación (Pesos colombianos)	119.321	21.448	148.586	24.273	13,66	8,26	\$/Tallo	-6	Disminución

Fuente: (Gonzalez-L, Adarme-Jaimes & Orjuela-Castro, 2014)

En conclusión, el modelo propuesto se considera factible debido a que establece que el punto óptimo de reabastecimiento es del 76% de la capacidad de carga total de los camiones. Este valor garantiza lograr un costo mínimo y también garantiza el cumplimiento de las restricciones del problema.

La naturaleza de este problema le agrega un poco más de complejidad al estudio, debido a que las flores son productos estacionales y su demanda es irregular. Esta característica hace que las variables dependan de un comportamiento estocástico, puesto que existen altos niveles de variabilidad y alta correlación entre estos parámetros. Debido a esta complejidad, no permite el planteamiento de soluciones mediante métodos simples y es necesaria la subdivisión en etapas para reducir su nivel de complejidad y resolver cada etapa con métodos simples.

3.6.3 OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE RECOLECCIÓN DE DESECHOS SÓLIDOS DE LA CIUDAD DE AMBATO MEDIANTE EL DISEÑO DE UN MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE REDES

En la ciudad de Ambato en Ecuador se realizó un estudio de optimización mediante el diseño de un modelo de redes con el fin de minimizar costos y realizar una adecuada distribución de las rutas. Para el diseño de la red se tomaron en cuenta las siguientes variables: distancias recorridas, toneladas producidas, número de camiones disponibles, capacidad de carga y costos de operación. Se implementó un modelo de macroruteo que permite optimizar costos mediante la asignación de vehículos a diversos sectores de la ciudad.

Actualmente las operaciones logísticas se rigen bajo un modelo empírico de distribución, y (Lozano, Cascante & Martínez, 2017) explican que por no tomar en cuenta algunas variables como la cantidad de desechos producidos y la capacidad de carga de los vehículos, el proceso se vuelve ineficiente y no suele cumplir con la amplitud del servicio.

Para obtener datos acerca de las distancias recorridas por parte de los vehículos se utilizó la herramienta web Google Maps, y posteriormente se aplica un modelo simple de transporte que genera la cantidad óptima de viajes a realizar en cada zona.

El modelo de macroruteo utilizado en esta investigación se basa en la programación lineal, estableciendo una solución óptima mediante el método simplex. Se plantea esta solución a través de una programación básica con el programa LINDO.

A pesar de que se utilice un método simple para la resolución de problemas, aún existe cierta complejidad para su resolución. Siempre se deben tomar en cuenta las variables de investigación, para dejar de realizar el proceso de forma intuitiva y comenzar a hacerlo de manera estructurada y bajo un modelo que se apegue a las características del entorno. El uso de la herramienta web Google Maps facilita la tarea de obtención de datos acerca de tiempos y distancias de las distintas rutas a realizar, y también proveen la opción de poder sectorizar las rutas debido a que provee un mapa de todos los recorridos que se hicieron.

3.7 IMPACTO ECONÓMICO

3.7.1 FACTORES INFLUYENTES EN EL IMPACTO ECONÓMICO

SEDESOL (2001) afirma:

Por la parte económica, la gestión integral de los RSU constituye un servicio público que necesita recursos económicos para cubrir la adquisición de vehículos especializados, la operación de la flota (combustibles y mantenimiento), así como los salarios del personal involucrado, buscando el mínimo costo. (p. 324)

Contar con un sistema de gestión sobre el servicio público de recolección de residuos es complejo, ya que debe tomar en cuenta que se necesita amplios recursos económicos para mantenerse a flote y funcionar sin ningún tipo de problema. Estos recursos representan gastos, y se tiene como objetivo principal minimizarlos y al mismo tiempo mantener este servicio con altos niveles de calidad y cumplimiento. Esto suele ser difícil porque se debe proveer un servicio con la mejor calidad posible sin descuidar que los costos aumenten, y esta combinación no siempre se suele dar.

La comunidad internacional muestra preocupación por los altos índices de contaminación, principalmente en los países en vías de desarrollo, donde (Ventura, 2012) enfatiza que poco hacen por eliminar las causas que originan la contaminación ambiental. Hace énfasis en que los gobiernos no le dan la suficiente importancia y esto tiene repercusiones en el bienestar de su población.

Una población cuya salud está rodeada de pésimas condiciones conduce a un impacto económico muy elevado, ya que la cantidad de personas enfermas crece muy rápido y esto demanda al gobierno múltiples tratamientos médicos, gastos en medicamentos y recursos médicos. Y mientras la ignorancia por parte del gobierno sea grande, mayor va a ser el impacto económico en estos y sus pérdidas serán incontables.

IV. METODOLOGÍA

4.1 ENFOQUE

El proyecto de investigación tiene un enfoque cuantitativo, debido a la naturaleza de sus actividades. Se estima cuantitativa, ya que se recolectan datos primarios de tiempos y distancias para crear el modelo matemático con la ayuda del software Microsoft Excel y Open Solver como herramienta. También se considera una investigación con un diseño experimental porque se manipulan ciertas variables para observar el comportamiento del modelo matemático, y posteriormente determinar una respuesta óptima al problema.

Asimismo, es importante mencionar que la estrategia de investigación utilizada es la del estudio de caso. Esto es debido a que el proyecto cuenta con condiciones únicas y que no se pueden dar en otras investigaciones. Gloria Serrano (1994) afirma que un estudio de caso se distingue por las siguientes características: particularista, descriptivo, heurístico e inductivo. Esta investigación cumple con todas ellas, ya que abarca una situación en específico (particularista), se proporcionará una descripción cualitativa de esta condición en particular (descriptiva), se encontrarán respuestas a esta problemática a través de modelos de optimización (heurístico) y se construirán hipótesis que serán comprobadas mediante la respuesta óptima que se obtenga.

4.2 VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

4.2.1 CAPACIDAD DEL VEHÍCULO

La capacidad límite del vehículo para contener determinada cantidad de residuos, que es estimada desde la fabricación de este mismo.

4.2.2 CANTIDAD DE VEHÍCULOS

El número de vehículos disponibles utilizados para completar las rutas.

4.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS

4.3.1 TÉCNICAS

- Modelo CVRP (Problema de Ruteo Vehicular con Capacidad Limitada): modelo de optimización que cuenta con una flota de vehículos con capacidades uniformes para satisfacer la demanda de un grupo de clientes a través de un conjunto de rutas que empiezan y terminan en un almacén común.

4.3.2 INSTRUMENTOS

- Microsoft Excel: software para registrar datos recolectados y para el análisis de los resultados.
- OpenSolver: extensión de Excel que permite resolver modelos de optimización.
- Google Maps: aplicación que provee la ubicación exacta de ciudades y distintas ubicaciones.

4.4 POBLACIÓN Y MUESTRA

Esta investigación cuenta con un problema donde no se puede segmentar mediante una muestra debido a que, si esto se realiza, el modelo no contará con toda la información necesaria para funcionar bajo las características que lo hagan lo más real posible. Si se toma una muestra, el problema se restringe ya que no tomaría en cuenta todos los lugares que visitan, haciendo que el estudio pierda sus características realistas.

4.5 METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Se entrevistó al encargado del área y se solicitó información sobre tiempos y distancias acerca de todas las rutas para la recolección de residuos. Primero, se construyó el modelo de la situación actual, y luego se definió el modelo de optimización de programación lineal mixta a utilizar, y se decidió por el Modelo CVRP. Se establecieron las variables de mayor impacto y se crea una plantilla utilizando Microsoft Excel y OpenSolver; donde se introducen todas las variables y restricciones para crear el modelo y obtener una respuesta óptima. Al haber obtenido una respuesta óptima del modelo se procede a realizar cambios en las variables de capacidad del vehículo y cantidad de vehículos para determinar la incidencia y

conocer el impacto que tiene cada una en el modelo. Estos cambios en las variables representarán los diferentes escenarios, y posteriormente se crearán gráficos para comparar con más detalles cada escenario.

Por último, se establecieron los costos de los recursos necesarios para llevar a cabo este modelo optimizado, como ser: combustible, salarios de empleados, mantenimiento de vehículos, entre otros. Se estimaron costos a cada escenario para evaluar el impacto económico que tendría cada cambio realizado en el modelo, y así contar con una base monetaria que ayude a tomar una mejor decisión.

4.6 METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN

La validación del modelo se realizará mediante una comparación de resultados entre ambos modelos, el actual y el optimizado. Se comparará la situación actual y la situación optimizada para conocer la diferencia existente en sus modelos matemáticos, sus variables y sus restricciones. De esta manera se comprobará la existencia significativa de algún cambio en el comportamiento del modelo, y así determinar la factibilidad del nuevo modelo.

4.7 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Tabla 5 - Cronograma de actividades.

N°	Actividades	Semana 1					Semana 2					Semana 3					Semana 4					Semana 5						
		L	M	M	J	V	L	M	M	J	V	L	M	M	J	V	L	M	M	J	V	L	M	M	J	V		
1	Revisión de literatura	■	■	■	■	■																						
2	Revisión de literatura						■	■	■	■	■																	
3	Revisión de literatura											■	■	■	■	■												
4	Entrega de Avance #1															■												
5	Realizar cambios del Avance #1															■	■											
6	Obtención de datos (tiempos, distancias)																■	■										
7	Construir modelo matemático actual																■	■	■	■	■							
8	Optimizar el modelo																	■	■	■	■	■						

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6 - Cronograma de actividades.

N°	Actividades	Semana 6					Semana 7					Semana 8					Semana 9					Semana 10				
		L	M	M	J	V	L	M	M	J	V	L	M	M	J	V	L	M	M	J	V	L	M	M	J	V
9	Optimizar el modelo	■	■	■	■	■																				
10	Trabajar en los escenarios						■	■																		
11	Comparar escenarios y crear gráficos							■	■	■	■															
12	Realizar conclusiones y recomendaciones											■	■													
13	Entrega de Avance #2															■										
14	Realizar cambios del Avance #2											■	■	■	■	■	■	■	■	■	■					
15	Entrega de Avance #3																	■								
16	Realizar cambios del Avance #3																	■	■	■	■					
17	Elaborar paper																				■					
18	Entrega final																					■				

Fuente: Elaboración propia.

V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 MODELAMIENTO MATEMÁTICO Y PROPUESTA DE SOLUCIÓN

5.1.1 PLANTEAMIENTO MATEMÁTICO

El planteamiento matemático del problema de PLEM se muestra a continuación:

Nomenclatura:

Dónde "i", "j" y "k" significan:

i: Primer nodo visitado en el recorrido. ($i = 0, \dots, 13$)

Tabla 7 - Descripción de subíndice "i"

Lugar			Lugar	
0			0	
1	Barrio San José	10	1	Barrio San José (Verdun)
2	Calle de tierra de Techa	11	2	Col. Vista Hermosa
3	Calle hacia Lejamaní	12	3	Col. Los Maestros
4	Col. Los Angeles	13	4	Yarumela
5	Hacienda EL Tesón		5	Basurero
1	Barrio San José		0-1-2-3-4-5	
6	Barrio Sagrado Corazón			
7	Barrio La Trinidad			
8	Col. Matilde Córdova de Suazo			
9	Barrio La Merced			
10	Basurero			
0-1-2-3-4-5-1-6-7-8-9-10				

Fuente: Elaboración Propia

j: Siguiendo nodo visitado en el recorrido. ($j = 0, \dots, 13$)

Tabla 8 - Descripción del subíndice "j".

Lugar			Lugar	
0			0	
1	Barrio San José	10	1	Barrio San José (Verdun)
2	Calle de tierra de Techa	11	2	Col. Vista Hermosa
3	Calle hacia Lejamaní	12	3	Col. Los Maestros
4	Col. Los Angeles	13	4	Yarumela
5	Hacienda EL Tesón		5	Basurero
1	Barrio San José		0-1-2-3-4-5	
6	Barrio Sagrado Corazón			
7	Barrio La Trinidad			
8	Col. Matilde Córdova de Suazo			
9	Barrio La Merced			
10	Basurero			
0-1-2-3-4-5-1-6-7-8-9-10				

Fuente: Elaboración Propia

k : Número de vehículo ($k = 1, 2$.)

Tabla 9 - Descripción del subíndice "k".

k	Descripción
1	Vehículo 1
2	Vehículo 2

Fuente: Elaboración Propia

Parámetros:

D_{ijk} : Matriz de distancias en kilómetros del nodo " i " al " j " recorridos por el vehículo k .

D_i : Demanda en cada nodo " i ".

P_k : Capacidad máxima del vehículo k .

Variables de decisión:

El CVRP tiene como objetivo encontrar una matriz $X = (X_{ijk})$, de tamaño $N \times N \times M$, donde las variables binarias X_{ijk} indican si el arco (i, j) fue visitado por el vehículo k .

Función Objetivo:

La función objetivo debe minimizar los kilómetros recorridos en las rutas escogidas.

$$\text{Min } (Z) = \sum_{i=0}^{13} \sum_{j=0}^{13} \sum_{k=1}^2 D_{ijk} X_{ijk}$$

Restricciones:

1. Esta restricción determina el punto de inicio.

$$\sum_{i=1}^{13} \sum_{j=1}^{13} \sum_{k=1}^2 X_{ijk} = 14 \quad (1)$$

2. Esta restricción obliga a que el modelo inicie desde el nodo 0.

$$\sum_{i=0}^{13} \sum_{j=0}^{13} X_{ijk} = 1 \quad \forall k = 1, 2. \quad (2)$$

3. Restricción para que el vehículo "k" visite la cantidad requerida de nodos.

$$\sum_{j=1}^{13} X_{ijk} \leq 1 \forall k = 1, 2. \forall i = 1, \dots, 13. \quad (3)$$

4. Restricción que hace que el vehículo termine en el punto de inicio, que en este caso es el nodo 0 que representa el depósito de donde salen.

$$X_{ijk} - X_{jik} \leq 1 \forall i, j = 1, \dots, 13 \forall k = 1, 2. \quad (4)$$

5. Restricción para que cualquiera de los "k" vehículos visite uno de los nodos "j".

$$\sum_{i=1}^{13} X_{ijk} - \sum_{j=1}^{13} X_{ijk} = 0 \forall k = 1, 2. \quad (5)$$

6. Restricción para que un vehículo visite un nodo "j".

$$\sum_{i=1}^{13} \sum_{k=1}^2 X_{ijk} = 1 \forall j = 1, \dots, 13. \quad (6)$$

7. Restricción para que no exista repetición entre 2 nodos.

$$\sum_{i=1}^{13} X_{ijk} \leq 1 \forall k = 1, 2. \forall j = 1, \dots, 13. \quad (7)$$

8. Restricción de capacidad en términos de peso.

$$\sum_{i=0}^{13} \sum_{k=0}^{13} D_i X_{ijk} \leq P_k \forall k = 1, 2. \quad (8)$$

5.2 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Luego de crear el modelo matemático y obtener respuestas aproximadas mediante OpenSolver, se utilizó la técnica del Vecino Más Cercano para obtener una respuesta más exacta. Los recorridos están programados en la siguiente manera, como se muestra en la tabla 10:

Tabla 10 - Programación de recorridos.

Día	Vehículo
Lunes & Jueves	Vehículo 1 & Vehículo 2
Martes & Viernes	Vehículo 1 & Vehículo 2
Miércoles & Sábado	Miércoles: Vehículo 1 Sábado: Vehículo 2
Domingo	Vehículo 1

Fuente: Elaboración Propia

Para obtener las distancias de los nodos se utilizó la aplicación Google My Maps, que provee una imagen satelital de cierta ubicación para crear y guardar rutas, y determinar la distancia entre dos o más puntos. En la sección de Anexos se muestran las ilustraciones de todas las rutas que forman parte de este proyecto.

Cabe mencionar que los vehículos cuentan con capacidades diferentes; el vehículo 1 con capacidad máxima de 12 toneladas y el vehículo 2 con capacidad máxima de 8 toneladas.

5.2.1 LUNES & JUEVES (MODELO ACTUAL & OPTIMIZADO)
(Modelo Actual)

En la tabla 11 se muestra el recorrido y las rutas del modelo actual para los días lunes y jueves.

Tabla 11 - Ruta de Lunes & Jueves.

Lunes & Jueves				
Camión 1			Camión 2	
	Lugar			Lugar
0			0	
1	Barrio San José	10	1	Barrio San José (Verdun)
2	Calle de tierra de Techa	11	2	Col. Vista Hermosa
3	Calle hacia Lejamaní	12	3	Col. Los Maestros
4	Col. Los Angeles	13	4	Yarumela
5	Hacienda EL Tesón		5	Basurero
1	Barrio San José		0-1-2-3-4-5	
6	Barrio Sagrado Corazón			
7	Barrio La Trinidad			
8	Col. Matilde Córdova de Suazo			
9	Barrio La Merced			
10	Basurero			
0-1-2-3-4-5-1-6-7-8-9-10				

Fuente: Elaboración Propia



Ilustración 1 - Recorrido del vehículo 1.

Fuente: Elaboración Propia

Se muestra un orden de rutas de manera individual para cada vehículo y de manera general para todo el recorrido. Las flechas en las ilustraciones indican el orden que sigue toda la ruta. Para el vehículo 1 la ruta es: 0-1-2-3-4-5-1-6-7-8-9, como se muestra en la ilustración 1, y para el vehículo 2: es 0-10-11-12-13, como se muestra en la ilustración 2.

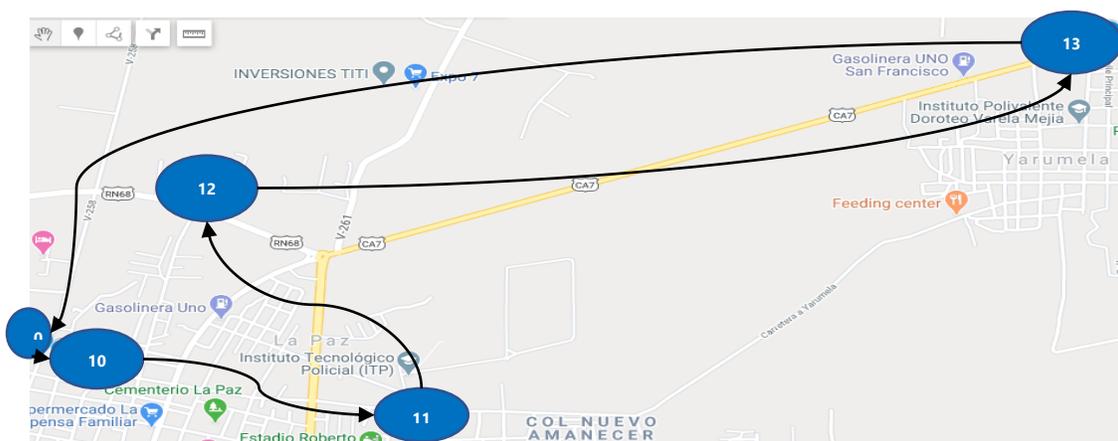


Ilustración 2 - Recorrido del vehículo 2.

Fuente: Elaboración Propia

Al resolver sin aplicar aún el Vecino Más Cercano, obtenemos la siguiente ruta para el vehículo 2: 0-3-6-8-9-10-12-13. Luego de aplicarlo se mantiene la misma distribución de rutas de la ilustración 4 con la única diferencia que cambia el orden de los nodos. La ruta final para el vehículo 2 la ruta final es la siguiente: 0-10-6-9-12-8-13-3.

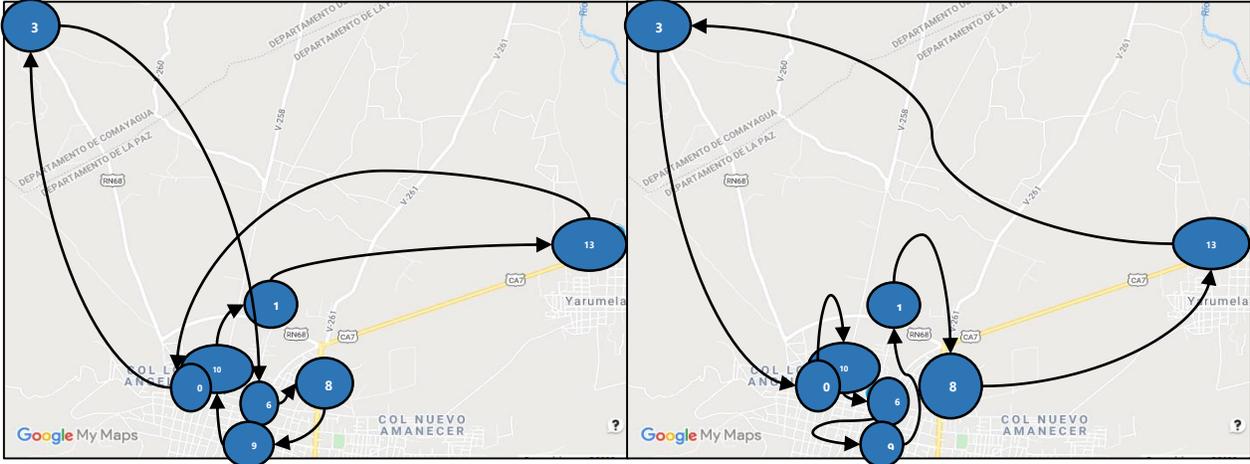


Ilustración 4 - Recorrido del vehículo 2 sin aplicar Vecino Más Cercano (Izquierda) y Recorrido final del vehículo 2 (Derecha).

Fuente: Elaboración Propia

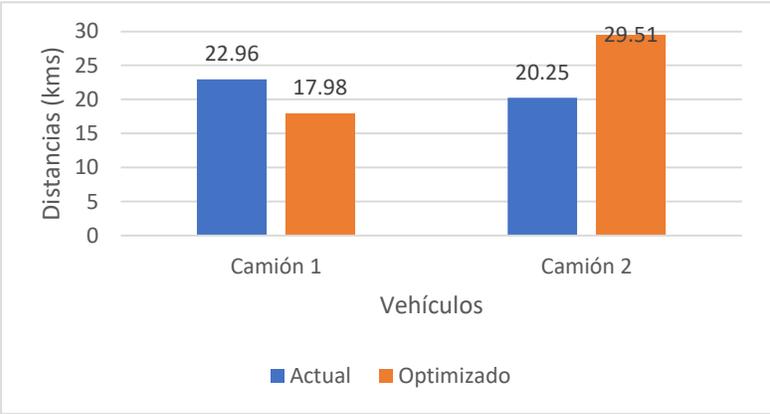


Ilustración 5 - Comparación de distancias entre modelos.

Fuente: Elaboración Propia

En la ilustración 5 se comparan las distancias recorridas de ambos vehículos entre el modelo actual y el optimizado. En el modelo actual, el vehículo 1 visita 11 nodos con una distancia total de 22.96 kms, mientras que el vehículo 2 visita 4 nodos y la distancia es de 20.25 kms. Luego de aplicar el Vecino Más Cercano, se obtuvo que la nueva ruta para el vehículo 1 consta de 6 nodos con una distancia total de 17.98 kms; eliminando 4.98 kms y esto representando una mejora de un 27.70%.

La nueva ruta para el vehículo 2 consta de 7 nodos con una distancia total de 29.51 kms. Se añadieron 9.26 kms, representando un cambio de un 31.38%. Este cambio se debe a que las rutas se asignan de una mejor manera, ya que en el modelo actual solamente el vehículo 1 abarcaba la mayoría de nodos, mientras que en el modelo optimizado se distribuyen de una mejor manera y se agregan más rutas para el vehículo 2.

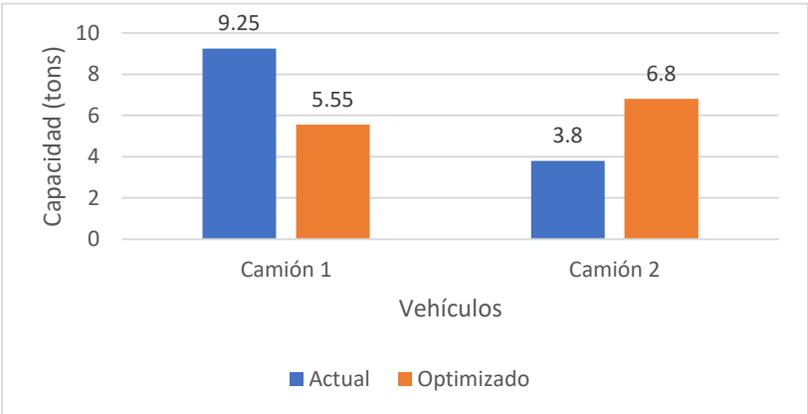


Ilustración 6 - Comparación de capacidades entre modelos.

Fuente: Elaboración Propia

En cuanto a la capacidad, se obtuvieron mejoras para el vehículo 1, mientras que el vehículo 2 sufrió algunos cambios. El modelo actual para el vehículo 1 cuenta con 9.25 tons, mientras que con el modelo optimizado se redujeron a 5.55 tons; significando una mejora de un 66.67% con la eliminación de 3.70 tons. El vehículo 2 contaba con 3.8 tons y se incrementaron a 6.8 tons, representando un cambio de un 44.12% con el aumento de 3 tons. La ilustración 6 ayuda a explicar que la carga de los vehículos se logró balancear de manera en que se distribuyeron de mejor manera los nodos en los vehículos que los visitarán aprovechando la capacidad del vehículo al máximo.

5.2.2 MARTES & VIERNES (MODELO ACTUAL & OPTIMIZADO)

(Modelo Actual)

En la tabla 13 se muestra el recorrido y las rutas establecidas del modelo actual para los días martes y viernes.

Tabla 13 - Ruta de Martes & Viernes.

Martes & Viernes			
Camión 1		Camión 2	
	Lugar		Lugar
0		0	
1	Barrio San Antonio	4	1 Barrio La Concepción
2	Mercado	5	2 Barrio San Juan
3	La Granja	6	3 Col. Julián Suazo
4	Basurero	4	Basurero
0-1-2-3-4		0-1-2-3-4	

Fuente: Elaboración Propia

La ruta del vehículo 1 es: 0-1-2-3 mostrado en la ilustración 7, y la del vehículo 2 es: 0-4-5-6 mostrado en la ilustración 8.

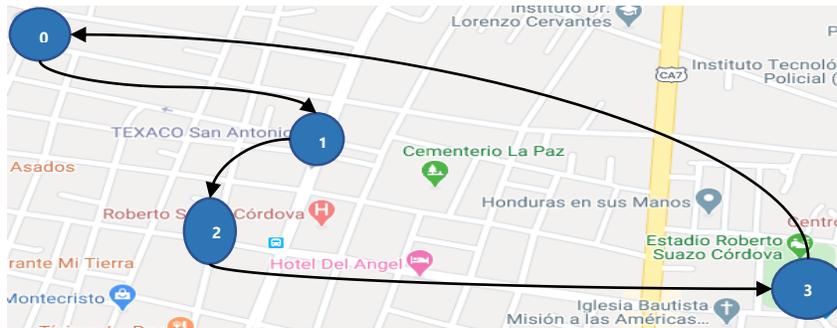


Ilustración 7 - Recorrido del vehículo 1.

Fuente: Elaboración Propia

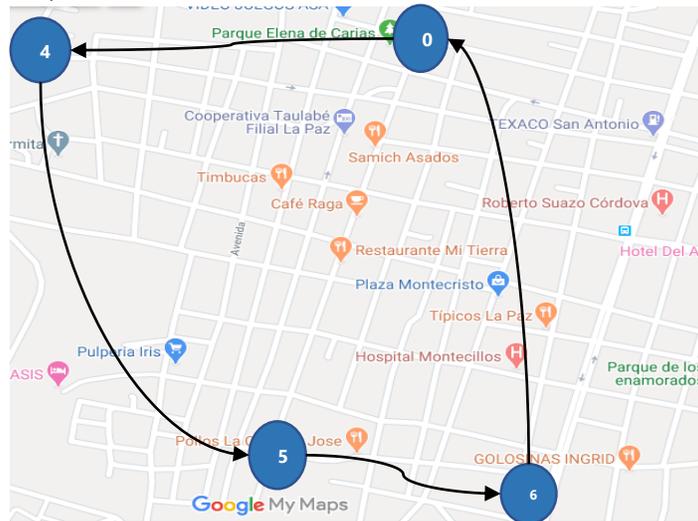


Ilustración 8 - Recorrido del vehículo 2.

(Modelo Optimizado)

Luego de haber simulado el comportamiento aproximado del modelo optimo, se obtuvieron las siguientes respuestas, como se muestra en la tabla 14.

Tabla 14 - Modelo de Optimización.

		Martes & Viernes								
		0	1	2	3	4	5	6	(<=1)	(<=0)
Camión 1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0
	2	0	1	0	0	0	0	0	1	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	1	1	0
	6	0	0	0	0	0	0	1	1	0
Camión 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	1	0	0	0	1	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	1	0	0	0	0	1	0
camión 1	(<=1)	0	1	0	0	1	1	1		
camión 2	(<=1)	0	0	1	1	0	0	0		
	(<=1)		1	1	1	1	1	1	4	(<=6)
	4								2	(<=6)
	2									
	5.97					DC1	7.83		7	(<=7)
						DC2	5.03			

Fuente: Elaboración Propia

Al resolver, sin aplicar aún el Vecino Más Cercano, obtenemos las siguientes rutas para el vehículo 1: 0-1-2-3, como se muestra en la ilustración 9. Luego de aplicarlo se mantiene la misma distribución de la ilustración 9, con la única diferencia que cambia el orden de los nodos. La ruta final es la siguiente: 0-2-3-0.

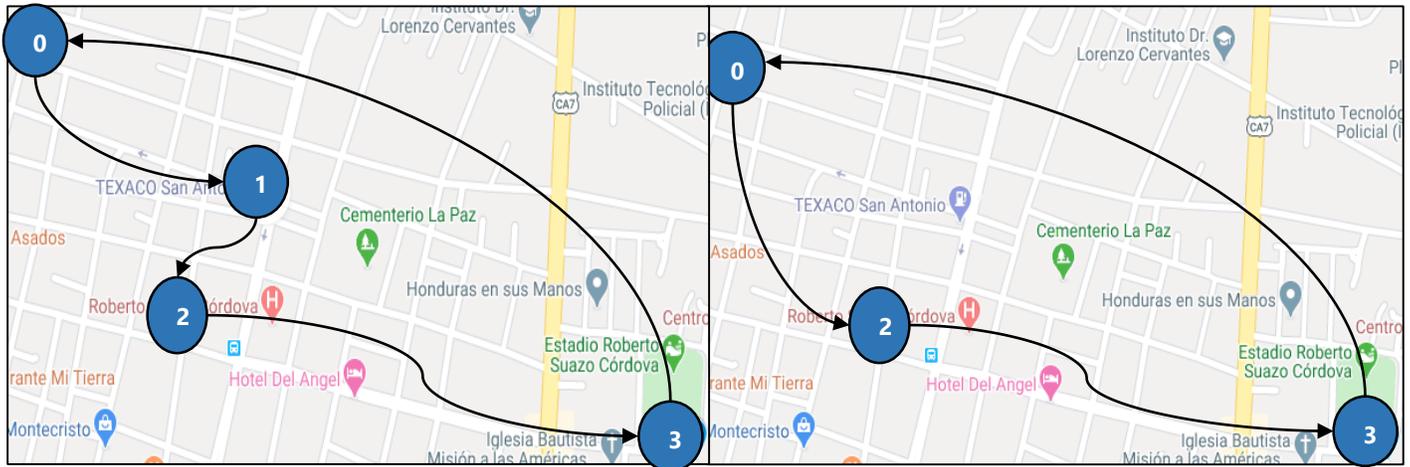


Ilustración 9 - Recorrido del vehículo 1 sin aplicar Vecino Más Cercano (Izquierda) y recorrido final del vehículo 1 (Derecha).

Fuente: Elaboración Propia

Al resolver, sin aplicar aún el Vecino Más Cercano, obtenemos las siguientes rutas para el vehículo 2: 0-1-4-5-6, como se muestra en la ilustración 10. Luego de aplicarlo se mantiene la misma distribución de la ilustración 10, con la única diferencia que cambia el orden de los nodos. La ruta final es la siguiente: 0-4-1-6-5.

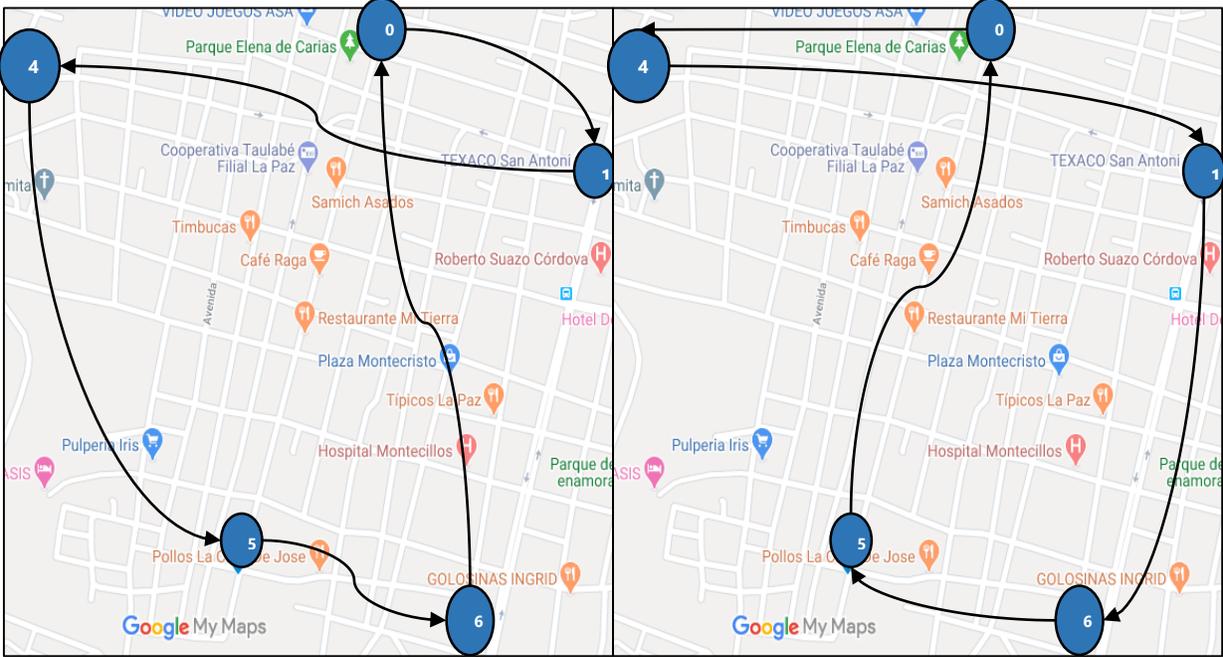


Ilustración 10 - Recorrido del vehículo 2 sin aplicar Vecino Más Cercano (Izquierda) y Recorrido final del vehículo 2(Derecha).

Fuente: Elaboración Propia

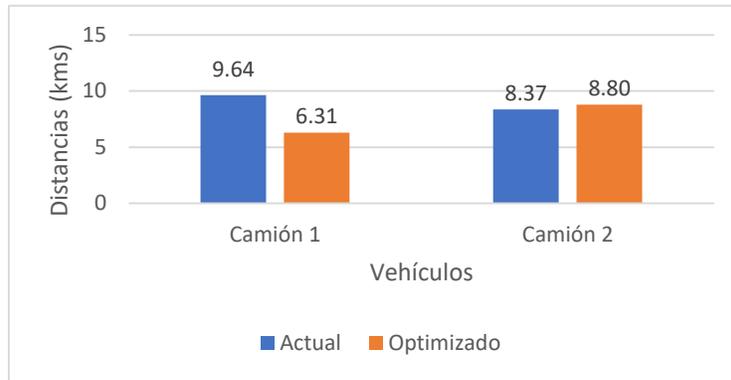


Ilustración 9 - Comparación de distancias entre modelos.

Fuente: Elaboración Propia

En el modelo actual, el vehículo 1 visita 3 nodos con una distancia total de 9.64 kms, mientras que el vehículo 2 visita 3 nodos y su distancia total es de 8.37 kms. Luego de aplicar el Vecino Más Cercano, se obtuvo la ruta final para el vehículo 1 constando de 2 nodos con una distancia total de 6.31 kms; eliminando 3.33 kms y representando una mejora de un 52.77%. La nueva ruta para el vehículo 2 consta de 4 nodos con una distancia total de 8.80 kms. Se añadieron 0.43 kms, representando un cambio de un 4.89%.

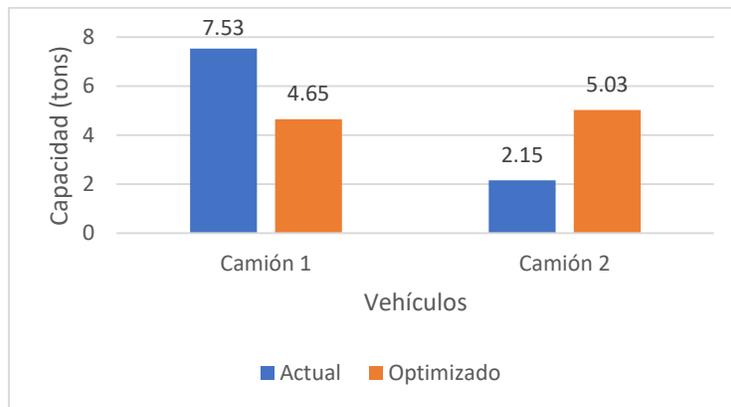


Ilustración 10 - Comparación de capacidades entre modelos.

Fuente: Elaboración Propia

En cuanto a la capacidad, se obtuvieron mejoras para el vehículo 1, mientras que el vehículo sufrió algunos cambios. El modelo actual para el vehículo 1 cuenta con 7.53 tons, mientras que en el modelo optimizado se redujeron a 4.65 tons; representando una mejora de un 61.94% con la eliminación de 2.88 tons. El vehículo 2 contaba con 2.15 tons y se incrementaron a 5.03 tons, representando un cambio de un 57.26% con el aumento de 2.88 tons. En la ilustración 12 se muestran los datos previamente explicados.

5.2.3 MIÉRCOLES & SÁBADO (MODELO ACTUAL & OPTIMIZADO)

(Modelo Actual)

En la tabla 15 se muestra el recorrido y las rutas establecidas para el modelo actual para los días miércoles y sábado.

Tabla 15 - Ruta de Miércoles & Sábado.

Miércoles & Sabado		Miércoles & Sabado	
Camión 1	Lugar	Camión 2	Lugar
0		0	
1	Mercado	1	Mercado
2	Res. Orquídea	2	Res. Orquídea
3	Rancho Víctor	3	Rancho Víctor
4	Col. Nuevo Amanecer	4	Col. Nuevo Amanecer
5	Agua Blanca	5	Agua Blanca
6	Col. Urquíia	6	Col. Urquíia
7	Basurero	7	Basurero
Miércoles descansa un camión, y el sábado descansa el otro.			
0-1-2-3-4-5-6-7		0-1-2-3-4-5-6-7	

Fuente: Elaboración Propia

La ruta del vehículo 1 y el vehículo 2 es la misma, y es la siguiente: 0-1-2-3-4-5-6, tal como se muestra en la ilustración 11. La única diferencia es que el miércoles trabaja solamente el vehículo 1, mientras que el sábado trabaja solamente el vehículo 2.

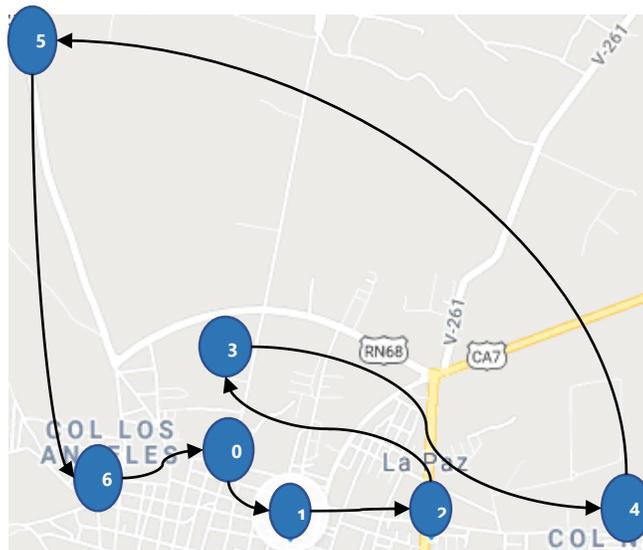


Ilustración 11 - Recorrido del vehículo 1 y 2.

Fuente: Elaboración Propia

(Modelo Optimizado)

Luego de haber simulado el comportamiento aproximado del modelo optimo, se obtuvieron las siguientes respuestas, como se muestra en la tabla 16.

Tabla 16 - Modelo de Optimización.

		Miércoles & Sabado								
		0	1	2	3	4	5	6	(<=1)	(=0)
Camión 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
	2	0	0	0	0	1	0	0	1	0
	3	0	0	0	0	0	1	0	1	0
	4	0	0	1	0	0	0	0	1	0
	5	0	0	0	1	0	0	0	1	0
	6	1	1	0	0	0	0	0	1	0
Camión 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
camión 1	(<=1)	1	1	1	1	1	1	1		
camión 2	(<=1)	0	0	0	0	0	0	0		
	(=1)		1	1	1	1	1	1	6	(<=6)
	(<=6)	6							0	(<=6)
	(<=6)	0								
						DC1	5.13			
						DC2	0		7	(=7)
		1011								

Fuente: Elaboración Propia

Al resolver, sin aplicar aún el Vecino Más Cercano, obtenemos el siguiente recorrido: 0-1-2-3-4-5-6; siendo los mismos nodos mostrados anteriormente en la ilustración 12. Luego de aplicar el Vecino Más Cercano, cambia únicamente el orden de los lugares visitados, sin contar subrecorridos, y siendo la ruta final para ambos vehículos la siguiente: 0-3-2-4-1-6-5 con una distancia total de 21.81 kms y una capacidad utilizada de 5.13 tons.

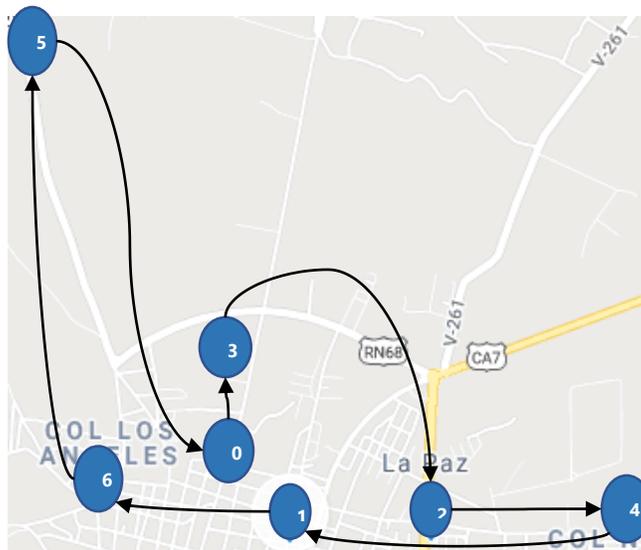


Ilustración 12 - Recorrido final del vehículo 1 y 2.

Fuente: Elaboración Propia

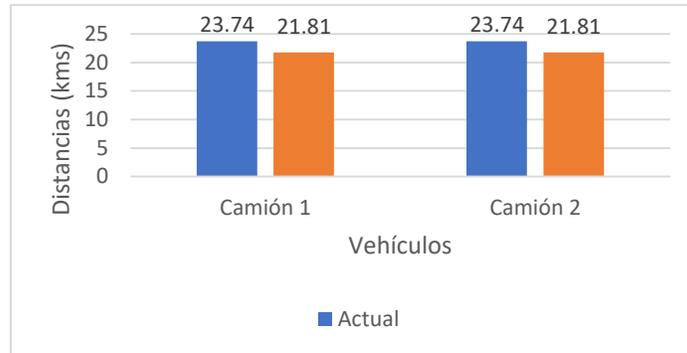


Ilustración 13 - Comparación de distancias entre modelos.

Fuente: Elaboración Propia

En el modelo actual, ambos vehículos visitan 6 nodos, contando con una distancia total de 23.74 kms, tal como se muestra en la ilustración 13. Luego de simularlo en OpenSolver, se obtuvo que la nueva ruta para ambos vehículos consta de distancia total de 21.81 kms; eliminando 1.93 kms y esto representando una mejora de un 8.85%.

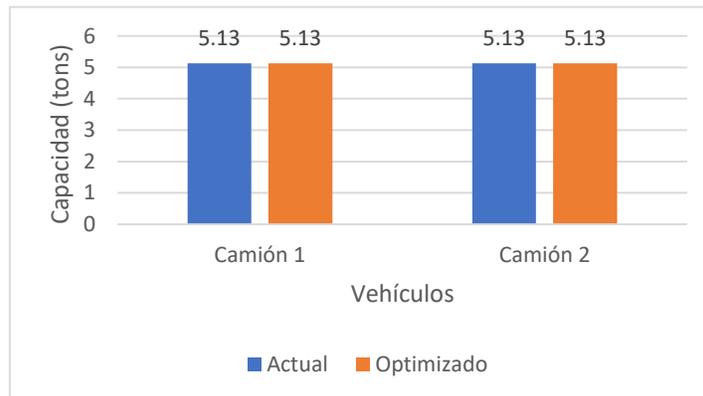


Ilustración 14 - Comparación de capacidades entre modelos.

Fuente: Elaboración Propia

En cuanto a la capacidad de cada vehículo se mantuvo, ya que no hubo cambios en la cantidad de nodos. Así como se muestra en la ilustración 14, ambos vehículos cuentan con la misma capacidad de 5.13 tons, tanto en el modelo actual como en el optimizado.

5.2.4 DOMINGO (MODELO ACTUAL & OPTIMIZADO)

El recorrido del día domingo no se puede optimizar debido a que su ruta es demasiado corta, y en la tabla 17 se muestran sus respectivos nodos a visitar.

Tabla 17 - Ruta de Domingos

Domingo	
Lugar	
0	
1	Mercado
2	Basurero
Domingo descansa un camión.	
0-1-2	

Fuente: Elaboración Propia

El recorrido completo realizado por el vehículo 1 es el siguiente: 0-1-2-0. En este caso, el nodo 0 es el depósito de donde salen los vehículos y el nodo 2 es el basurero. La distancia total recorrida es de 6.59 kms con una capacidad utilizada de 3.18 tons, ya que el único lugar que visitan es El Mercado, cuya demanda total es de 3.18 tons.

5.2.5 ANÁLISIS & RESULTADOS GENERALES

En la ilustración 15 se muestra el porcentaje de cambio de distancias entre ambos modelos para cada uno de los vehículos.

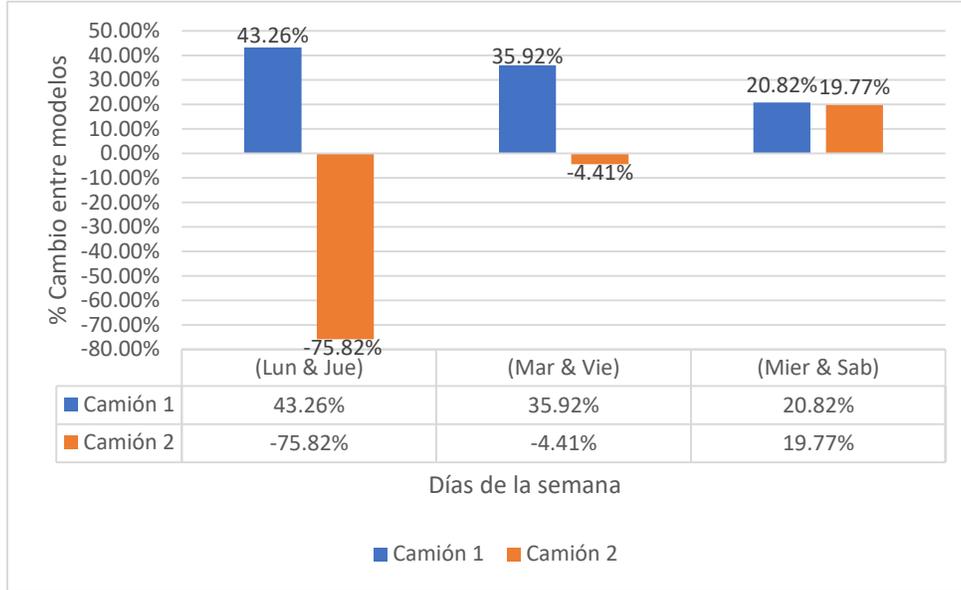


Ilustración 15 - Porcentaje de cambio de distancia para cada vehículo.

Fuente: Elaboración Propia

En términos generales, el vehículo 1 obtuvo un impacto positivo de un 33.33%, mientras que el vehículo 2 obtuvo un impacto negativo de un 20.15%. Los resultados de los días lunes y jueves son los más sobresalientes para el vehículo 1 porque es el que más crecimiento tiene, mientras que el vehículo 2 es todo lo opuesto porque presenta el mayor decrecimiento de un 75.82% en comparación a sus demás recorridos. Esto sucede debido a una correcta distribución de los vehículos respecto a las rutas, ya que en el modelo actual el vehículo 1 era quien visitaba la mayoría de los nodos, pero al momento de realizar un balance el vehículo 2 se iba a ver "afectado" porque algunos nodos serían programados para él.

En realidad, este cambio es positivo porque crea un balance entre los vehículos mediante una correcta distribución respetando las capacidades límites de cada vehículo. Lo mismo ocurre con la situación de los días martes y viernes, donde el vehículo 1 pasa de recorrer 9.64 kms a 3.33 kms, pero el vehículo 2 que primero recorría 8.37 kms en el modelo actual pasa a recorrer 8.80 kms en el optimizado, y esto representa el 4.41% de cambio obtenido por el balanceo de carga entre los vehículos.

En la ilustración 16 se muestra el porcentaje de cambio en la capacidad entre ambos modelos para cada uno de los vehículos.

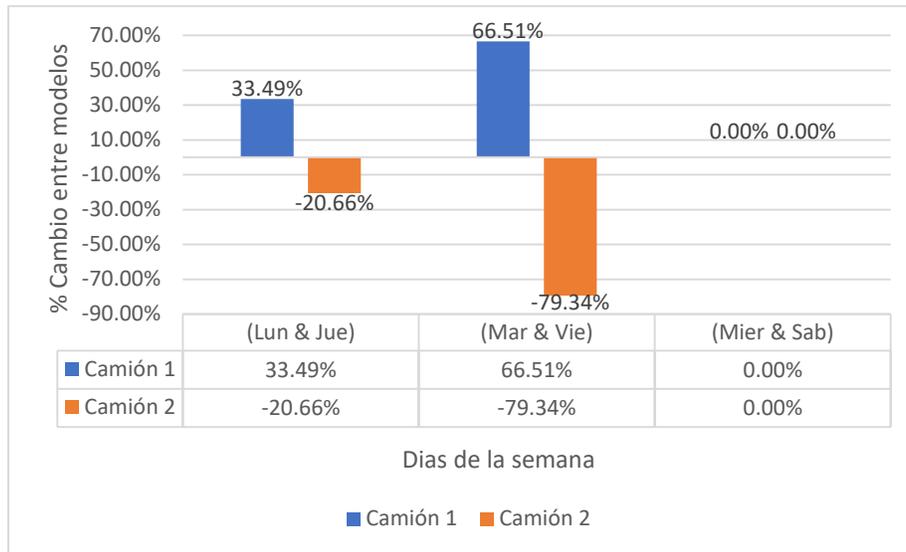


Ilustración 16 - Porcentaje de cambio de capacidad para cada vehículo.

Fuente: Elaboración Propia

En términos generales, el vehículo 1 obtuvo un impacto positivo de un 33.33% y el vehículo 2 un impacto negativo de un 33.33%. Esto quiere decir que, debido a una correcta distribución de las rutas, la capacidad que se elimina del vehículo 1 es otorgada al vehículo 2 para crear un balance entre ellos. Por ejemplo, el vehículo 2 para los días martes y viernes en el modelo actual tenía una capacidad utilizada de 2.15 toneladas, pero luego de mejorar este proceso y obtener una respuesta óptima por parte de nuestro modelo, pasa a obtener una capacidad utilizada de 5.03 toneladas; liberando al vehículo 1 de tanta carga y distribuyéndola equitativamente entre ambos vehículos.

5.3 ESCENARIOS

Se realizaron distintos escenarios donde se tomaron en cuenta las siguientes variables: la capacidad de los vehículos y la cantidad de vehículos. Estos escenarios se realizaron para determinar el impacto que estas variables podrían tener al momento de efectuar algún cambio en ellas.

5.3.1 ESCENARIO 1 (LUNES & JUEVES)

Para el escenario 1 se optará por un solo vehículo con un cambio en su capacidad máxima a 14 toneladas, manteniendo la misma distribución durante todos los días de la semana. Luego de resolver el modelo sin aplicar el vecino Más Cercano, se obtuvieron dos subrecorridos, siendo el primero: 0-6-10-4-2-3-5-1-12-9-6 que se muestra en la ilustración 17, y en la ilustración 18 se muestra el segundo subrecorrido: 0-7-13-8-11-7.

Ilustración 17 - Primer subrecorrido.

Fuente: Elaboración Propia

La ruta total de los subrecorridos es la siguiente: 0-6-10-4-2-3-5-1-12-9-6-7-13-8-11-7-14-0 con una distancia total de 31.43 kms y una capacidad utilizada total de 14.30 tons.

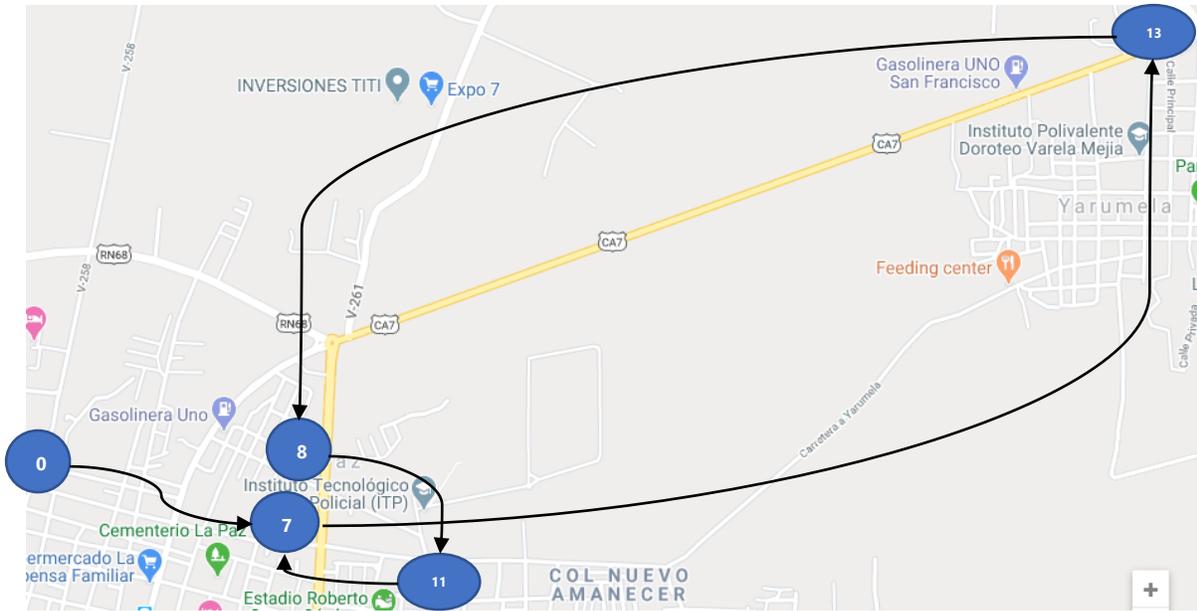


Ilustración 18 - Segundo subrecorrido.

Luego de aplicar el Vecino Más Cercano y eliminar los subrecorridos, el vehículo 1 cuenta con la siguiente nueva ruta: 0-10-6-1-12-9-7-11-8-4-2-5-3-13; como se muestra en la ilustración 19, con una distancia total de 33.81 kms y una capacidad utilizada de 12.35 tons.

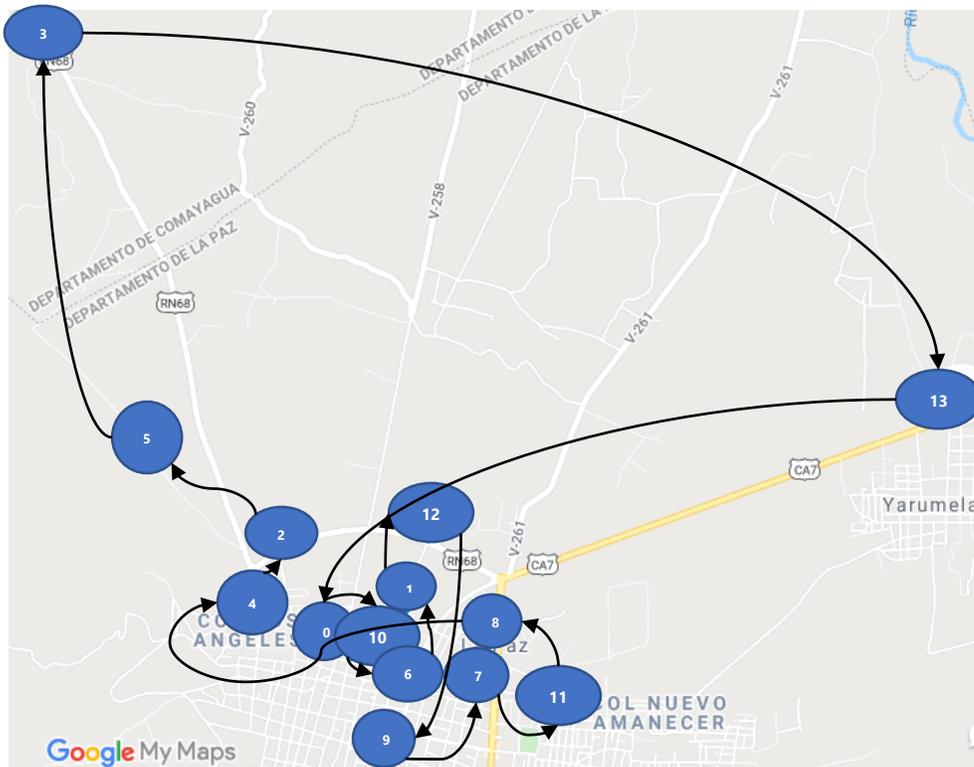


Ilustración 19 - Ruta final, Escenario 1.

Fuente: Elaboración Propia

5.3.2 ESCENARIO 1 (MARTES & VIERNES)

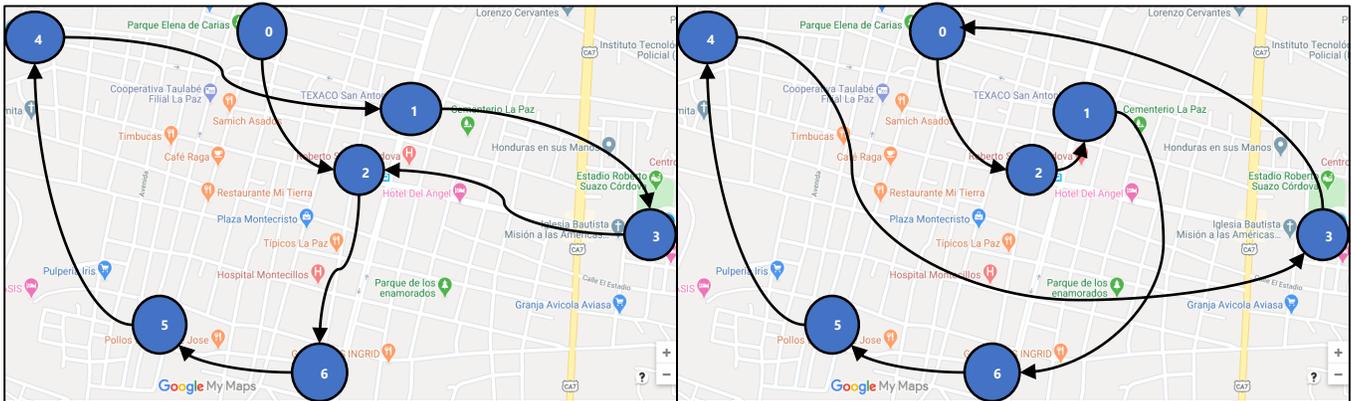


Ilustración 20 - Recorrido del vehículo 1 sin aplicar Vecino Más Cercano (Izquierda) y recorrido final del vehículo 1 (Derecha).

Fuente: Elaboración Propia

Luego de resolver el modelo sin aplicar el Vecino Más Cercano se obtuvo la siguiente ruta: 0-2-6-5-4-1-3-2 con una distancia total de 13.49 kms y una capacidad utilizada de 12.86 tons.

Luego de aplicar el Vecino Más Cercano, la distribución de los nodos cambia y la ruta final para el vehículo 1 es la siguiente ruta: 0-2-1-6-5-4-3; con una distancia total recorrida de 13.72 kms y una capacidad utilizada de 9.68 tons; así como se muestra en la ilustración 20.

5.3.3 ESCENARIO 1 (MIÉRCOLES & SÁBADO)

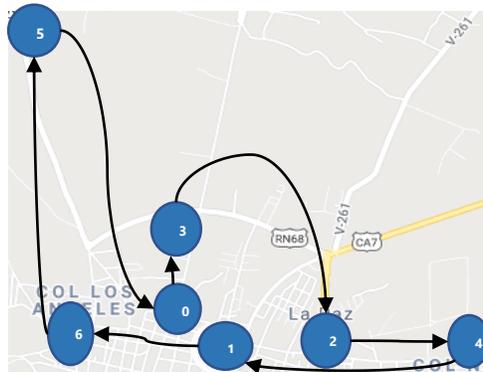


Ilustración 21 - Recorrido del vehículo 1 y 2.

Fuente: Elaboración Propia

El escenario 1, mostrado en la ilustración 21, es exactamente el mismo al modelo optimizado. La ruta es la misma: 0-3-2-4-1-6-5, con una distancia total de 21.81 kms y una capacidad utilizada de 5.13 tons.

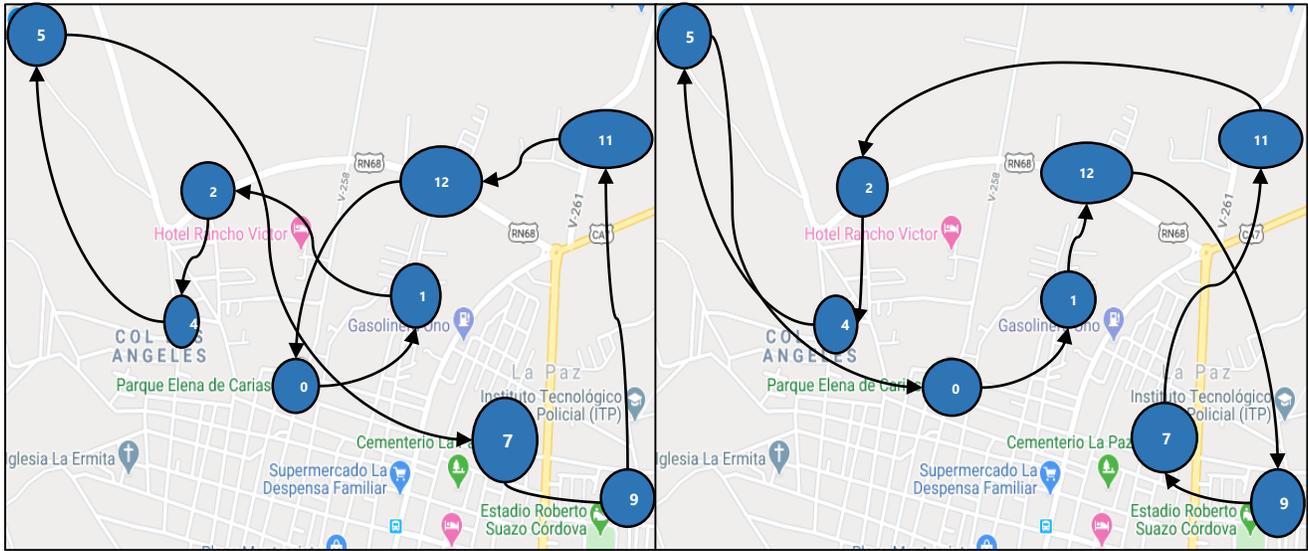


Ilustración 22 - Recorrido del vehículo 1 sin aplicar Vecino Más Cercano (Izquierda) y recorrido final del vehículo 1 (Derecha).

Fuente: Elaboración Propia

Al resolver sin aplicar aún el Vecino Más Cercano, obtenemos las siguientes rutas para el vehículo 2: 0-3-6-8-10-13, como se muestra en la ilustración 23. Luego de aplicar el Vecino Más Cercano, el nuevo recorrido para el vehículo 2 es el siguiente: 0-10-6-8-13-3; con una distancia total recorrida de 27.65 kms y una capacidad utilizada de 4.55 tons.

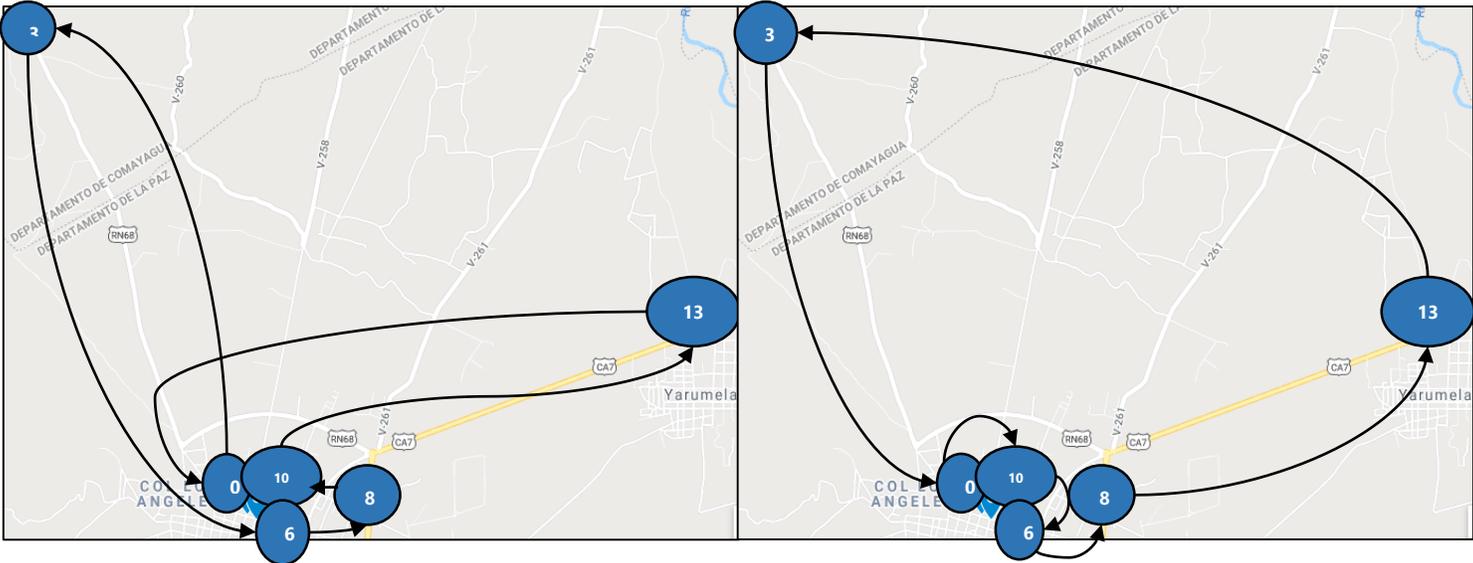


Ilustración 23 - Recorrido del vehículo 2 sin aplicar Vecino Más Cercano (Izquierda) y recorrido final del vehículo 2 (Derecha).

Fuente: Elaboración Propia

5.3.5 ESCENARIO 2 (MARTES & VIERNES)

Tabla 20 - Modelo de Optimización.

		Martes & Viernes								
Camión 1	0	0	1	2	3	4	5	6	(=1)	(=0)
	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0
	2	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	3	0	1	0	0	0	0	0	1	-1
	4	0	0	0	1	0	0	0	1	-1
	5	0	0	0	0	1	0	0	1	-1
	6	0	0	0	0	0	1	0	1	-1
camión 1	(=1)	0	1	1	1	1	1	1		
	(≤6)	6	1	0	0	1			6	(≤6)
						DC1	10.08		7	(=7)
		8.15								

Fuente: Elaboración Propia

Al resolver sin aplicar aún el Vecino Más Cercano, obtenemos la siguiente ruta para el vehículo 1: 0-4-3-1-2-6-5, como se muestra en la ilustración 24. Luego de aplicarlo, la nueva ruta es la siguiente: 0-2-1-6-5-4-3; con una distancia total recorrida de 13.72 kms y una capacidad utilizada de 9.68 tons.

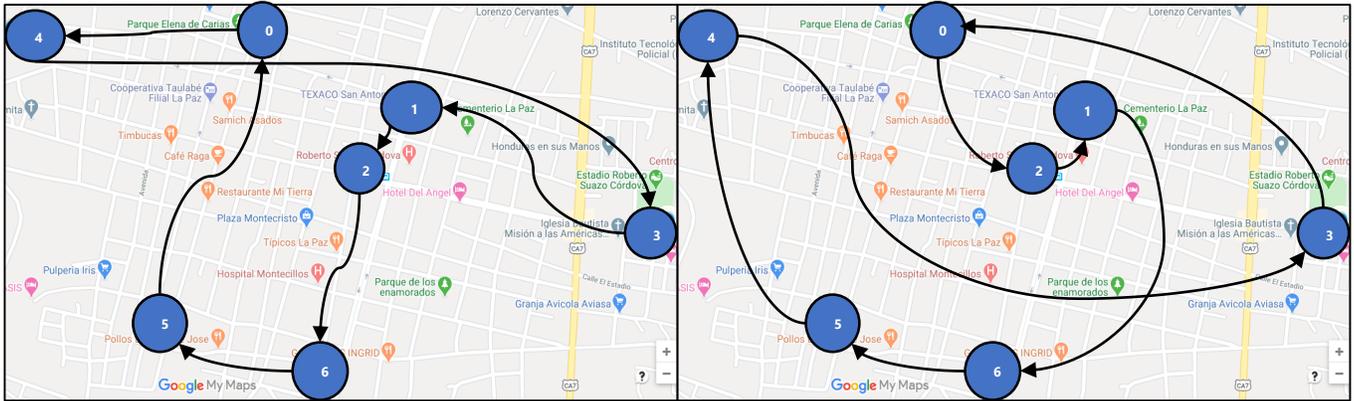


Ilustración 24 - Recorrido del vehículo 1 sin aplicar Vecino Más Cercano (Izquierda) y recorrido final del vehículo 1 (Derecha).

Fuente: Elaboración Propia

5.3.6 ESCENARIO 2 (MIÉRCOLES & SÁBADO)

En la tabla 21 se muestra el modelo de optimización para los días miércoles y sábado del escenario 2.

Tabla 21 - Modelo de Optimización.

		Miércoles & Sabado								
		0	1	2	3	4	5	6	(<=1)	(<=0)
Camión 2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0
	2	0	0	0	0	1	0	0	1	1
	3	0	0	0	0	0	1	0	1	0
	4	0	0	0	1	0	0	0	1	0
	5	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	6	0	1	0	0	0	0	0	1	1
camión 2	(<=1)	0	1	1	1	1	1	1		
	1	1	1	1						
	(<=6)	6							6	(<=6)
						DC2	5.33		7	(<=7)
		14								

Fuente: Elaboración Propia

El recorrido mostrado en la ilustración 25 es exactamente el mismo al recorrido del modelo optimizado y del escenario 1. La ruta es la misma: 0-3-2-4-1-6-5, con una distancia total de 21.81 kms y una capacidad utilizada de 5.13 tons.

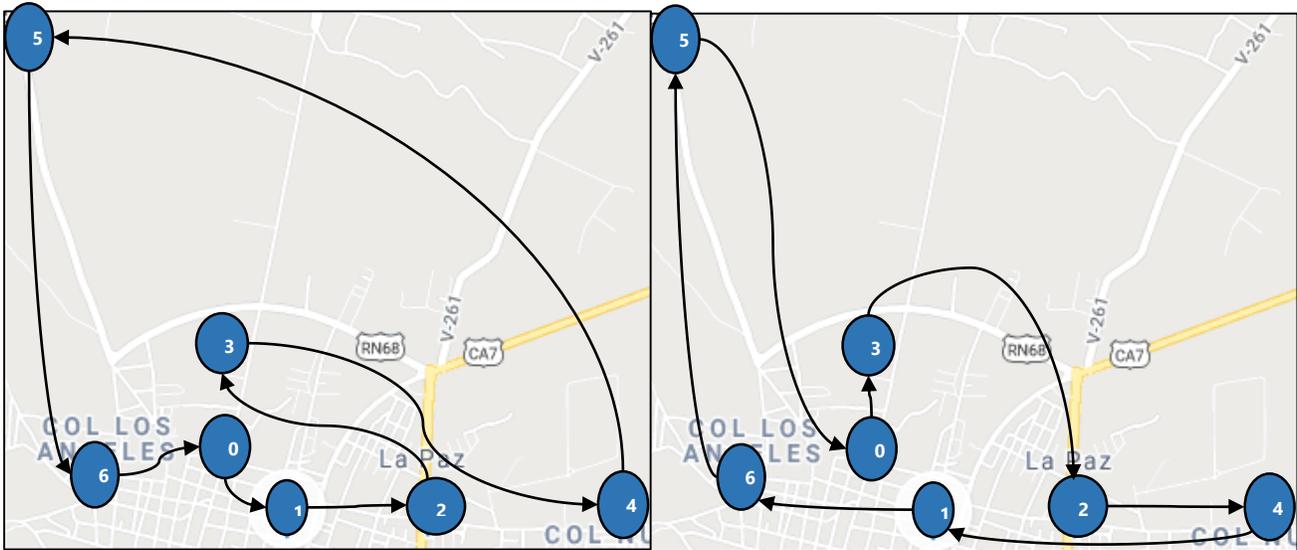


Ilustración 25 - Recorrido del vehículo 2 sin aplicar Vecino Más Cercano (Izquierda) y recorrido final del vehículo 2 (Derecha).

Fuente: Elaboración Propia

5.4 IMPACTO ECONÓMICO DE LOS DISTINTOS ESCENARIOS

5.4.1 MODELO OPTIMIZADO VS ESCENARIO 1

5.4.1.1 LUNES & JUEVES

El modelo optimizado utiliza dos vehículos, el vehículo 1 con capacidad máxima de 12 toneladas y el vehículo 2 con capacidad máxima de 8 toneladas, mientras que el modelo del escenario 1 utiliza únicamente un solo vehículo con capacidad máxima de 14 toneladas. Se realizó una comparación para determinar la factibilidad de cada modelo y decidir cuál de los dos presenta el mejor resultado, siempre y cuando cumpla con los requerimientos necesarios para lograr el objetivo principal de optimización.

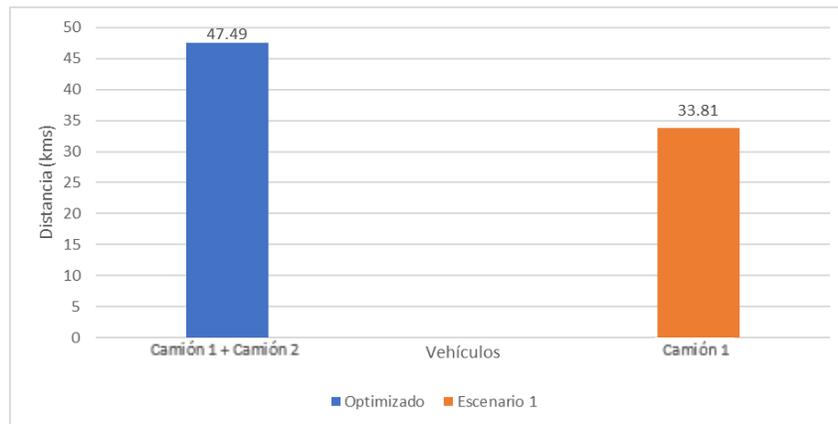


Ilustración 24 - Modelo Optimizado vs Escenario 1(Distancia).

Fuente: Elaboración Propia

El vehículo 1 con una distancia total recorrida de 17.89 kms y el vehículo 2 con 29.51 kms, hacen un total de 47.79 kms entre ambos vehículos; mientras que el escenario 1 con un solo vehículo realiza una distancia total de 33.81 kms. Este cambio representa una mejora de un 40.46%, debido a la eliminación de 13.68 kms efectuados en el escenario 1. Estos datos se pueden apreciar de una mejor manera con la ilustración 28.

5.4.1.2 MARTES & VIERNES

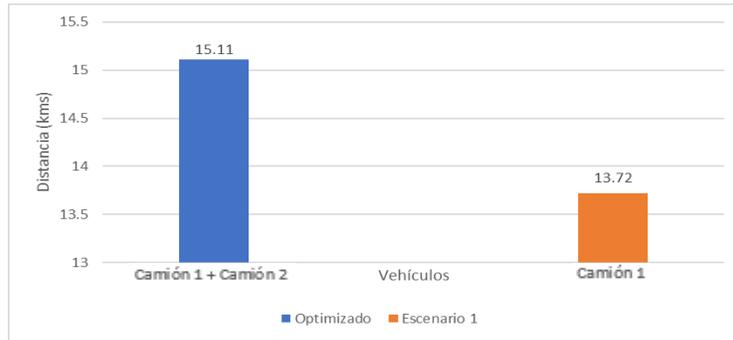


Ilustración 25 - Modelo Optimizado vs Escenario 1 (Distancia).

Fuente: Elaboración Propia

En el modelo optimizado donde el vehículo 1 con una distancia total recorrida de 6.31 kms y el vehículo 2 con 8.80 kms, hacen un total de 15.11 kms entre ambos vehículos; mientras que el escenario 1 con un solo vehículo realiza un total de 13.72 kms. Este cambio representa una mejora de un 10.13%, debido a la eliminación de 1.39 kms efectuado en el escenario 1. Estos datos se pueden apreciar de una mejor manera con la ilustración 29.

5.4.1.3 MIÉRCOLES & SÁBADO

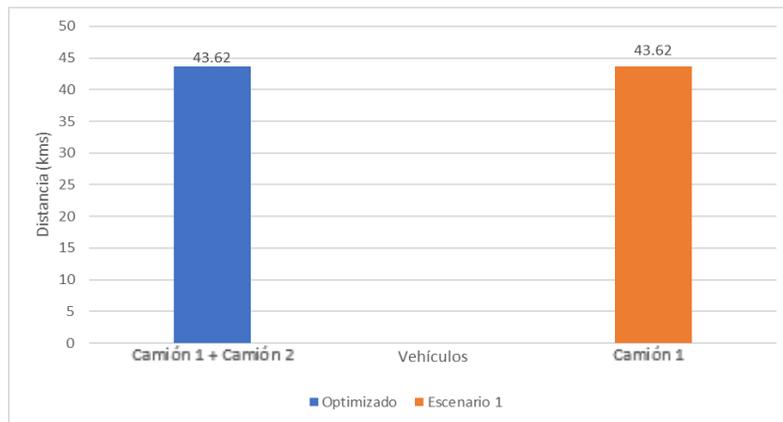


Ilustración 26 - Modelo Optimizado vs Escenario 1 (Distancia).

Fuente: Elaboración Propia

A pesar de que el modelo optimizado utilice dos vehículos y el escenario 1 solo utilice uno, las rutas son las mismas, y es por esto que ningún cambio es efectuado. Dentro del modelo optimizado, el vehículo 1 realiza su recorrido el día miércoles y el vehículo 2 el día sábado, y ambos vehículos recorren 21.81 kms cada uno, y entre los dos un total de 43.62 kms.

Dentro del escenario 1, un único vehículo realiza la misma ruta para ambos días, miércoles y sábado, sumándose estas dos distancias y su resultado final siendo el mismo de 43.62 kms entre los dos días. Estos datos se pueden apreciar de una mejor manera con la ilustración 9. Cabe mencionar que para los recorridos de los días lunes, martes, miércoles, jueves, viernes y sábado no presentaron ningún cambio en cuanto a la capacidad utilizada por los vehículos.

5.4.1.4 COSTO TOTAL DE ESCENARIO 1

En la tabla 22 se detalla cada uno de los gastos pertenecientes al escenario 1, que consta de una sola compra de una unidad vehicular con capacidad máxima de 14 toneladas.

Tabla 22 - Gastos detallados del Escenario 1.

Escenario 1 (Solamente Vehículo 1)				
Descripción del gasto	Cantidad	Frecuencia	Subtotal	Total
1) Compra de vehículo recolector	L3,500,000.00	-	L3,500,000.00	L4,204,400.00
2) Mantenimiento	L7,600.00	(trimestral)	L30,400.00	
3) Salarios Operadores	L7,750.00	4 personas	L434,000.00	
4) Combustible	L5,000.00	(cada 2 semanas)	L240,000.00	

Fuente: Elaboración Propia

5.4.2 MODELO OPTIMIZADO VS ESCENARIO 2

5.4.2.1 LUNES & JUEVES

Tanto el modelo optimizado cómo el escenario 2 utilizan los dos vehículos, pero la diferencia se encuentra en una nueva distribución de los vehículos que se hizo para el escenario 2. En el optimizado, el vehículo 1 cuenta con una distancia total recorrida de 17.98 kms, mientras que en el escenario 2 cuenta con una distancia total de 18.95 kms. Este cambio representa un impacto negativo, ya que la distancia aumenta en un 5.12% debido a que se agregan 0.97 kms al recorrido del escenario 2.

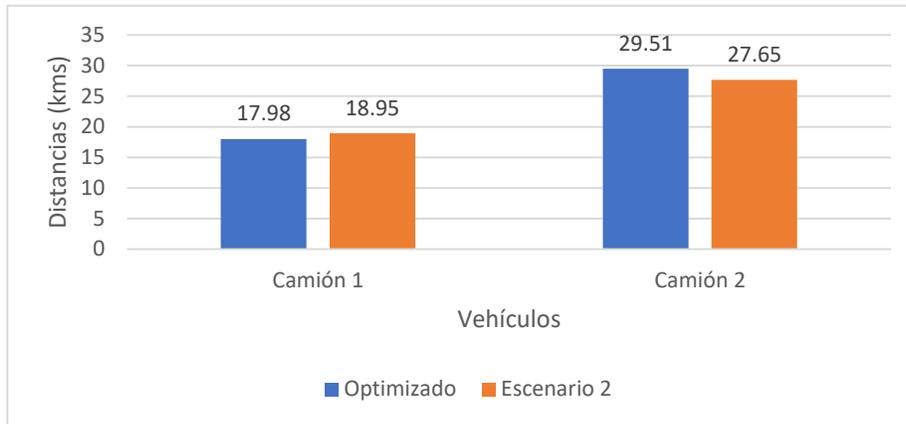


Ilustración 27 - Modelo Optimizado vs Escenario 2 (Distancia).

Fuente: Elaboración Propia

El vehículo 2 cuenta con una distancia total recorrida de 29.51 kms en el optimizado, mientras que en el escenario 2 cuenta con una distancia total de 27.65 kms. Este cambio influye de manera positiva, ya que la distancia disminuye en un 6.73% debido a la eliminación de 1.86 kms en el recorrido. Estos datos se pueden apreciar en la ilustración 31.

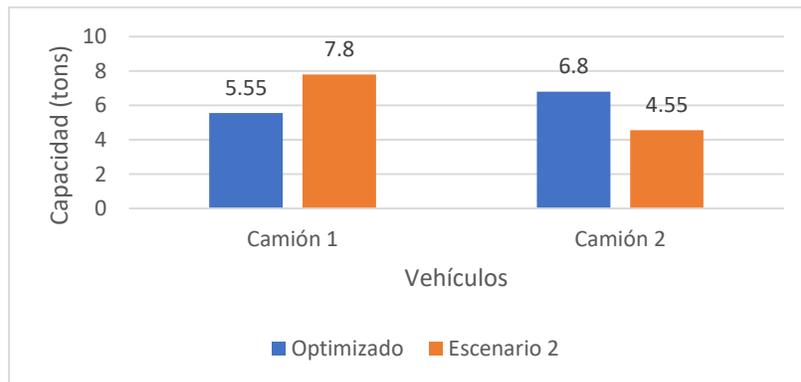


Ilustración 28 - Modelo Optimizado vs Escenario 2 (Capacidad Utilizada).

Fuente: Elaboración Propia

En el optimizado el vehículo 1 cuenta con una capacidad utilizada de 5.55 tons, mientras que el escenario 2 cuenta con una capacidad de 7.8 tons. Este cambio significa que la capacidad utilizada del vehículo 1 aumentó en un 28.85% debido a que se agregan 2.25 tons.

En el optimizado el vehículo 2 cuenta con una capacidad utilizada de 6.8 tons, mientras que el escenario 2 cuenta con una capacidad total de 4.55 tons. La capacidad disminuyó en un 49.45% debido a la eliminación de 2.25 tons del vehículo 2. Estos datos se pueden apreciar de una mejor manera en la ilustración 32.

5.4.2.2 MARTES & VIERNES

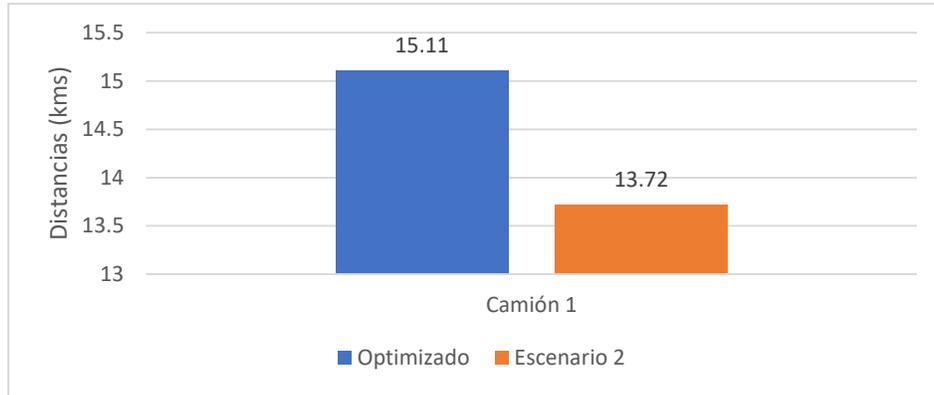


Ilustración 29 - Modelo Optimizado vs Escenario 2 (Distancia).

Fuente: Elaboración Propia

El modelo optimizado utiliza dos vehículos, mientras que el escenario 2 utiliza solamente el vehículo 1. En el optimizado, el vehículo 1 cuenta con una distancia total de 6.31 kms y el vehículo 2 con 8.80 kms; obteniendo un total de 15.11 kms. En el escenario 2, la distancia total recorrida por el vehículo 1 es de 13.72 kms. Esto representa una mejoría, ya que la distancia a cubrir disminuye en un 10.13% debido a la eliminación de 1.39 kms en el recorrido del escenario 2. Estos datos se pueden apreciar de una mejor manera en la ilustración 33. Cabe mencionar que no se presentó ningún cambio en cuanto a la capacidad utilizada de cada vehículo, manteniendo la misma capacidad de 9.68 tons en ambos modelos.

5.4.2.3 MIÉRCOLES & SÁBADO

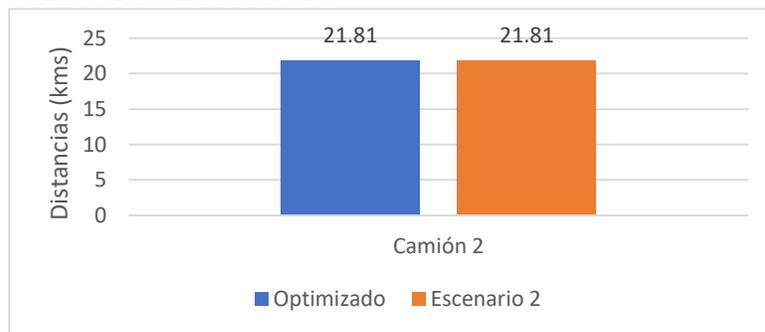


Ilustración 30 - Modelo Optimizado vs Escenario 2 (Distancia).

Fuente: Elaboración Propia

Debido a que es exactamente la misma ruta para ambos días, no se dio ningún cambio en cuanto a la distancia (Ilustración 34) y en cuanto a la capacidad utilizada (Ilustración 35).

A pesar de los cambios realizados en el escenario 2 en cuanto a la nueva distribución de los vehículos, esto no tuvo ningún efecto en cuanto a distancia y capacidad utilizada, ya que son los mismos nodos que están siendo visitados en diferentes días y por diferentes vehículos.

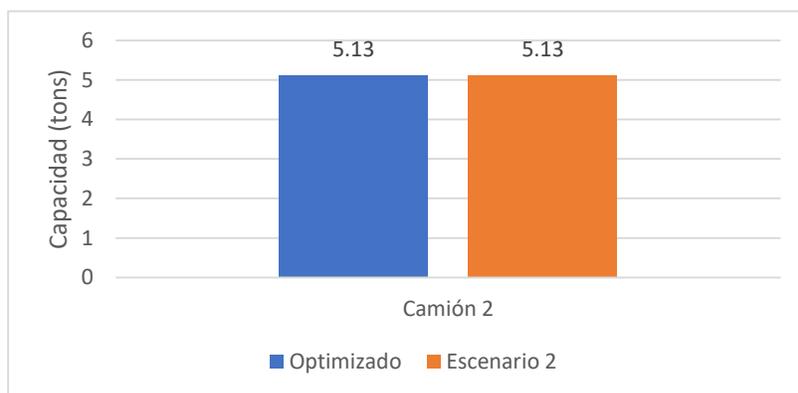


Ilustración 31 - Modelo Optimizado vs Escenario 2 (Capacidad Utilizada).

Fuente: Elaboración Propia

5.4.2.4 COSTO DE ESCENARIO 2

En la tabla 23 se detalla cada uno de los gastos pertenecientes al escenario 2, que consta del uso del vehículo 1 (12 tons) y el vehículo 2 (8 tons).

Tabla 23 - Gastos detallados del Escenario 2.

Escenario 2 (Vehículo 1 & Vehículo 2)				
Descripción del gasto	Cantidad	Frecuencia	Subtotal	Total
1) Mantenimiento vehículo 1	L6,500.00	(trimestral)	L26,000.00	L1,175,900.00
2) Mantenimiento vehículo 2	L4,000.00	(trimestral)	L16,000.00	
3) Salarios Operadores vehículo 1	L7,750.00	4 personas	L434,000.00	
4) Salarios Operadores vehículo 2	L7,750.00	3 personas	L325,500.00	
5) Combustible vehículo 1	L4,200.00	(cada 2 semanas)	L201,600.00	
6) Combustible vehículo 2	L3,600.00	(cada 2 semanas)	L172,800.00	

Fuente: Elaboración Propia

VI. CONCLUSIONES

1. Se creó un modelo de optimización cuyos resultados para el vehículo 1 fueron positivos con un cambio global de un 27.59% debido a la eliminación de 9.27 kms de sus rutas, mientras que el vehículo 2 presentó resultados negativos con un cambio global de un 7.60% dado que se agregan 9.76 kms a sus rutas.
2. El escenario 2 obtuvo un impacto positivo en la mayoría de sus recorridos en comparación al modelo actual ya que, en las rutas de martes y viernes, miércoles y sábado se logró reducir 4.29 kms y 1.93 kms respectivamente. En la ruta de lunes y jueves se agregaron 7.40 kms, favoreciendo al modelo actual. En cuanto a las capacidades utilizadas de los vehículos, se mantuvieron iguales para las rutas de martes y viernes, miércoles y sábado, mientras que para la ruta de lunes y jueves creció en un 16.48% debido al aumento de 0.75 toneladas para el vehículo 2.
3. El escenario 1 con un costo total de L. 4, 204, 200 representa un costo muy elevado en comparación al escenario 2, con un costo total de L. 1, 175, 900. El escenario 2 es más factible y realista debido a que utiliza los recursos disponibles actualmente y representa un ahorro de 72.03% en comparación al escenario 1.

VII. RECOMENDACIONES

1. Recopilar toda la información necesaria con mucho tiempo de antelación y que esta información provenga, si es posible, de una única fuente para evitar el retraso y la falta de confiabilidad tanto en la información como en el informante.
2. Involucrar como variable de investigación el tiempo, ya que es un elemento de mucha importancia en un estudio de esta categoría y en el cual se pueden realizar mejoras siempre.
3. Calcular el costo del combustible basándose en la distancia recorrida para obtener un cálculo más exacto en cuanto a este tipo de gasto.

VIII. APLICABILIDAD/ IMPLEMENTACIÓN

Este proyecto se puede implementar el modelo optimizado y el escenario 2 debido a que su objetivo principal es mejorar la manera en cómo se estaba realizando el proceso actual de recolección de residuos, y se logró cumplir con este objetivo mediante estos dos modelos. Los cambios que se hicieron para optimizar este proceso mediante estos dos modelos son aplicables, ya que son cambios que toman poco tiempo y utilizan los recursos que actualmente están disponibles.

IX. EVOLUCIÓN DE TRABAJO ACTUAL/ TRABAJO FUTURO

Como segunda etapa de este proyecto de investigación, se podría realizar un estudio de tiempos para determinar el tiempo total que toma realizar los distintos recorridos. También podría tomarse en cuenta un estudio ambiental, para determinar la manera de disminuir la contaminación ambiental, ya sea en el depósito final como en el transcurso de los recorridos. Las nuevas preguntas de investigación son:

1. ¿Se podrá realizar un estudio de tiempos con el uso de microchips que almacenen datos, como las distancias, tiempos de duración de los recorridos y lugares visitados?
2. ¿Se podrá disminuir la contaminación ambiental mientras se realizan los recorridos?
3. ¿De qué manera se puede unir el estudio de tiempos y el estudio ambiental para desarrollar una investigación más robusta?

BIBLIOGRAFÍA

Moreno, J., & Arriaga, E. (2006, septiembre 7). *Optimización del sistema de rutas de recolección de residuos sólidos (Ecoeficiencia)*. X Congreso de Ingeniería de Organización, Valencia, España.
http://adingor.es/congresos/web/uploads/cio/cio2006/aprov_distr_transporte/000226_final.pdf

Rischmagui, G. (2017). *Manual para el manejo de Desechos Sólidos*. [Archivo PDF]
https://www.ndf.fi/sites/ndf.fi/files/attach/05._manual_desechos_solidos.pdf

Ventura, W. (2012). *Relleno Sanitario para el municipio de Santa Ana de Yusgüare en el departamento de Choluteca, Republica de Honduras*. [Archivo PDF]
<https://tzibalnaah.unah.edu.hn/bitstream/handle/123456789/5982/T-MSc00068.pdf?sequence=2>

Ramírez, L. (s. f.). *Alcaldes de Honduras conocen la difícil situación del manejo de los residuos sólidos a nivel nacional*.
https://www.paho.org/hon/index.php?option=com_content&view=article&id=271:alcaldes-honduras-conocen-dificil-situacion-manejo-residuos-solidos-nivel-nacional&Itemid=228

Liza, I., & Urdiales, W. (2016). *Modelo de Optimización del Sistema de Recojo de Residuos Sólidos en el Distrito de Reque para Mejorar la Eficiencia de Operaciones*. [Archivo PDF]
<http://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/uss/2314/RUIZ%20LIZA%20y%20VIDAL%20URDIALES.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Carrillo, A. (2014). *Modelo de ruteo de vehículos para la distribución de las empresas Laboratorios Veterland, Laboratorios Callbest y Cosméticos Marliou Paris*. [Archivo PDF]
<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/16579/MediorrealCarrilloAndresFelipe2014.pdf?sequence=1>

Taha, H. A., & Pozo, V. G. (2004). *Investigación de Operaciones*. Monterrey, México: Pearson Educación.

Girol, A., & Antón, F. (s. f.). *Optimización de Rutas de Vehículos de Recogida de Basuras mediante Recorrido Simulado*. [Archivo PDF].
<https://es.scribd.com/document/326298911/optimizacion-de-rutas-de-vehiculos-de-recogida-de-basuras-mediante-recorrido-simulado-2-pdf>

Chirva, J., Cruz, Y., & López-Santana, E. (2016). *Un Enfoque Híbrido de Agrupamiento y Optimización Entera Mixta para el Problema de Servicios de Recolección Selectiva de Residuos Sólidos Domésticos*. *Redalyc*, 1-9.
<https://www.redalyc.org/jatsRepo/4988/498853953011/index.html>

Simón, S., Demaldé, J., Hernández, J., & Carnero, M. (2012). Optimización de Recorridos para la Recolección de Residuos Infecciosos. *SciELO*, 23(4), 125-132.
<https://doi.org/10.4067/s0718-07642012000400014>

Gonzalez-L., E., Adarme-Jaimes, W., & Orjuela-Castro, J. (2015). Stochastic mathematical model for vehicle routing problem in collecting perishable products. *Revista DYNA*, 82(189), 199-206.
<https://doi.org/10.15446/dyna.v82n189.48549>

Lozano, A., Cascante, G., & Martínez, J. (2017). Optimización del proceso de recolección de desechos sólidos de la ciudad de ambato mediante el diseño de un modelo de distribución de redes. *Revista ECA*, 8(2), 158-171.
<http://oaji.net/articles/2017/5813-1516642174.pdf>

Betanzo-Quezada, E., Torres-Gurrola, M., Romero-Navarrete, J., & Obregón-Biosca, S. (2016). Evaluación de rutas de recolección de residuos sólidos urbanos con apoyo de dispositivos de rastreo satelital: análisis e implicaciones. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(3), 323-337.
<https://doi.org/10.20937/rica.2016.32.03.07>

Torres, L. (2008, noviembre 1). *Manejo y Tratamiento Adecuado De Desechos Sólidos de Santa Rosa de Copán (Estudio Económico Social y Ambiental)*. [Archivo PDF]
<https://tzibalnaah.unah.edu.hn/bitstream/handle/123456789/5751/T-MFep00021.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Hillier, F., & Lieberman, G. (2010). *Investigación de Operaciones* (9.a ed., Vol. 1). New York, Estados Unidos: McGraw-Hill Education. [Archivo PDF]
https://dudasytareas.files.wordpress.com/2017/05/hillier_lieberman.pdf

Quezada, M., & León, Y. (2019). *Optimización de las Rutas de Recolección de los Residuos Sólidos Urbanos del Centro Cantonal Sígsig*. [Archivo PDF]
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18149/1/UPS-CT008622.pdf>

Ruz, J. J. (2001). *Modelos lineales de optimización con variables continuas*. [Diapositiva PowerPoint].
<http://www.fdi.ucm.es/profesor/jjruiz/MasterUned/Documentos%20en%20aLF/Tema%201.pdf>

Ocampo, E. (2016). *Solución del problema de localización y ruteo usando un modelo matemático Wexible y considerando efectos ambientales*. [Archivo PDF]
<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/7588/65878T686.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Cardozo, J., Toro, D., & Ocampo, E. (2016a). Solución al Problema de Ruteo de Vehículos con Capacidad Limitada (CVRP) usando una técnica metaheurística. *Scientia et Technica*, 21(3), 225-233.

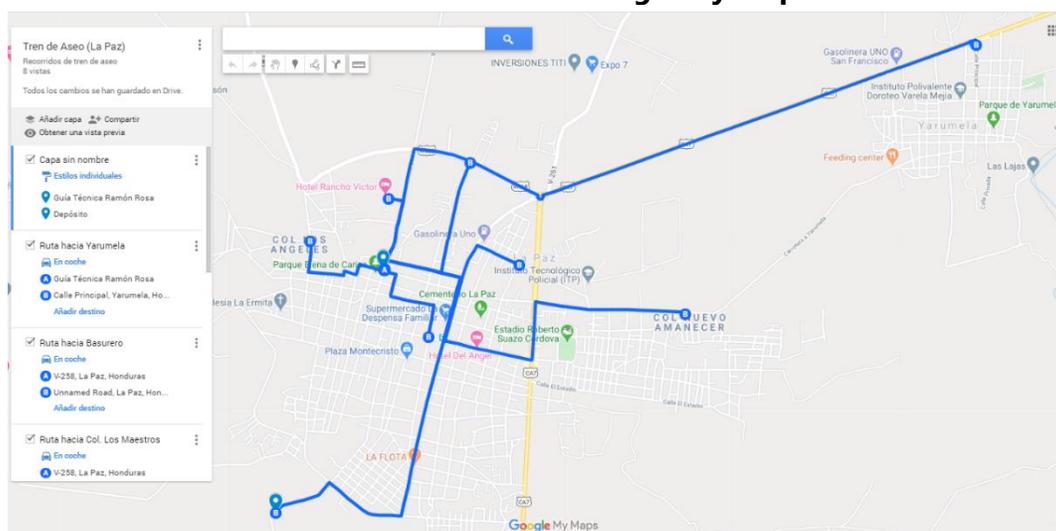
<https://doi.org/10.22517/23447214.9013>

Daza, J., Montoya, J., & Narducci, F. (2009). Resolución del Problema de Enrutamiento de Vehículos con Limitaciones de Capacidad Utilizando un Procedimiento Metaheurístico de Dos Fases. *Revista EIA*, 12, 24-38.

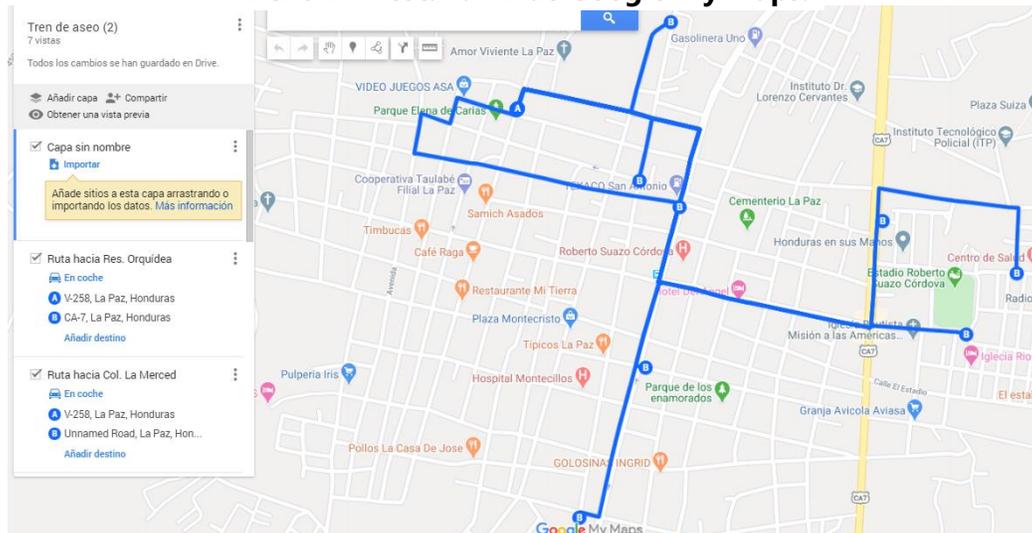
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=149212815002>

ANEXOS

Anexo 1 - Pestaña #1 de Google My Maps.



Anexo 2 - Pestaña #2 de Google My Maps.



Anexo 3 - Pestaña #3 de Google My Maps.

