Universidad de Valparaíso, Chile
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Industrial

Diseño de planificación de ruta para proceso de recolección de residuos sólidos domiciliarios en la comuna La Reina

Por:

Thiare Alejandra Ormeño Pérez

Trabajo de Título para optar al Grado de
Licenciado en Ciencias de la Ingeniería y el Título de
Ingeniero Civil Industrial

Profesor Guía: Erik Schulze

Junio, 2018

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que fueron parte de este proceso, especialmente a mi profesor guía, que desde un comienzo estuvo apoyándome y confiando en mi potencial. A mi familia, principalmente a mi madre, quien con amor y esfuerzo ha logrado guiarme en esta vida, entregándome las herramientas necesarias para ser una buena persona y quien ha trabajado arduamente, día y noche si era necesario, para que no me faltase nada y para que pudiera ser profesional. Y a Marcelo, quien con su cariño y apoyo incondicional me impulsa a lograr mis metas.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Territorio de la comuna de La Reina. 17
Figura 2. 2: Generación de residuos en la región metropolitana. 17
Figura 2.3: Proceso de recolección de residuos sólidos domiciliarios. 19
Figura 2.4: Recorrido del circuito general de recolección. 22
Figura 2.5: Zonas de recolección de la comuna de La Reina. 24
Figura 2.6: División de la Zona 1, en 6 sectores de recolección. 24
Figura 2.7: Camión 462, sector A, Vuelta 1 27
Figura 2.8: Camión 462, Zona A, vuelta 2. 28
Figura 2.9: Camión 464, Zona A, Vuelta 1. 28
Figura 2.10: Camión 464, Zona A, Vuelta 2. 29
Figura 2.11: Camión 908, Zona A, Vuelta 1. 29
Figura 2.12: Camión 908, Zona A, Vuelta 2. 30
Figura 2.13: Camión 910, Zona A, Vuelta 1. 30
Figura 2.14: Camión 910, Zona A, Vuelta 2. 31
Figura 2.15 : Camión 911, Zona A, Vuelta 1 31
Figura 2.16: Camión 911, Zona A, Vuelta 2. 32
Figura 2.17: Camión 912, Zona A, Vuelta 1. 32
Figura 2.18: Camión 912, Zona A, Vuelta 2. 33
Figura 5.1: Capacidad en toneladas utilizada por camión. 47
Figura 5.2: Tasa de utilización en porcentaje. Carga promedio v/s Capacidad máxima. 47
Figura 5.3: Nueva Sectorización para el área estudiada de la comuna de La Reina. 49
Figura 5.4: Ejemplo de distribución de parámetros para la solución de GAP. 52
Figura 5.5 Ilustración ejemplo de variables contenidas en un arco. 53
Figura 5.6: Áreas delimitadas para cada uno de los dos cluster formados, en base a los resultados del modelo GAP. 56
Figura 5.7: Ejemplo de transformación de CARP a CVRP. 57
Figura 5.8: Representación del recorrido del primer cluster. 60
Figura 5.9: Representación del recorrido del segundo cluster. 61
Figura 5. 10: Comparación de parámetros diarios afectos a la variables de kilómetros recorridos. 62

Lista de Tablas

Tabla 2.1: Detalle de los camiones recolectores, La Reina noche. 20
Tabla 2.3: Distancias y tiempos del recorrido general. 23
Tabla 2.4: Cantidad de RSD recolectados por camión y día (Kilogramos). 25
Tabla 2.5: Tiempo en recolectar RSD por camión y día (Horas). 26
Tabla 2.6: Distancias en metros recorridas por vuelta. 33
Tabla 2.7: Redimiendo (Kilogramos/Metro - Hora/ Metro) en cada sector. 34
Tabla 2.8: Promedio de kilómetros recorridos por día, desde agosto 2015 – Marzo 2017. 35
Tabla 2.9: Promedio Jornada laboral La Reina, desde agosto 2015 – Marzo 2016. 35
Tabla 2.10: Costos en millones de pesos del proceso de recolección mensual y anual. 36
Tabla 5.1: Área en m^2 de trabajo de cada vehículo recolector en metros cuadrados. 48
Tabla 5.2: Cálculo del área de las nuevas zonas de trabajo..... 49
Tabla 5.3: Comparación de metros recorridos y kilogramos recogidos entre la distribución actual y la propuesta. 50
Tabla 5.4: Asignación de puntos de recogida a cada vehículo. 55
Tabla 5.5: Validación resultados de asignación. 55
Tabla 5.6: Secuencia de recorrido por cada cluster. 60
Tabla 5.7: Distancias recorridas, en el proceso de recolección del sector 464, con cada aplicación de solución. 61
Tabla 5.8: Comparación de tiempos entre las soluciones propuestas y su porcentaje de ahorro 63
Tabla 5.9: Comparación de costos entre las soluciones propuestas y el ahorro obtenido. 63
Tabla 6.1: Comparación de parámetros en las situaciones de solución propuestas. 64
Tabla 6.2: Kilómetros y tiempos productivos e improductivos. 65
Tabla 6.3: Comparación de balance operativo, en millones de pesos, entre situación actual y macroruteo..... 66
Tabla 6.4: Comparación de parámetros entre las soluciones de maro y micro ruteo en el sector del vehículo 464. 67
Tabla 6.5: Estimación de kilómetros y tiempos de cada vehículo con las aplicaciones del modelo de solución. 68
Tabla 6.6: Estimación de costos en cada vehículo con las aplicaciones del modelo de solución. 68
Tabla 6.7: Comparación de balance operativo entre situación actual, macroruteo e implementación de optimización de ruta en millones de pesos. 69

Índice

Agradecimientos 2
Lista de Figuras 3
Lista de Tablas 4
Resumen 8
Introducción 10
Capítulo 1: DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA 11
1.1. Aspectos Generales 11
1.1.1. Misión 11
1.1.2. Visión 11
1.2. Análisis del Sector 12
1.3. Servicios Ofrecidos 13
1.3.1. Servicios Domiciliarios 13
1.3.2. Servicios Industriales 14
1.4. Organigrama 14
Capítulo 2: SITUACIÓN ACTUAL 16
2.1. Localización de la Zona de Estudio 16
2.2. Descripción del Proceso de Recolección 18
2.3.1. Equipos de Recolección 20
2.3.2. Horarios y Personal 20
2.3.3. Método de Control 21
2.4. Recorridos del Proceso de Recolección 21
2.4.1. Circuito General Recorrido 22
2.5. Macrorutas Actuales 23
2.6. Microrutas Actuales 27
Recorrido del Camión 462: 27
Recorrido del Camión 464: 28
Recorrido del Camión 908: 29
Recorrido del Camión 910: 30
Recorrido del Camión 911: 31
Recorrido del Camión 912: 32

2.7. Planteamiento del problema 34
2.7.1. Rutas irregulares 34
2.7.2. Horarios de trabajo 35
2.7.3. Costos del proceso de recolección 36
2.8. Objetivos 37
Objetivo General 37
Objetivos específicos 37
Capítulo 3: MARCO TEÓRICO 38
3.1. Macroruteo 38
3.2. Microruteo 39
3.3. Problema de Ruteo por Arcos 39
3.4. Métodos de Solución 40
Capítulo 4: METODOLOGÍA 43
4.1. Macroruteo 43
a) Proyecto de gabinete 43
b) Ajuste de campo 43
4.2. Microruteo 43
a) Definición del tipo de problema de ruteo que presenta el caso de estudio 43
b) Elección del modelo de solución 44
c) Construcción del modelo CARP 44
d) Programación del modelo GAP 44
e) Transformación de una red de CARP a una ACVRP 44
f) Programación del modelo TSP 45
g) Validación de resultados 45
h) Análisis de costos 45
Capítulo 5: APLICACIÓN METODOLOGÍA 46
5.1. Macroruteo 46
5.2. Microruteo 50
5.3. Modelo de Asignación Generalizada 51
5.4. Programación del Problema de Asignación Generalizada (GAP) 53
5.5. Resultados del modelo GAP 55

5.6. Transformación de una red de CARP a una ACVRP 56
5.7. Programación del Problema del Agente Viajero. 57
5.8. Modelo Matemático de un TSP 58
5.9. Pseudocódigo para la programación del modelo TSP 59
5.10. Resultados del modelo TSP 60
Capítulo 6 : ANÁLIS DE RESULTADOS 64
6.1. Validación de Resultados 64
6.2. Análisis de Costos y Resultados 66
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 71
ANEXOS 73
Anexo 1: Representación de los 96 puntos de parada del primer sector o primera vuelta del vehículo 464. 73
Anexo 2: Representación de los 43 puntos de parada del segundo sector o segunda vuelta del vehículo 464. 74
Anexo 3: Representación de los 67 puntos de parada del sector del vehículo 912 que se adhiere al sector del vehículo 464. 75
Anexo 4: Relación de costos de clientes Ci con clientes semilla Sj (Input modelo GAP). 76
Anexo 5: Matriz de distancias entre todos los nodos (esquinas) cluster 1. 77
Anexo 6: Matriz de distancias entre todos los nodos (esquinas) cluster 2. 78
Bibliografía 81

Resumen

El siguiente trabajo describe un modelo para resolver el problema de enrutamiento en el proceso recolección de residuos sólidos domiciliarios mediante una flota de camiones con una capacidad limitada. El problema es considerado como un Problema de Ruteo de vehículos Capacitados sobre Arcos (CARP) para el cual, se propone una solución heurística de asignación generalizada de Fisher & Jaikumar que consta de dos fases: primero agrupar – segundo rutear.

La primera etapa de trabajo es resolver el macroruteo, o sectorización de las zonas para luego, aplicar la heurística de solución en el sector de un vehículo representativo.

La primera fase de la heurística es agrupar las paradas según la cantidad de kilogramos de basura en cada una de ellas, las distancias entre estas paradas y el punto de partida y la capacidad de compactación del vehículo, para resolverlo por medio el modelo GAP (Problema de asignación generalizada). Luego se procede con la segunda fase donde diseña la ruta que debe recorrer el vehículo en cada cluster o grupo formado por medio del modelo de ruteo TSP (Problema de ruteo de vehículo). Este procedimiento tiene como objetivo minimizar la distancia recorrida en el proceso, reduciendo costos asociados y tiempos implicados.

PALABRAS CLAVE: problema de ruteo de vehículos capacitados; heurística; asignación generalizada; recolección de residuos.

Abstract

The following work describes a model to solve the problem of routing in the process of collecting solid waste by means of a fleet of trucks with a limited capacity. The problem is considered as a Problem of Routing of vehicles trained on Arcs (CARP) for which, it proposes a heuristic solution of generalized allocation of Fisher & Jaikumar that consists of two phases: first group - second route.

The first stage of work is to solve the macroruteo, or sectorization of the zones to then apply the solution heuristics in the sector of a representative vehicle.

The first phase of the heuristic is to group the stops according to the amount of kilograms of garbage in each of them, the distances between these stops and the starting point and the compaction capacity of the vehicle, to solve it by means of the GAP model (Problem of generalized allocation). Then proceed with the second phase where you design the route that the vehicle must travel in each cluster or group formed by means of the TSP routing model (vehicle routing problem). This procedure aims to minimize the distance traveled in the process, reducing associated costs and time involved.

KEY WORDS: problem of routing of trained vehicles; heuristic; generalized allocation; residue recolection.

Introducción

El crecimiento económico y el aumento acelerado de la población de los últimos años, ha conducido a un incremento en la generación de residuos sólidos urbanos y por consecuencia transformando el proceso logístico de recolección cada vez en un proceso más complejo.

La generación de residuos a nivel nacional ha ido aumentando progresivamente. Sólo de residuos sólidos, en el año 2009 fueron generadas cerca de los 19,6 millones de toneladas, 6,5 millones de toneladas correspondieron a residuos municipales, mientras que los 10,4 millones de toneladas restantes correspondieron a residuos industriales (Primer Reporte sobre Manejo de Residuos Sólidos en Chile, elaborado en 2010 y que aún no presenta actualización).

La recolección de residuos sólidos domiciliarios es un servicio de importancia que es realizado periódicamente y la gestión de estos puede alcanzar costos involucrados que pueden llegar a alcanzar un 80% del presupuesto total de una ciudad o comuna, ya que el servicio es de responsabilidad de las municipalidades.

Ante esta situación es que se propone en este trabajo, entregar una solución a un problema de planificación de ruta presente en una empresa dedica a la gestión de residuos sólidos domiciliarios.

Dimensión s.a realiza el servicio de recolección de residuos sólidos urbanos en varias comunas del país y aunque, reconoce que la distribución de rutas es un elemento fundamental dentro de la operación, actualmente asigna esta responsabilidad a los choferes de los vehículos recolectores. Que los choferes tengan la responsabilidad de planificar las rutas de recolección, por medio de la intuición o por medio de la experiencia, provoca que los vehículos recolectores recorran grandes distancias, lo que aumenta el tiempo de trabajo más aún, cuando el vehículo debe transitar varias veces por las mismas zonas. Estos efectos indeseados desencadenan que el proceso de recolección de basura adquiera un alto costo en transporte y mano de obra.

La solución propuesta es diseñar el recorrido de los vehículos recolectores, a través de un método de dos fases, que consta de agrupar primero y luego rutear. Este método resuelve problemas de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidades, con el objetivo de minimizar el recorrido que deben realizar los vehículos recolectores en el proceso de recolección.

Capítulo 1: DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

En este capítulo se presentan los antecedentes generales de le empresa, un análisis del sector y posicionamiento de la empresa en donde se basa el presente trabajo de título, junto con los servicios de recolección que se ofrecen y el organigrama del proceso de recolección de residuos sólidos domiciliarios.

1.1. Aspectos Generales

Dimensión S.A. es una empresa del rubro de servicios de aseo, dedicada a la recolección, transporte y disposición de residuos sólidos domiciliarios e industriales desde el 30 de septiembre del 2003, integrante del Consorcio Santa Marta, ubicando en San Bernardo, Santiago de Chile su casa central, siendo el centro de administración y operación.

1.1.1. Misión

"Otorgar a nuestros clientes y a la comunidad una solución moderna y ambientalmente sustentable, en los Servicios de Recolección, Transporte, Manejo y Tratamiento de Residuos Sólidos. Nos basamos en valores fundamentales como la responsabilidad, puntualidad, conocimiento, recursos y experiencia profesional, y en el cumplimiento de las normativas vigentes para asegurar la mejor calidad en la entrega de servicios, con altos estándares ambientales y la mejora continua mediante la inclusión constante de nuevas tecnologías".

1.1.2. Visión

"Ser una empresa líder en el desarrollo ambiental de proyectos de Manejo y Tratamiento de Residuos Sólidos, manteniendo una actitud proactiva al servicio de nuestros clientes y de la comunidad. Así como abarcar parte importante del mercado nacional y entrar en forma gradual a otros países de América Latina".

En la actualidad, el capital social de la empresa ha crecido de $30 millones a $6 mil millones, conformada por más de 3 mil colaboradores, cuenta con una flota de más de 500 camiones y equipos, los que realizan las labores de recolección, barrido de calles y limpieza de ferias libres, atendiendo así, a cerca de 3 millones de habitantes a lo largo del país, recolectando cerca de 94 mil toneladas mensuales de residuos sólidos domiciliarios.

La empresa entrega sus servicios en las comunas de Cerrillos, La Florida, Maipú, Estación central, Lo Espejo, San Bernardo, La Cisterna, El Bosque, Santiago Centro, San Joaquín, Peñalolén, La reina, Las Condes y Huechuraba, además de residentes de las ciudades de Chillan, Curicó, Concepción, Linares, Chiguayante, Cauquenes, Chillan viejo y Constitución.

1.2. Análisis del Sector

Según el Primer reporte del manejo de residuos sólidos en Chile (CONAMA, 2010) entre los años 2000 y 2009 se presentó un crecimiento anual, a nivel país, de residuos municipales cercano al 2,5%. Este crecimiento es provocado por el aumento de la población y el incremento del nivel de vida, lo que desencadena que de los 326 kg de residuos domiciliarios generados por habitante el 2000, se aumente a 384 kg por habitante el 2009.

En una publicación del mercurio del 3 de marzo del 2015, se indica que el 2014 se alcanzaron los 572,4 kilos per cápita, además se indica que en total los 52 municipios de la región metropolitana generaron 3.920.021 toneladas el año 2014, la mayor cantidad de la historia, lo que equivale a unos US$317 millones en gastos en transporte y depósito anules.

El mercado de la basura, tal como lo dice una publicación titulada: "El mapa de Chile del millonario negocio de la basura" (2015) es un negocio millonario, ya que más de $6 mil millones mensuales suman los recursos destinados a pagar los servicios de recolección de basura de las capitales regionales y de las comunas del Gran Santiago. En total, cada año se transfieren cerca de $73 mil millones a las empresas que se hacen cargo de los residuos en los 48 municipios estudiados.

La externalización del servicio de recogida de residuos sólidos, por parte de las municipalidades, el crecimiento de la demanda y la poca competencia, generan que el área de servicio de recolección de residuos sea un mercado creciente y lucrativo.

En el área de servicio de recolección se pueden encontrar cerca de 15 empresas o personas naturales que entregan este servicio, pero son solo 2 las empresas que trabajan para la región metropolitana y un total de 3 que tienen la mayor presencia a nivel país, estas son: Dimensión, Starco y Demarco, las que tienen la mayor participación en la capital y Cosemar que tiene participación en la V región.

Según estudios realizados por CIPER en el año 2015, Dimensión S.A tiene la mayor participación en el mercado, obteniendo hasta la fecha de publicación, licitaciones con 13 comunas por las que recibe un total de $15.613 millones al año, aumentando su capital de $30 millones a $6 mil millones hasta ese año. El segundo lugar es ocupado por Starco y Demarco (Grupo KDM) el cual presta servicio en 11 comunas, por las cuales recibe anualmente alrededor de $18.704 millones. Y en tercer lugar se encuentra Cosemar S.A. que a diferencia de las dos empresas anteriores que operan principalmente en la región metropolitana, esta tiene presencia solo en 3 regiones, Iquique, Copiapó y Valparaíso obteniendo de estos contratos ingresos anuales por $6.505 millones.

Dimensión S.A es una empresa que tiene como estrategia genérica, la estrategia de bajo costo. Esto permite que aumente su cuota de participación en el mercado por medio de la adjudicación de licitaciones, gracias a que es la que ofrece valores inferiores en comparación con las otras empresas del rubro. Incluso en ocasiones, igualando el precio de referencia que entregan los municipios, precio que está presupuestado a pagar por tonelada retirada.

1.3. Servicios Ofrecidos

La empresa Dimensión S.A. entrega los siguientes servicios bajo los estándares de calidad de la norma ISO 9001-2008:

1.3.1. Servicios Domiciliarios

El servicio domiciliario es un servicio contratado por los municipios el cual consiste, principalmente, en la recolección de residuos domésticos, por medio de camiones compactadores, que recorren cada una de las comunas, en promedio 3 veces por semana. Adicionalmente la empresa entrega servicios de barrido de calles manual y mecanizado y de limpieza y lavado de ferias libres a modo de complementar el servicio de aseo.

Los clientes que contratan el servicio domiciliario son las municipalidades, principalmente en la región metropolitana donde tiene presencia en 14 comunas. Algunos de sus clientes son los siguientes:

1.3.2. Servicios Industriales

El servicio industrial es un servicio contratado por empresas privadas para el retiro de residuos prevenientes de procesos industriales, por medio de una flota de camiones y equipos que cuentan con la autorización sanitaria para el transporte de residuos industriales no peligrosos, asimilables o domiciliarios, lodos deshidratados, residuos peligrosos, entre otros. Además, se entregan contenedores diseñados de acuerdo a los requerimientos de los clientes los cuales una vez llenos, al 90% de su capacidad, serán retirados con previo aviso de estos.

Los principales clientes de los servicios industriales entregados por Dimensión S.A son los siguientes:

1.4. Organigrama

La gestión de transporte de los residuos sólidos domiciliarios se realiza en el área de operaciones de la empresa, a cargo del Director de Operaciones y Mantenimiento como lo muestra la Figura 1.1. Esta área es la encarga de planificar, gestionar y ejecutar el proceso de recolección de los residuos sólidos.

El grupo Analistas de Planificación y Proyectos, color naranjo en la Figura 1.1, es un área relativamente nueva en la empresa, ya que fue conformada a principios del 2015. Este departamento fue creado por la necesidad de contar con información relevante para la toma de decisiones de mejoras y control sobre todas las áreas que están bajo la jerarquía del Director de Operaciones y Mantenimiento. Las funciones de este departamento son evaluar procesos, encontrar problemáticas y deficiencias en los procesos realizados con el fin de analizar de datos, plantear opciones de soluciones y mejoras a las problemáticas encontradas.

El departamento de operaciones, color verde en la Figura 1.1, que está encabezado por el Gerente de Operaciones y Jefe de Operaciones, son los que se encargan de gestionar el proceso de recolección y que las labores en terreno realizadas por Supervisores, Choferes y Auxiliares se efectúen.

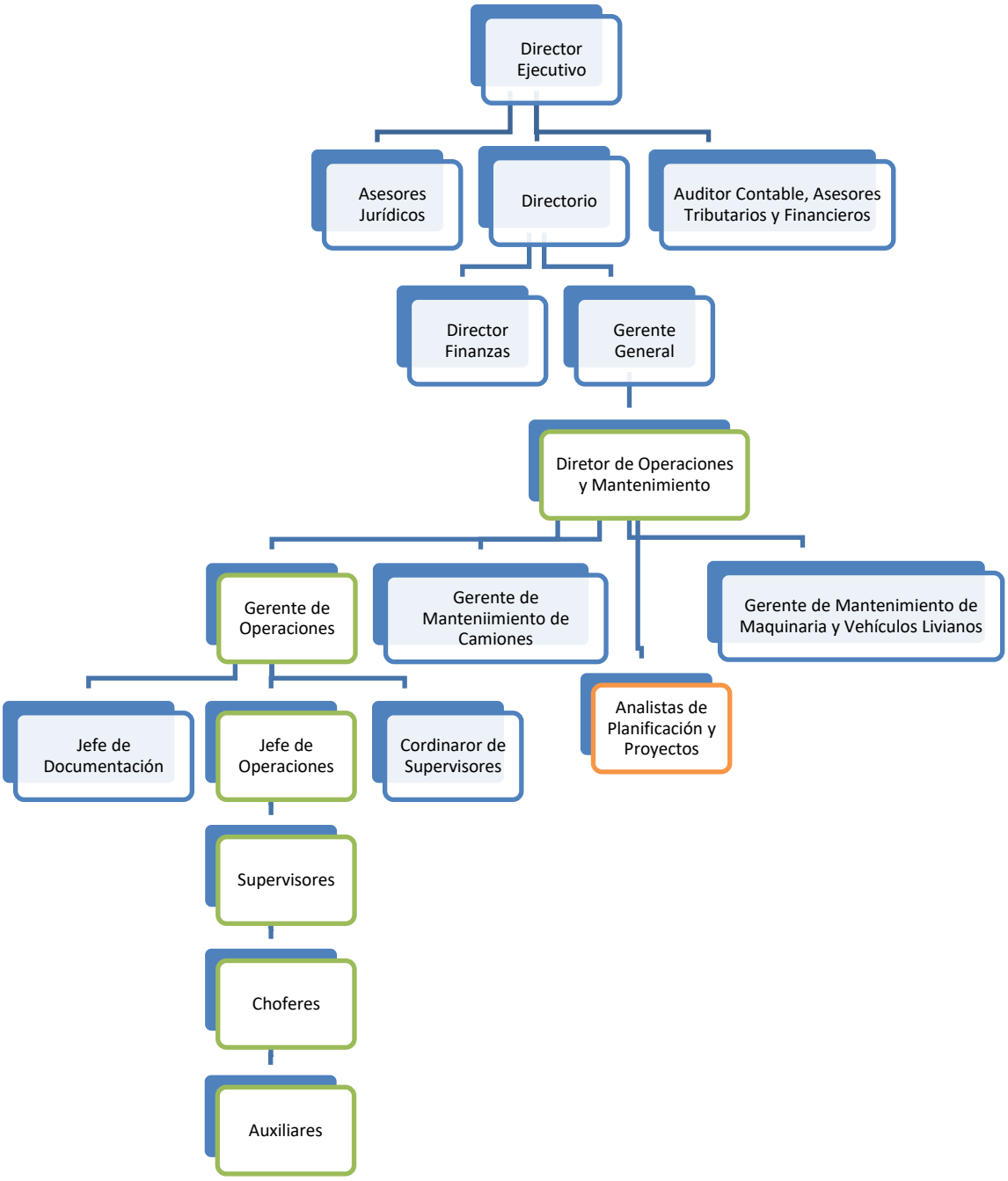


Figura 1.1: Organigrama Dimensión S.A. proceso de recolección de residuos domiciliarios.
Fuente: Elaboración Propia.

Capítulo 2: SITUACIÓN ACTUAL

En este capítulo se expone la locación en donde se centra el presente trabajo, junto con la descripción del sistema de manejo de residuos sólidos desde el proceso de recolección de residuos sólidos domiciliarios, el equipo, horarios y personal para efectuar la recogida de basura, además del método de control y el recorrido general que debe recorrer la flota a diario.

También en este capítulo se describen los datos de las áreas de trabajo, de los kilómetros recorridos, la cantidad de basura recogida y los tiempos de trabajo. Con esta información es con la cual se plantea el problema encontrado y el objetivo de este trabajo.

2.1. Localización de la Zona de Estudio

La Comuna de La Reina se encuentra ubicada en el sector nororiente de la ciudad de Santiago, Región Metropolitana. Sus límites urbanos son al norte y al este con Las Condes, al sur con Peñalolén y al oeste con Providencia y Ñuñoa. La Comuna tiene un total de 23,4 kms , todos los cuales son considerados como terrenos urbanos. El área de La Reina representa el 1.15% del territorio de la Provincia de Santiago (2.030 kms) y el 0,15% de la superficie total de la Región Metropolitana (15.403 km). La comuna cuenta con una población, según el censo del 2012, de 96.762 habitantes.

Tal como muestra la Figura 2.2 los límites específicos de la comuna son los siguientes:

- Norte: Avenida Francisco Bilbao, desde el Canal San Carlos hasta el Canal Las Perdices, desde Avenida Francisco Bilbao hasta Calle Valenzuela Puelma, desde el Canal Las Perdices hasta su intersección con las Calles Onofre Jarpa y Álvaro Casanova.

- Sur: La Calle Talinay y su prolongación en línea recta, desde el Canal de Las Perdices, hasta la Línea de Altas Cumbres; Canal Las Perdices desde Calle Talinay hasta Avenida José Arrieta; y Avenida José Arrieta, desde el Canal Las Perdices hasta Avenida Egaña.

- Este: La Línea de Cumbres que limita por el norte la hoya de la Quebrada de Ramón, desde la intersección de las calles Valenzuela Puelma, Onofre Jarpa y Álvaro Casanova, hasta la prolongación en línea recta de la Calle Talinay.

- Oeste: Avenidas Egaña y Ossa, desde Avenida José Arrieta hasta el Canal San Carlos y Canal San Carlos entre Avenida Ossa y Avenida Francisco Bilbao.

Figura 2.1: Territorio de la comuna de La Reina.
Fuente: Elaboración Propia.

En el primer reporte de manejo de residuos de chile (CONAMA 2010) se estimaba que la generación de RSD en el año 2009 para la comuna de La Reina era de 42.525 toneladas/año representando eso el 1,5% de lo generado ese mismo año a nivel regional el cual era de 2.807.247 toneladas/año

Tal como se muestra en la Figura 2.2 comuna está posicionada a nivel regional dentro de una de las que produce menos cantidad de residuos domiciliarios, estando dentro del rango de las que producen entre 0 – 60.000 ton/año como se presenta a continuación.

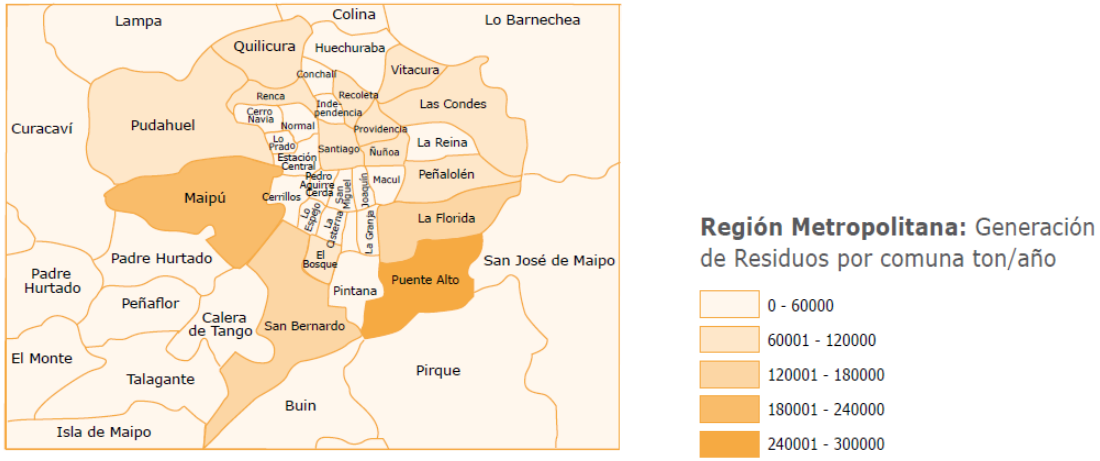


Figura 2. 2: Generación de residuos en la región metropolitana.
Fuente: Primer reporte de manejo de residuos de chile. (CONAMA 2010).

Debido a la cercanía de la comuna con la pre-cordillera, la baja densidad poblacional y la gran cantidad de arborización y zonas verdes, sumado a que es una de las comunas precursoras en la región metropolitana en construir y trabajar en zonas de puntos limpios, dentro de las 14 comunas que utilizan este sistema de reciclado, la comuna de La Reina es una de las comunas más descontaminadas y una de las que genera menor cantidad de basura domiciliaria en la Provincia de Santiago.

2.2. Descripción del Proceso de Recolección

En Dimensión S.A el proceso de recolección de residuos domiciliarios se realiza mediante el método de acera, es decir, el camión debe recorrer todas las calles de la zona recogiendo los residuos que son generados por labores domésticas y depositados en la calzada de la comuna.

En la Figura 2.3 se describe el proceso de recolección de residuos que es efectuado por los camiones. Este se detalla a continuación:

1. El proceso inicia con la salida de los camiones desde la base central de la empresa, en dirección a sus respectivas zonas de trabajo. La base central está ubicada en Santa Margarita, San Bernardo, Santiago de Chile, es desde este sector donde inician su recorrido los vehículos recolectores en dirección a la comuna de La Reina.

2. Cuando el camión recolector ya se encuentra en la comuna, este se dirige directamente al sector que le corresponde para realizar el proceso de recogida de residuos sólidos domiciliarios, ya que la comuna se divide en zonas. Ya en el sector, se da paso al proceso de recolección en donde el personal de aseo levanta y recoge bolsas, cajas, basureros, etc. para agruparlas en un sector y arrojarlas al interior del camión, donde se va compactando la basura. Este ejercicio de recoger la basura y depositarla dentro del camión se repite en todo el recorrido por las calles hasta que la caja compactadora se colma de residuos.

3. Una vez colmada la caja compactadora, evento que sucede cuando el camión está transportando cerca de 14 a 16 toneladas de residuos, según su capacidad, el vehículo debe retirarse de la zona de trabajo y dirigirse a la planta de trasferencias de residuos sólidos que tiene contrato con la comuna en donde está efectuando la labor de recogida, con el fin de vaciar todo el contenido de basura transportada por el camión de recolección en dicho lugar.

   Las municipalidades, clientes de Dimensión S.A, tienen contratos con las plantas de transferencias de Santa Marta, Santiago Poniente y KDM. En el caso de la comuna de La Reina, los camiones deben dirigirse a KDM ubicada en la comuna de Quilicura.

4. Con la caja compactadora vacía el camión tiene la opción de reanudar el proceso de recolección, continuando con la zona predeterminada o volver a la base central. Las

opciones dependen exclusivamente de si en el primero viaje de trabajo se recorre y se recoge la totalidad de los residuos del sector o no.

5. El proceso termina cuando se ha recolectado la totalidad de los residuos, ya sean en una o más vueltas, entendiendo por número de vuelta la cantidad de veces que el camión hace los procesos de recogida y vaciado explicados anteriormente. Con el camión vacío y sin que falte ningún lugar del sector por recolectar, este se dirige a base central, para ser estacionado y guardado en aquel lugar.

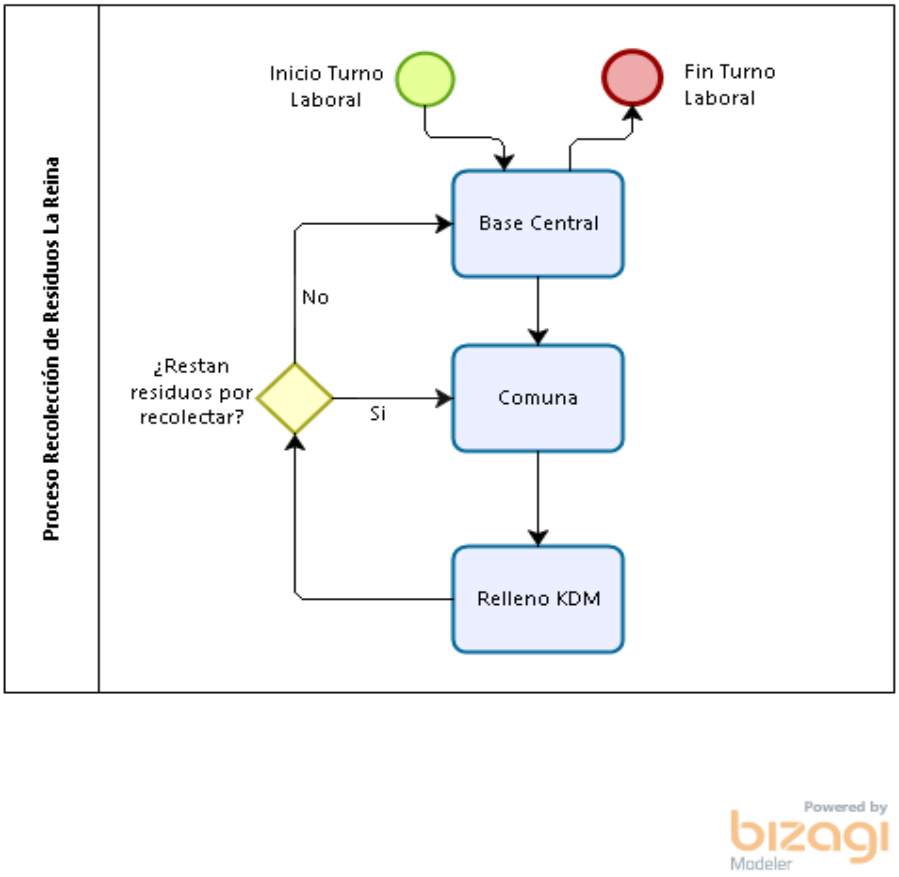


Figura 2.3: Proceso de recolección de residuos sólidos domiciliarios.
Fuente: Elaboración Propia.

2.3.1. Equipos de Recolección

El proceso de recolección de residuos sólidos se ejecuta con 6 vehículos de propiedad privada de la empresa. El detalle de la flota se muestra en la Tabla 2.1, que presenta los numero de los camiones que recolectar la comuna de La Reina, la carca del vehículo y de la caja compactadora que está ubicada en la parte trasera del vehículo recolector, la cual tiene una capacidad máxima de 14 toneladas de residuos domiciliarios

N° Camión	Marca de Vehículo	Capacidad (Ton)	Marca de Caja Compactadora	Comuna de trabajo	Propiedad
462	Ford	14	HEIL PILAR	LA REINA NOCHE	Dimensión
464	Ford	14	HEIL PILAR	LA REINA NOCHE	Dimensión
908	Ford	14	HEIL PILAR	LA REINA NOCHE	Dimensión
910	Ford	14	HEIL PILAR	LA REINA NOCHE	Dimensión
911	Ford	14	HEIL PILAR	LA REINA NOCHE	Dimensión
912	Ford	14	HEIL PILAR	LA REINA NOCHE	Dimensión

Tabla 2.1: Detalle de los camiones recolectores, La Reina noche.
Fuente: Archivo flota maestra, Dimensión S.A.

2.3.2. Horarios y Personal

La comuna de La Reina cuenta con personal que es exclusivo para la comuna, en donde trabajan en total 31 personas, 1 Supervisor de la comuna, 6 Choferes de camiones recolectores y 24 auxiliares de aseo, los cuales de dividen en grupos de 4 personas por camión. Los conductores deben presentarse en la base central a las 19:00 horas (horario estándar), para dar inicio a la jornada laboral. Los vehículos se dirigen en dirección a la comuna cerca de las 19:17 horas en promedio, para estar el punto de recolección, a lo más tardar, a las 20:00 horas.

En el caso de auxiliares, estos pueden esperar en el sector de recolección correspondiente o partir en el camión desde la base central, según sea la comodidad de cada uno de los auxiliares. Cualquiera sea el caso, el auxiliar debe estar a las 19:00 horas a disposición del trabajo. En el caso en que llegan directamente a la comuna, el auxiliar debe comenzar con la agrupación de la basura para adelantar trabajo. El horario de trabajo en promedio se extiende hasta cerca de las 05:00 horas del día siguiente, cuando el proceso de recolección es realizado en su totalidad, y el camión llega a la base central para estacionar y guardar.

2.3.3. Método de Control

El proceso de recolección es vigilado en terreno por el supervisor de la comuna, el cual vela por la correcta recolección de residuos domésticos, porque no quede lugar sin recoger, que los residuos que son recolectados sean domésticos y no escombros ni materiales pesados y de controlar el volumen ocupado por la caja compactadora. Además de realizar la labor de supervisión, también debe llevar el registro de asistencia del personal, solicitando que el chofer del camión y los 4 auxiliares firmen una hoja de ruta, la que al final de la jornada laboral es entregada en la base central al área de digitación de la empresa para ser ingresada al sistema de asistencia de personal. Junto con la hoja de ruta, se entrega una hoja de tonelaje, esta última es entregada por las plantas de transferencias, la que indica el tonelaje que es depositado por el camión en dicho lugar.

La medición de este tonelaje se realiza con una balanza registradora en las plantas de transferencias, la cual registra e indica en la hoja de tonelaje, el peso de cada vehículo a la entrada y a la salida, dando el peso de los desechos ingresados por medio de la diferencia.

Desde la base central, a cargo del área de operaciones se realiza un seguimiento del plan de ruteo, con ayuda del programa de localización por GPS instalados en todos los camiones recolectores y equipos de barrido de calles y limpieza de ferias, donde se muestra la posición del vehículo a tiempo real, la que es actualizada cada 1 minuto.

La plataforma de GPS es una plataforma de visualización de ruta, en donde se puede monitorear la ubicación actual, el recorrido, y los tiempos históricos. Con la información que se encuentra en la plataforma se crea un reporte manual, descargando un archivo Excel con los datos requeridos y especificados en la plataforma, para luego ser procesados y analizados.

La finalidad de este reporte es hacer un análisis de los tiempos de trabajo, controlar el cumplimiento del horario estándar de salida de la base central y llegada a la comuna, calcular tasas de recolección que miden la cantidad de tonelada retirada por hora trabajada, con la inclusión de la información de la hoja de tonelaje a este reporte manual. Este análisis, le permite a la empresa visualizar y cuantificar el funcionamiento del proceso, siendo además una herramienta útil para la toma de decisiones en base a un mejoramiento de la recolección.

2.4. Recorridos del Proceso de Recolección

Para el proceso de recolección de residuos sólidos domiciliarios, todos los camiones deben realizar un recorrido general, que consiste en el recorrido de traslado de los vehículos entre la base central, el lugar de trabajo y la planta de transferencia, y otro especifico que corresponde al recorrido efectivo de trabajo, donde el vehículo está recolectando la basura y compactándola.

2.4.1. Circuito General Recorrido

Los camiones recolectores de la reina, como se ha mencionada anteriormente comienzan el circuito desde la base central ubicada en San Bernardo, para luego dirigirse por medio de la Autopista Vespucio Sur a la comuna de La Reina. Cuando el camión está cargado de residuos se dirige a través de Avenida Tobalaba y Vespucio Norte al lugar de trasferencia de residuos KDM ubicada en Quilicura. Una vez que el camión está vacío, este vuelve hacer el mismo recorrido para dirigirse a la comuna y terminar con la recolección del sector. El vehículo termina el servicio en la comuna y deposita los residuos en KDM, para así volver al punto de inicio del circuito (Lugar de aparcamiento) recorriendo la Autopista Central.

La Figura 2.4 indica los recorridos entre los principales sectores donde A corresponde al sector de base central, punto de inicio y fin del recorrido, B al lugar de recolección y C a la ubicación de la planta KDM.

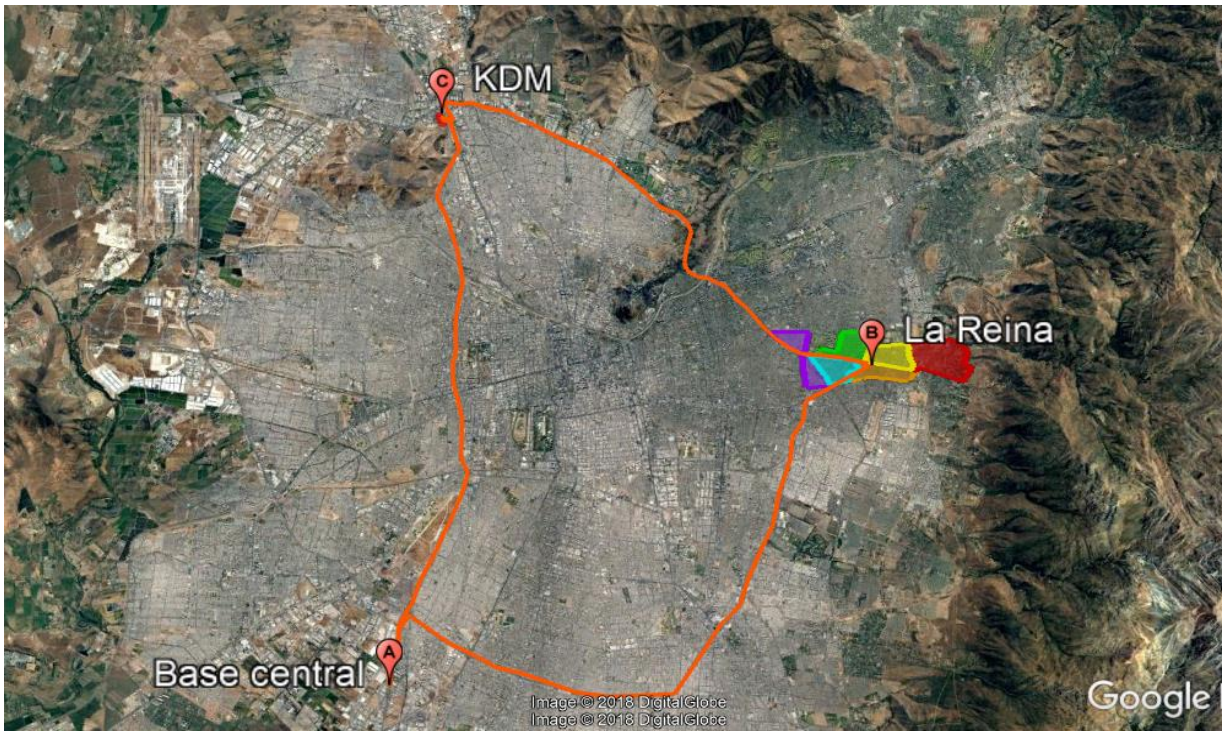


Figura 2.4: Recorrido del circuito general de recolección.
Fuente: Elaboración propia.

Dentro del circuito general los recorridos desde la base central hacia La Reina (A-B) y el de la planta de transferencia KDM hacia la base central (C-A) son realizados una sola vez, en cambio entre los puntos KDM y La Reina (B-C y C-B) los camiones deben transitar tres veces por el mismo recorrido para vaciar las cajas compactadoras, en el primer caso para volver a la

comuna y seguir con la recolección y el segundo caso para volver al lugar de almacenamiento libre de residuos.

Todos camiones recolectores que trabajan en la comuna de La Reina deben realizar el circuito general mostrado en la Figura 2.4 recorriendo las siguientes distancias y tiempos mostrados en la Tabla 2.3 entre cada uno de los puntos:

Recorrido	Desde	Hacia	Distancia (Km)	Tiempo (Min)
1	Base Central	La reina	26,6	00:38
2	La reina	KDM	23,8	00:27
3	KDM	La reina	23,8	00:28
4	La reina	KDM	23,8	00:27
5	KDM	Base Central	24,0	00:23
		Total:	**122,0**	**02:23**

Tabla 2.2: Distancias y tiempos del recorrido general.
Fuente: Elaboración propia.

Los camiones deben iniciar el servicio desde la base central y recorrer 26,6 kilómetros, este recorrido es el que demora más tiempo en comparación a los demás debido a que la hora de salida de los camiones desde la base se hace alrededor de las 19:00 horas, en donde se presenta más congestión vial debido a ser la hora promedio en que la población sale de los trabajos y regresa a sus hogares, lo que hace que el primero recorrido sea más dificultoso que los otros. Los recorridos 2, 3 y 4 corresponden a los recorridos que se deben hacer para trasladar la basura recolectada desde la comuna hacia la planta de transferencia KDM y vaciar el camión, por lo que él solo traslado de la basura, el vehículo recolector debe recorrer la suma de 71 kilómetros demorando, 82 minutos en promedio. Una vez finalizada la recolección y vaciado el camión, este debe volver a la base central, lo que lo hace recorrer 24 kilómetros en un tiempo de 23 minutos en promedio. En total cada uno de los camiones debe transitar en promedio un total de unos 122 kilómetros, lo que se traduce a un tiempo de 2 horas y 23 minutos por el solo concepto de traslado por cada uno de los puntos desde que se inicia el servicio hasta que se termina, sin tomar en cuenta el recorrido especifico que realiza cada uno de los camiones al momento de efectuar la recolección de residuos sólidos.

2.5. Macrorutas Actuales

Los residuos domiciliarios de La Reina son retirados por zonas como se presenta en las Figura 2.5. En el día se recolecta la zona 3A y 3B, y por las noches se recoge la basura de las zonas 1 y 2.

Figura 2.5: Zonas de recolección de la comuna de La Reina.
Fuente: Página web, Municipalidad de La Reina.

La basura de la zona 1 es retirada los días lunes, miércoles y viernes por 6 vehículos recolectores. Cada uno de estos vehículos tiene asignado un sector dentro de la zona, como se muestra en la Figura 2.6 en donde, se aprecia la distribución y el área de trabajo que le corresponde a cada uno de ellos.

Figura 2.6: División de la Zona 1, en 6 sectores de recolección.
Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 2.4 mostrada a continuación, presenta la cantidad en kilogramos de residuos domiciliarios que son recolectados en promedio en cada uno de los sectores, por cada uno de los camiones. A través de ella se puede observar que los días lunes son los días en que se recolecta mayor cantidad de RSD en comparación con los otros dos días de la semana. Los días lunes se recogen el 35% de lo recolectado semanalmente en promedio, ya que se recolecta la basura acumulada desde el día sábado al mismo lunes.

También se puede apreciar en la Tabla 2.4 que independiente del día que sea o el sector en que se esté recolectando, la primera vuelta es la que en general recolecta la mayor cantidad de residuos sólidos domiciliarios, ocupando casi el máximo de las capacidades las cajas compactadoras, en comparación con las segundas vueltas de debe realizar el camión para recolectar el resto del sector.

Cantidades de residuos recolectados en la Zona 1 (kilogramos)

	LUNES			MIÉRCOLES			VIERNES			
Camión	**Vuelta 1**	**Vuelta 2**	**Total**	**Vuelta 1**	**Vuelta 2**	**Total**	**Vuelta 1**	**Vuelta 2**	**Total**	**Promedio por día**
462	11.988	9.851	21.839	10.345	6.729	17.074	10.964	7.979	18.943	19.285
464	12.078	9.876	21.954	12.104	6.299	18.403	11.408	7.194	18.602	19.653
908	10.283	8.539	18.822	9.924	8.239	18.163	10.182	8.478	18.660	18.548
910	10.310	9.092	19.402	11.005	9.702	20.707	10.990	9.693	20.683	20.264
911	10.056	8.495	18.551	9.985	7.123	17.108	10.085	7.225	17.310	17.656
912	9.617	8.943	18.560	9.439	6.844	16.283	9.878	7.692	17.569	17.471
Total:	64.331	54.796	**119.127**	62.801	44.935	**107.737**	63.507	48.260	**111.767**	**112.877**

Tabla 2.3: Cantidad de RSD recolectados por camión y día (Kilogramos).
Fuente: Elaboración propia.

Los datos entregados en la columna “Promedio por día” de la Tabla 2.4, corresponde al promedio de lo recolectado en kilogramos por los tres días en que se visita la zonas 1. En ella puede apreciar que existen diferencias en las cantidades que se recolectan entre los vehículos, demostrando que los sectores de recolección están mal distribuidos provocando, por ejemplo, que entre los camiones 910 y 912 exista una brecha de recolección de 2.8 toneladas al día y 403.2 toneladas anuales. Esto significa que la cuadrilla del camión 910 recibe $786.240 pesos más, que la cuadrilla que trabaja en el camión 912.

Los cálculos mencionados anteriormente corresponden a un ítem dentro de las remuneraciones de los trabajadores llamado “sueldo a trato”, este sueldo a trato corresponde a un pago extra al personal de aseo por cada tonelada recolectada, en el caso de los auxiliares $350 pesos y para los choferes $550 pesos. Estos montos son sumados en la remuneración al sueldo fijo de cada uno de los trabajadores.

El proceso de recolección tiene una duración, tiempo que demora a un vehículo en recolectar la totalidad de residuos domiciliarios en cada uno de los sectores. Tiempo efectivo de proceso que no incluye lo que tarda en desplazarse de la base central a la comuna, de la comuna a la planta de trasferencia, de la planta de transferencia a la comuna y de la planta de transferencia a la base central.

El tiempo que implica recolectar los kilogramos de basura, presentados en las Tabla 2.4, es presentado en la Tabla 2.5. En ella se puede apreciar que los tiempos que demoran los camiones en dar la primera vuelta, es mayor que la que demoran en dar la segunda vuelta.

El fenómeno que se presenta, de que las primeras vueltas, en general, se recolecte más cantidad de kilogramos de basura y que por ende el tiempo sea mayor, es debido a que el personal de aseo intenta en una sola vuelta recolectar las mayor cantidad de residuos sólidos domiciliarios, con la finalidad de reducir las labores de la segunda vuelta.

La Tabla 2.5 por otro lado, demuestra que las distribución de sectores de trabajos, no es balanceada, ya que existen vehículos que tardan más que otros en realizar el proceso de recolección. Como el caso del camión 912, que en comparación al resto de los vehículos es el que menos demora en recoger los residuos en su sector, al contrario del camión 462 que es el que tarda más tiempo en recolectar su sector. Las diferencia de tiempos de recolección pueden llegas a ser de 1 hora.

Tiempo de recolección en la Zona 1 (Horas)

	LUNES			MIÉRCOLES			VIERNES			
Camión	**Vuelta 1**	**Vuelta 2**	**Total**	**Vuelta 1**	**Vuelta 2**	**Total**	**Vuelta 1**	**Vuelta 2**	**Total**	**Promedio por día**
462	04:10	03:22	07:32	04:21	02:33	06:54	04:35	02:50	07:25	07:17
464	03:49	02:54	06:43	04:04	02:12	06:17	03:59	02:31	06:31	06:30
908	03:53	02:37	06:30	04:07	02:30	06:38	04:22	02:42	07:05	06:44
910	03:58	02:58	06:57	03:46	02:56	06:43	04:14	02:50	07:05	06:55
911	03:34	02:21	05:56	03:51	02:21	06:13	03:59	02:37	06:37	06:15
912	03:53	02:29	06:23	03:47	02:18	06:06	04:07	02:20	06:27	06:18
PROMEDIO:	03:53	02:47	**06:40**	04:00	02:28	**06:28**	04:13	02:38	**06:51**	**06:40**

Tabla 2.4: Tiempo en recolectar RSD por camión y día (Horas).
Fuente: Elaboración propia.

A modo general el tiempo promedio total que tardan en recolectar los vehículos sus correspondientes sectores es de 6 horas 40 minutos, tiempo efectivo de trabajo. Si se considera que en traslado en promedio los camiones demoran cerca de 2 horas 20 minutos, se obtiene que en promedio la jornada laboral puede durar cerca de 9 horas, que semanalmente serian 54 horas, 9 horas más de las horas que el código del trabajo indica como jornada laboral ordinaria, 45 horas semanales. Este 20% de horas más trabajadas, son pagadas como horas extras solo a los choferes ya que, los peinetas al momento de terminar el proceso de recolección en su sector finalizan su horario laboral, en cambio el chofer del camión termina su horario laboral cuando

termina el proceso de recolección, se dirige a botar y vuelve a la base, lo que corresponde a $9,7 millones anuales por el total de choferes de la flota.

En resumen, se puede evidenciar que de la manera en que están asignado cada uno de los sectores de trabajo para los vehículos recolectores, se producen diferencias tanto en la cantidad de basura que cada uno de ellos debe recoger, como el tiempo que le lleva a cada uno de ellos recolectar dicha basura. Esto genera que las cargas laborales de las cuadrillas no sea similares, tanto en la cantidad de trabajo que tiene cada uno en su sector como en la jornada laboral que deben cumplir, significando que además de no tener un trabajo equitativo para todos, no hay igualdad a la hora de los pagos por los trabajos realizados

.

2.6.Microrutas Actuales

Cada uno de los vehículos recolectores ejecuta un recorrido para conseguir recolectar la totalidad de los residuos sólidos en su zona correspondiente. El recorrido que se realiza en cada una de las zonas no siempre es exactamente el mismo que el que se efectuó la vez anterior, pero si es semejante, ya que, al no tener una planificación de ruta establecida el chofer por medio de la experiencia en el rubro establece una ruta guía por lo que no se puede conseguir que cada camión recorra de la mismo forma su debida zona en todas las visitas.

A continuación, se presentará el recorrido que realiza cada uno de los camiones en el sector que le corresponde visitar:

Recorrido del Camión 462:

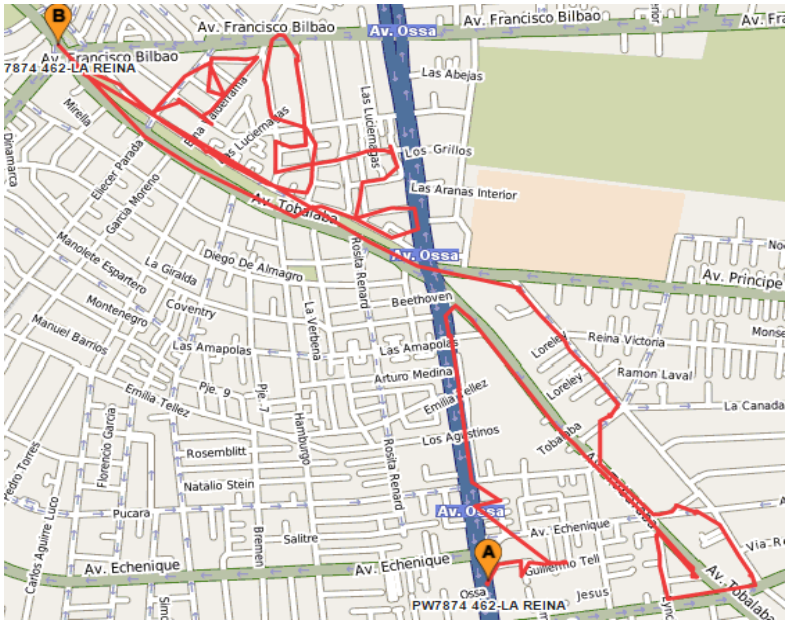


Figura 2.7: Sector 462, Vuelta 1
Fuente: Sitrack, plataforma GPS.

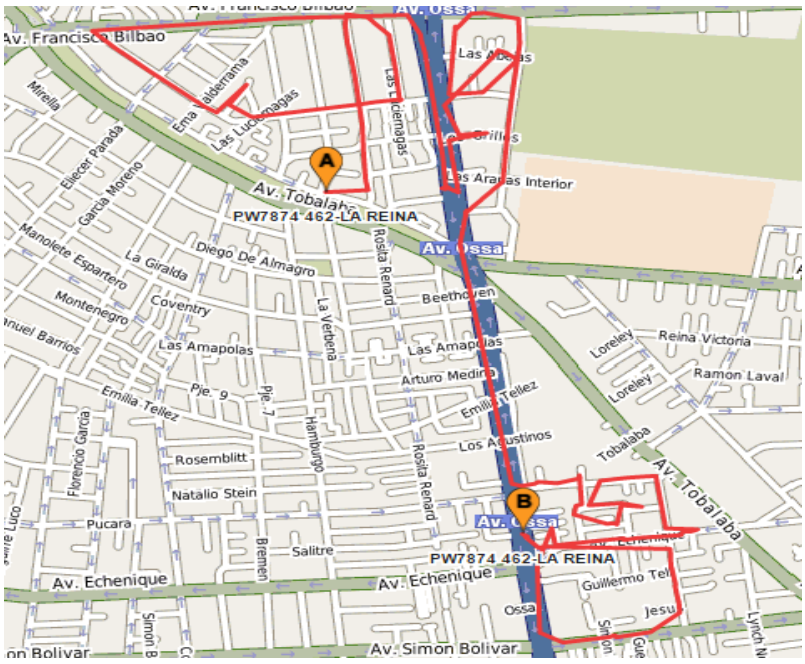


Figura 2.8: Sector 462, vuelta 2.
Fuente: Sitrack, plataforma GPS.

Recorrido del Camión 464:

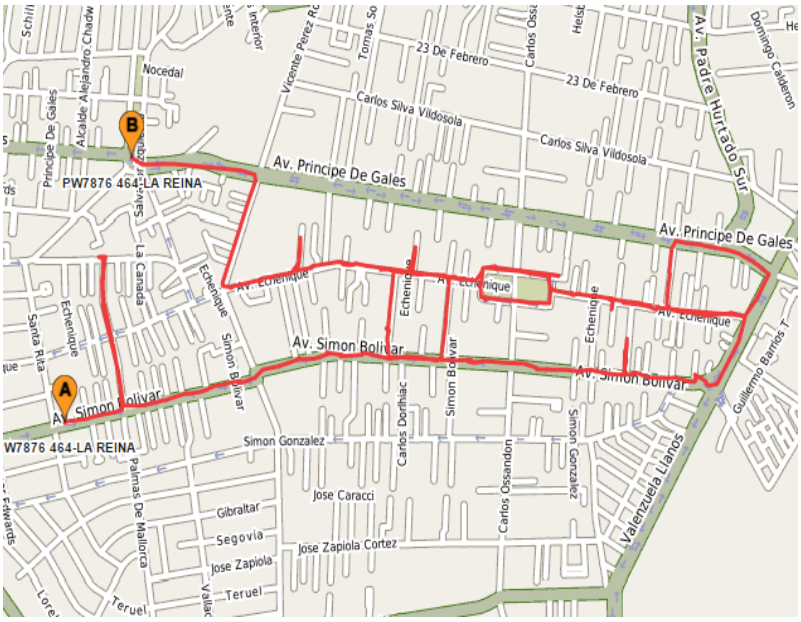


Figura 2.9: Sector 464, Vuelta 1.
Fuente: Sitrack, plataforma GPS.

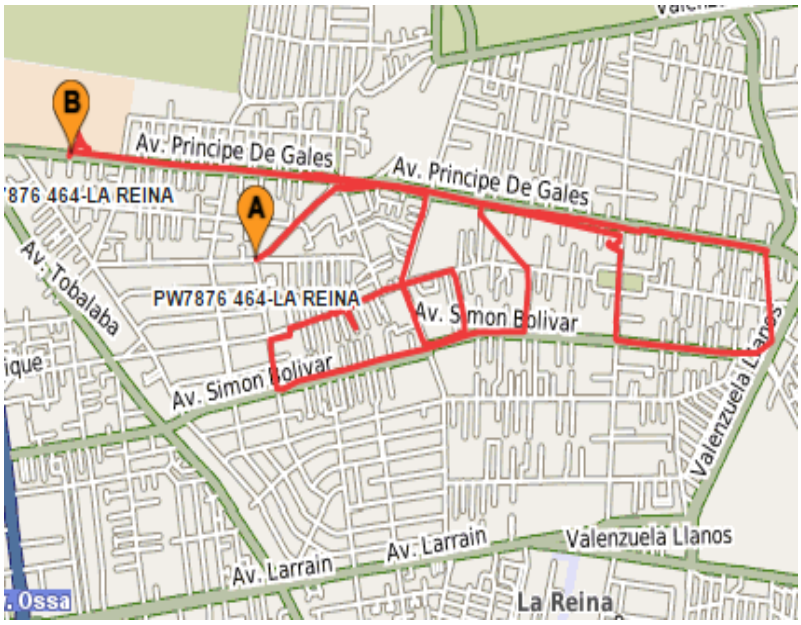


Figura 2.10: Sector 464, Vuelta 2.
Fuente: Sitrack, plataforma GPS.

Recorrido del Camión 908:

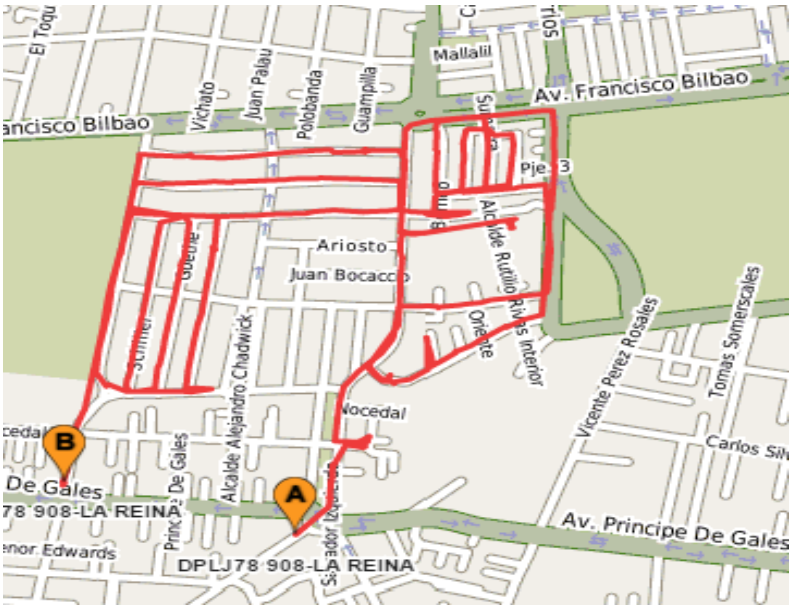


Figura 2.11: Sector 908, Vuelta 1.
Fuente: Sitrack, plataforma GPS.

Figura 2.12: Sector 908, Vuelta 2.
Fuente: Sitrack, plataforma GPS.

Recorrido del Camión 910:

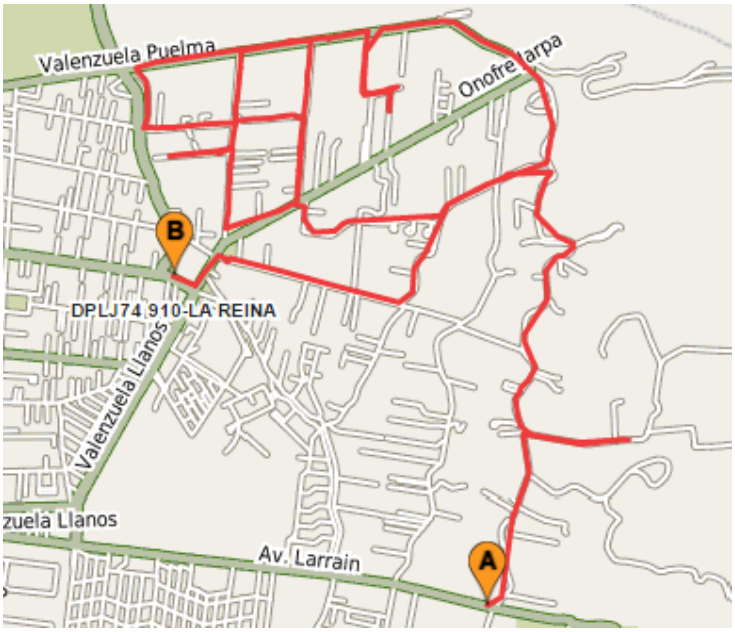


Figura 2.13: Sector 910, Vuelta 1.
Fuente: Sitrack, plataforma GPS.

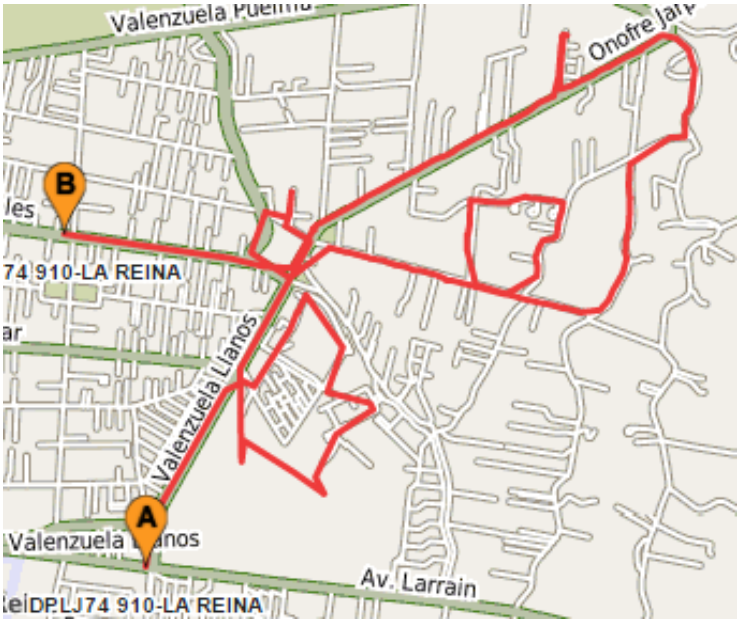


Figura 2.14: Sector 910, Vuelta 2.
Fuente: Sitrack, plataforma GPS.

Recorrido del Camión 911:

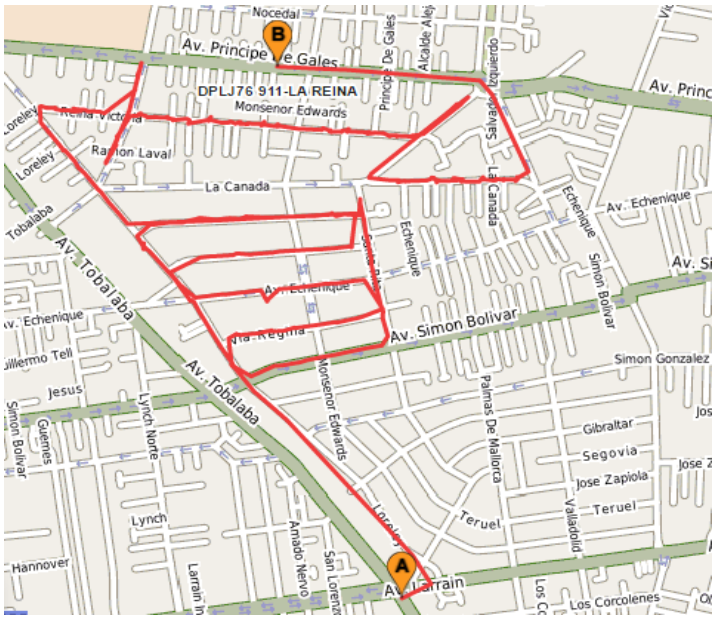


Figura 2.15 : Sector 911, Vuelta 1.
Fuente: Sitrack, plataforma GPS.

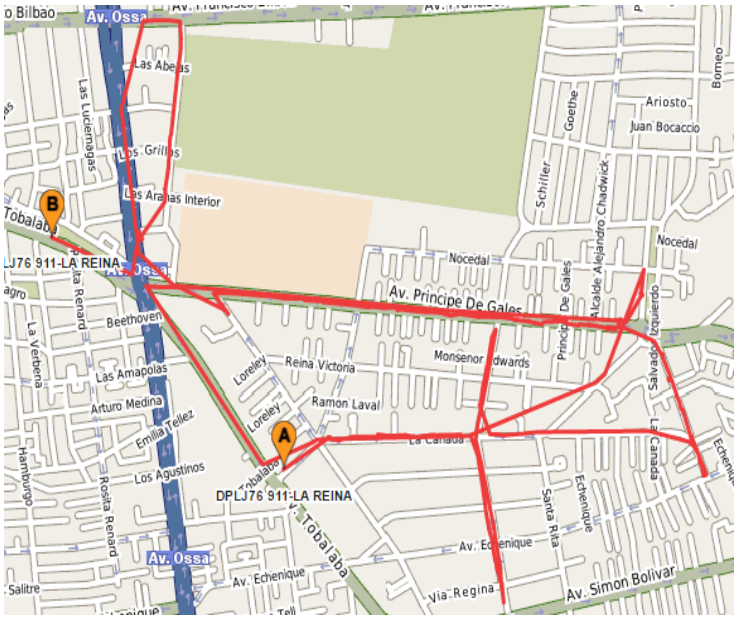


Figura 2.16: Sector 911, Vuelta 2.
Fuente: Sitrack, plataforma GPS.

Recorrido del Camión 912:

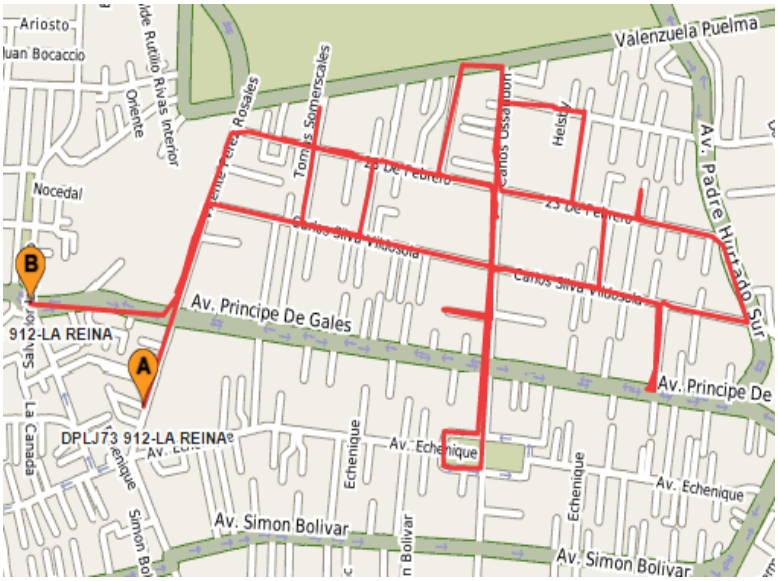


Figura 2.17: Sector 912, Vuelta 1.
Fuente: Sitrack, plataforma GPS.

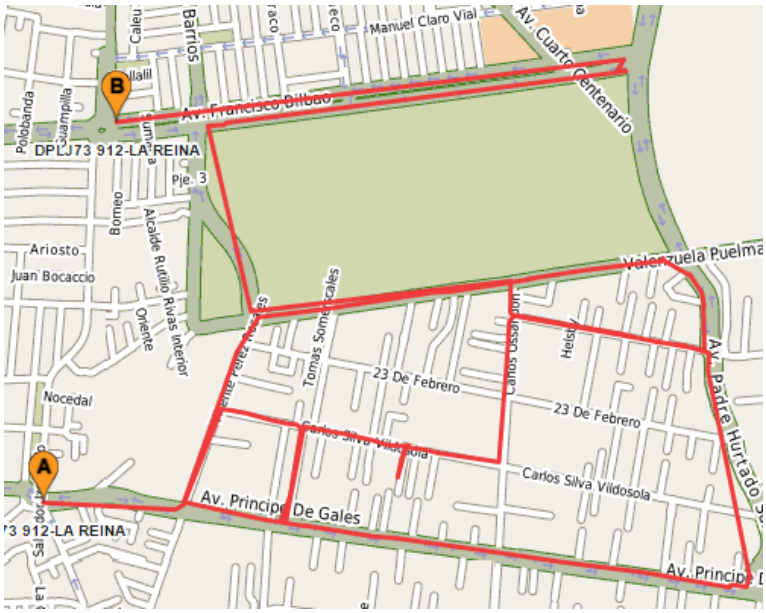


Figura 2.18: Sector 912, Vuelta 2.
Fuente: Sitrack, plataforma GPS.

Los recorridos específicos de cada uno de los camiones en su sector y vuelta fueron medidos a través de la plataforma de Google Earth, y como se mencionó anteriormente, se tomó en consideración la ruta que hace cada uno de los camiones en general, es decir, la ruta más habitual que realiza cada uno de los vehículos para recolectar la basura de cada sector ya que, en la realidad no siempre se ejecuta el mismo recorrido. Los resultados de las mediciones se muestran en la Tabla 2.6. Por medio de estos datos se puede concluir que las distancias que deben recorrer los vehículos recolectores para recoger la basura son en promedio unos 23,1 kilómetros.

Además los resultados evidencian que existen sectores en donde se debe recorrer una menor distancia para recolectar los residuos, ese es el caso del sector del vehículo 912, en donde se recorre en total cerca de 17 kilómetros, 11 kilómetros menos de lo que debe recorrer el camión 908 para recoger los residuos en su sector.

Distancias recorridas en Zona 1 (Metros)

Camión	Vuelta 1	Vuelta 2	Total
462	12.356	11.842	24.198
464	9.773	10.777	20.550
908	13.457	15.158	28.615
910	17.432	9.997	27.429
911	10.546	10.157	20.703
912	8.445	8.897	17.342
PROMEDIO:	**12.002**	**11.138**	**23.140**

Tabla 2.5: Distancias en metros recorridas por vuelta.
Fuente: Elaboración propia.

El rendimiento del trabajo en terreno de los vehículos recolectores se puede medir en la cantidad de residuos sólidos domiciliario que se recogen por kilómetro recorrido, siendo el ideal recolectar la mayor cantidad de basura, recorriendo la menor distancia entre los puntos de recolección y en el menor tiempo posible.

La Tabla 2.7, presenta los rendimientos actuales de los 6 vehículos recolectores, que realizan labores de recolección de RSD en la comuna.

Camión	Cantidad retirada (Kg)	Tiempo de recolección (Hr)	Distancia recorrida (Mt)	Rendimiento (Kg /Mt)	Rendimiento (Hr /Mt)
462	19.285	07:17	24.198	0,8	00:26
464	19.653	06:30	20.550	1,0	00:27
908	18.548	06:44	28.615	0,6	00:20
910	20.264	06:55	27.429	0,7	00:21
911	17.656	06:15	20.703	0,9	00:26
912	17.471	06:18	17.342	1,0	00:31
PROMEDIO:	18.813	06:40	23.140	**0,8**	**00:25**

Tabla 2.6: Redimiendo (Kilogramos/Metro - Hora/ Metro) en cada sector.
Fuente: Elaboración propia.

2.7. Planteamiento del problema

Si bien la empresa presta servicio a varios municipios del país, la comuna de La Reina es prioridad en estos momentos, dado que los camiones recolectores recorren distancias de hasta 160 km entre las zonas de recolección, plantas de transferencia ubicada en Quilicura y base central ubicada en San Bernardo, siendo la comuna que recorre la mayor cantidad de distancia en la Región Metropolitana.

2.7.1. Rutas irregulares

Los recorridos realizados por los camiones recolectores son determinados por la experiencia de los conductores y supervisores, no por un modelo que determine las trayectorias de los camiones recolectores, que considere variables como la demanda, capacidades de las cajas compactadoras, direcciones de calles, entre otras variables influyentes en los recorridos y números de vueltas que tiene que realizar el camión. Esto provoca que el vehículo recolector transite más de una vez por la misma calle u omita el paso por alguna de ellas, lo que lo obliga a volver a un sector ya recorrido.

La Tabla 2.8 entrega los kilómetros en promedio que recorren los camiones dentro de una misma zona. A modo de ejemplo, se puede apreciar que el camión 912, muestra diferencias entre el día lunes y viernes de 20 kilómetros, considerando que el área de recolección de esos días es el mismo. Los promedios de los kilómetros recorridos mostrados deberían ser similares, tal como es el caso del camión 462 presenta diferencias de solo 3,8 kilómetros entre el día miércoles y el viernes correspondiente a la misma zona.

Distancias recorridas en circuito completo de recolección (Kilómetros)

N° Camión	Lunes	Miércoles	Viernes
462	133,2	136,4	132,6
464	140,4	128,9	143,1
908	144,5	152,3	156,7
910	159,5	169,4	147,1
911	151,4	143,2	140,7
912	140,0	153,3	160,0
Total :	**869,0**	**883,5**	**880,2**

Tabla 2.7: Promedio de kilómetros recorridos por día, desde agosto 2015 – Marzo 2017.
Fuente: Elaboración propia.

2.7.2. Horarios de trabajo

Las jornadas laborales del personal de recolección que trabajan en la comuna de La Reina, es de un promedio de 9,0 horas, y tal como muestra la Tabla 2.9, estas corresponden al tiempo completo del ciclo de recolección, es decir, desde que el camión recolector sale de la base central, realiza todo el recorrido de recogida de residuos y vuelve a la base.

Según lo establecido en el artículo 25 bis del Código del Trabajo, la jornada ordinaria de trabajo del personal de choferes de vehículos de carga terrestre interurbana es de 180 horas mensuales. La empresa registra que mensualmente la dotación de choferes están trabajando 214 horas, lo que equivale a un 20% más de las horas permitidas mensuales, por lo que el tiempo promedio del ciclo de recolección debería ser lo más cercano posible a las 7,5 horas por día.

Horarios proceso de recolección de residuos (Horas)

N° de Camión	Promedio de Duración 1° vuelta	Promedio de Duración 2° vuelta	Promedio de Duración de Recolección	Promedio Jornada Laboral Peonetas	Promedio Jornada Laboral Chofer y Camión
462	4:22	2:53	7:15	8:10	9:32
464	3:58	2:33	6:31	7:26	8:41
908	4:08	2:36	6:45	7:40	9:23
910	3:59	2:55	6:54	7:49	9:14
911	3:48	2:27	6:15	7:10	8:44
912	3:56	2:22	6:18	7:13	8:41
Promedio:	**4:02**	**2:38**	**6:40**	**7:35**	**9:02**

Tabla 2.8: Promedio Jornada laboral La Reina, desde agosto 2015 – Marzo 2016.
Fuente: Elaboración propia. Herramienta de GPS usada por Dimensión S.A.

La jornada laboral con la que actualmente trabaja la comuna de La Reina no es excepcional, sino que también se repite para el personal que efectúan labores de recolección en otras comunas. Esta situación ha generado, no solo un costo a nivel de horas extras para la empresa, sino que también conflictos internos con el sindicato de trabajadores, ya que muchas veces han amenazado con realizar detención de labores con la finalidad de que se produzcan mejoras en los horarios de jornada laboral.

2.7.3. Costos del proceso de recolección

Los problemas de jornadas laborales y kilómetros recorridos traen consigo, además de conflictos en la condiciones laborales y deficiencia en la logística del proceso, la generación de costos extras.

Dimensión se adjudicó la "concesión de servicios de recolección y transporte de residuos sólidos domiciliarios, residuos voluminosos, aseo y limpieza de ferias" en la comuna de La Reina por el valor de $45,9 millones de pesos mensuales, unos $550,8 millones de pesos anuales de los cuales $294 millones anuales son por el retiro de basura en las zonas 1 y 2 de la comuna.

Los costos directos del procesos de recolección son presentados en la Tabla 2.10. Los costos alcanzan los $218,8 millones anuales, lo que corresponde al 74% del ingreso por el servicio.

La falta de un diseño de ruta, provoca que los costos variables afectos a la cantidad de kilómetros recorridos, como lo son las horas extras del personal de aseo, el combustible y las mantenciones de los vehículos recolectores sumen $92,3 millones anuales.

Ingresos y costos (en millones) del proceso de recolección zona 1 y 2

		Mensual	Anual
+	**Ingreso por servicio de recolección**	**$24,5**	**$294,0**
	Sueldo base 6 Choferes	$2,9	$34,6
	Horas extras 6 Choferes	$0,8	$9,7
	Sueldo base 24 Auxiliares	$7,0	$83,5
	Costo en combustible	$4,3	$51,6
	Costo en mantenciones	$2,6	$31,0
	Costos en seguros vehiculares	$0,7	$8,4
-	**Total costos recolección**	**$18,3**	**$218,8**
=	**Utilidad operacional**	**$6,2**	**$75,2**

Tabla 2.9: Costos en millones de pesos del proceso de recolección mensual y anual.
Fuente: Elaboración Propia

Los vehículos recolectores, en promedio, tiene un rendimiento de 2,2 kilómetro/litro, si en promedio en recorrer ambas zonas de la comuna se recorren 146,3 kilómetros, se calcula que diariamente se consumen 67 litros de combustible, los que tienen un costo de $51,6 millones de pesos anuales. El costo estimativo que tiene la empresa por concepto de mantenciones es mensualmente de $3,1 millones de pesos anuales, esto incluye mano de obra del personal de taller y repuestos.

Por lo mencionado anteriormente es que Dimensión SA requiere una propuesta de optimización de ruta, que le permita resolver los efectos indeseados actuales en el proceso de recolección en la comuna de La Reina.

2.8. Objetivos

Objetivo General

Diseñar una propuesta de microruteo, que permita minimizar la distancia total recorrida en el proceso de recolección de residuos sólidos domiciliarios en la comuna de La Reina.

Objetivos específicos

- Calcular el número de vehículos recolectores necesarios para la zona de recolección.
- Distribuir de manera más uniforme y equitativo las zonas de trabajo de cada vehículo..
- Aplicación de modelo de ruteo que se ajuste a la necesidad de la empresa.

Capítulo 3: MARCO TEÓRICO

En este capítulo, se presentan los modelos de problemas de ruteo sobre arcos que dieron origen a CARP, las distintas formas o perspectivas con que se ha tratado el problema de recolección de residuos y la justificación del método propuesto para resolverlo.

La recolección de residuos consiste en trasportar los RSD desde su almacenamiento en la fuente generadora, hasta el vehículo recolector y luego trasladarlos hasta el sitio de disposición final o estación de transferencia (SEDESOL, 1999). El proceso de recolección consiste, tradicionalmente, en recoger puerta a puerta toda la basura generada por los usuarios, para luego transportarla al relleno sanitario, esta modalidad es realizada directamente por los operarios del camión, quienes recolectan la basura desde cada puerta y llenan los vehículos manualmente (Ayala & Gonzáles, 2001).

El principal problema de la recolección recae en el mal diseño de rutas, basado en la mayoría de los casos por la experiencia del jefe de limpieza o de los choferes de los vehículos recolectores y como el diseño es de forma intuitiva, y no a partir de un estudio técnico, los tiempos y gastos de combustible se ven incrementados. Tanto la capacidad de los camiones, las distancias, y el crecimiento acelerado de nuevos centros de población, unido al mal diseño de las rutas contribuye a que el servicio de recolección no cumpla con las expectativas esperadas de este servicio (Obras públicas, Victoria 2005). Además, un mal diseño de rutas de recolección, trae como consecuencia, graves daños al sistema de recogida como una deficiente operación y funcionamiento de equipos, desperdicio de personal, reducción de coberturas del servicio de limpieza y la proliferación de tiraderos clandestinos a cielo abierto en diferentes puntos de la ciudad (SEDESOL, 1999).

El diseño de rutas tiene como propósito dividir la ciudad en sectores, similares en cantidad de trabajo, de manera que a cada área le corresponda un vehículo (Macroruteo) y desarrollar una ruta para cada sector (Microruteo), de modo que facilite a cada equipo llevar a cabo el trabajo con una menor cantidad de tiempo y recorrido (Márquez, 2010).

3.1.Macroruteo

Se denomina macrorutas a la división de la cuidad en sectores operativos, a la determinación del número de camiones necesarios en cada una y a la asignación de un área del sector en cada vehículo recolector (SEDESOL, 1999). El macroruteo consiste de dos etapas: proyecto de gabinete y ajuste de campo; en el primero se hace calculo teórico de las necesidades u áreas asignadas a cada vehículo, y en el segundo se afinan los contornos de las mismas para balancearlo y nivelar las cargas de trabajo entre las diferentes cuadrillas..

Actualmente no existe un algoritmo o programa específico para realizar el macroruteo, por lo que el diseñador, divide la ciudad en "n" zonas de manera equitativas, de tal forma que cada una de esas zonas genere aproximadamente la cantidad de residuos sólidos residenciales que llenen un camión durante su recorrido dentro de esta (SEDESOL, 1999).

3.2. Microruteo

El microruteo consiste en una descripción detallada del trayecto que debe seguir el carro recolector con la finalidad, de recolectar a cabalidad los residuos sólidos generados por los habitantes de un área previamente establecida, tratando de minimizar el tiempo de la operación evitando distancias muertas, es decir, exceso de giros en U o a la izquierda y calles de difícil acceso. El objetivo principal de realizar un microruteo es desarrollar una ruta de recorrido para cada sector que permita disminuir las distancias recorridas y el tiempo en que los equipos de trabajos llevan a cabo la recolección (Márquez, 2010).

La planificación y diseño de rutas de recolección de residuos está, generalmente, asociada a los problemas clásicos del ruteo. En el sistema de método de recolección por contenedores donde el vehículo es dirigido a través de todos los nodos se tiene un NRP *(Node Routing Problem*) tal como el TSP (*Traveling Salesman Problem*) (Laporte, 1992). Y en la recolección por método de acera, el vehículo es dirigido por todos los arcos de una red se tiene un ARP (Arc Routing Problem) como el CPP (Chinese Postman Problem) (Eiselt H, 1995).

3.3. Problema de Ruteo por Arcos

El estudio del problema de ruteo por arcos comenzó en 1735 cuando Leonardo Euler resuelve el problema de los puentes de Königsberg, (actualmente ciudad de Kaliningrado en Rusia) situada a orillas del río Pregel sobre dos islas que se encontraban en el centro de la corriente del río, dividiendo el terreno en cuatro regiones distintas las cuales, eran unidas a través de siete puentes conectores. El problema consistía en encontrar un recorrido con inicio en algún punto de la isla, pasar por los siete puentes sin repetir ninguno y volver al punto de partida (Sachs, H., Stiebitz, M., & Wilson, R. J. , 1988).

En 1962 nace otro problema de ruteo sobre arcos que fue el Problema del Cartero Chino (*Chinise Postman Problem* o CPP) el cual está definido de la siguiente manera: Un cartero debe repartir la correspondencia a cada una de las calles de su distrito, siendo la oficina de correos su punto de partida y llegada. El objetivo en este caso es encontrar la ruta optima que le permita al cartero recorrer la menor distancia posible, pasando por cada calle al menos un vez en todo el recorrido (Mei-Ko., 1962).

El problema del cartero chino se puede definir como una gráfica conexa no dirigida G = (V;E), donde a cada arista se le asigna un costo, el problema consiste en encontrar un recorrido tal que visite cada arista al menos una vez al menor costo posible. (Edmonds & Johnson , 1973) probaron que si la gráfica asociada al problema es completamente dirigida o completamente no dirigida, CPP puede ser resuelto en tiempo polinomial. Pero cuando G es mixta, se convierte en un problema NP-Difícil.

Orloff en 1974 propuso el Problema del Cartero Rural (*Rural Postman Problem* o RPP), que al igual que el cartero chino, tiene un punto de partida y llegada la oficina de correos, pero con la diferencia de que el cartero en este caso debe repartir la correspondencia solo a un subconjunto de calles, con el objetivo también de recorrer la menor distancia posible (Golden y Wong, 1981).

Entonces si se tiene un sistema de calles a visitar la gráfica asociada al problema se construye relacionando por cada calle una arista y los vértices representan las intersecciones de cada calle (esquinas). Si a este problema le agregamos la restricción de visitar solo algunas aristas se convierte en el Problema del Cartero Rural el cual se define de la siguiente manera: sea una gráfica no dirigida G = (V;E;C) donde C es una matriz de costos, encontrar un recorrido de costo mínimo tal que este visite cada arista de R ⊆ E al menos una vez. La diferencia entre CPP y RPP es que en el problema del Cartero Rural solo un conjunto de aristas deben ser visitadas. En 1976, Lenstra y Rinnoy Kan demostraron que RPP es NP-Difícil .

El último problema de ruteo sobre arcos fue el Problema de Ruteo de vehículos Capacitados sobre Arcos (*Capacitated Arc Routing Problem* o CARP) el cual fue sugerido por primera vez por (Golden y Wong, 1981), como una extensión del Problema del Cartero Rural que incluía restricciones de capacidad. El CARP consiste en atender las demandas sobre determinadas calles de una red vial, a través de una flota homogénea de vehículos con capacidad limitada, que inician y finalizan sus recorridos desde un único depósito. El objetivo del problema es minimizar el costo total del recorrido (distancia o tiempo) de tal manera, que se puedan atender todas las demandas (Whlk, 2008).

Para CARP se requiere encontrar tantos recorridos como vehículos disponibles, además se le agregan restricciones de capacidad de los vehículos y al igual que un RPP sólo requiere visitar un subconjunto de todos los arcos o aristas en la gráfica, por lo que si llega a ser difícil encontrar un solo recorrido mínimo, será aún más difícil encontrar más de uno, demostrando que también el CARP es un problema NP-Difícil (Golden y Wong, 1981).

Debido a la complejidad de algunos problemas, se buscaron opciones como la aplicación de técnicas heurísticas existentes, que no garantizan una solución óptima, pero que pueden proporcionar una buena solución aproximada en un tiempo razonable.

3.4. Métodos de Solución

Para resolver un problema de ruteo de este tipo es que la literatura recomienda transformar los problemas CARP en Problemas de Ruteo de Vehículos Capacitados (*Capacitated Vehicle Routing Problem* o CVRP) ya que estos últimos y sus variantes, se han estudiado con mayor intensidad que las contrapartes en ruteo sobre arcos (Assad y Golden, 1995). También, debido a la enorme dimensión de las gráficas que representan toda la red de calles a tratar en problemas CARP se descarta la posibilidad de aplicar cualquiera de los métodos exactos o heurísticos sofisticados.

En la actualidad, los métodos de solución están centrados en métodos de optimización combinatoria, debido a la complejidad de los problemas de ruteo de vehículos en la obtención de soluciones óptimas en tiempo polinomial. Estas técnicas se dividen en técnicas de optimización local convencional (heurísticas) y técnicas de optimización local inteligente (metaheurísticas). A diferencia de un enfoque algorítmico “exacto”, un método de optimización no tiene una base de matemática formal que lo sustente, es desarrollado más o menos por intuición (Ignizio & Cavalier, 1994)

La idea más genérica del término heurística está relacionada con la tarea de resolver inteligentemente problemas reales usando el conocimiento disponible (Narducci, 2005). Heurística proviene de una palabra griega con un significado relacionado con el concepto de encontrar y se vincula a la supuesta exclamación eureka de Arquímedes al descubrir su famoso principio (De la Cruz, 2003). Reeves (1996) define el término heurística de la siguiente forma: "Una técnica heurística (o simplemente una heurística) es un método que busca buenas soluciones (es decir, soluciones cercanas al óptimo) a un costo computacional razonable sin poder garantizar optimalidad".

Las técnicas heurísticas para el Problemas de Ruteo de Vehículos (VRP), en general, pueden ser clasificadas dentro de cuatro categorías (Gaskell, 1967), así: constructivas, como el método de los ahorros de Clarke y Wright, con base en el ahorro generado por insertar nuevos clientes en cada vehículo hasta completar una solución final; métodos de agrupar primero, luego enrutar, que agrupan los clientes en varios subconjuntos, asignan cada subconjunto a un vehículo y luego resuelven cada Problema del agente viajero (TSP) correspondiente (por ejemplo, el método de Fisher y Jaikumar, basado en el problema de asignación generalizado y el algoritmo de barrido de Gillet y Miller); métodos heurísticos de enrutar primero, luego agrupar, que empiezan resolviendo el TSP definido por todos los clientes y luego parten la ruta hallada para asignar un tramo a cada vehículo (como el método de curvas de llenado de Bowerman, Calamai y Brenthall, y el método de partición óptima de Beasley); y finalmente, los métodos de mejoramiento, como los intercambios Or–Opt.

La alternativa diseñada e implementada para resolver Problema de enrutamiento de vehículos con limitación de capacidades y flota homogénea (CVRP-HF) es el método de asignar primero, rutear después.

Los métodos asignar primero y rutear después (*cluster first, route second*) procede en dos fases. Primero se busca generar grupos de clientes, también llamados clusters, que estarían en una misma ruta en la solución final. Luego, para cada cluster se crea una ruta que visite a todos sus clientes. Las restricciones de capacidad se consideran en la primera etapa, asegurando que la demanda total de cada cluster no supere la capacidad del vehículo. Por lo tanto, construir las rutas para cada cluster es un TSP que, dependiendo de la cantidad de clientes en el cluster, se puede resolver en forma exacta o aproximada.

Esta elección fue basada en el capítulo 5 del libro de Toth y Vigo en donde se describen todas las propuestas para resolver el CVRP haciendo comparaciones entre los métodos heurísticos, en donde se expone que la calidad de las soluciones con los heurísticos de dos fases suelen ser mejores con respecto a los métodos constructivos (Toth y Vigo, 2002).

Dentro de los métodos de dos fases el método de Fisher y Jaikumar, basado en la asignación generalizada, muestra que en comparación con otros métodos como los de localización y branch-and-bound, presentan mejor solución de la función objetivo y son más rápidos, en tiempo de resolución,. Mostrando así el buen desempeño de esta heurística de Fisher y Jaikumar, comparada con otras dentro de los métodos de dos fases, además es una de las dos únicas heurísticas que asume que el valor del número de vehículos es fijo, como lo es en el problema de la recolección de residuos sólidos.

La heurística de asignación generalizada de Fisher y Jaikumar propone primero crear un cluster de clientes mediante la resolución de un Problema de Asignación Generalizada (GAP). Dentro de la primera fase se fijan n clientes semilla con J = 1…n sobre la base de los cuales se construirán los clusters y se calcula el costo de insertar un cliente i en el cluster j como el costo de la mejor inserción del cliente i ruta (0,Sj,0) es decir, $d_{i,j}$ =($c_{0,i}$ + $c_{i,sj}$ - $c_{0,sj}$) debido a que se trabaja con una matriz simétrica. Además, se decide que clientes asignar a cada uno de los cluster de modo de no violar la capacidad del recurso, resolviendo un problema de asignación generalizada (Fisher y Jaikumar, 1981) que puede ser formulado como programa entero, bajo el objetivo se minimizar el costo total de asignación.

Para la segunda fase se realiza el ruteo de cada cluster, mediante la resolución de un TSP generalmente representado como un típico problema de difícil optimización combinatoria (Punnen, 2007). El modelo presenta la minimización de la distancia total recorrida, en función a los puntos seleccionados, con restricciones que aseguren que solo un agente atenderá a cada uno de los puntos a visitar.

Capítulo 4: METODOLOGÍA

Para lograr los objetivos propuestos, es necesario definir los siguientes procedimientos empleados en este trabajo de tesis que serán aplicados para el desarrollo de un diseño de ruta para un sistema de recolección de residuos.

4.1.Macroruteo

Racero y Pérez definen en su trabajo Optimización del sistema de rutas de recolección de residuos sólidos domiciliarios (Racero y Pérez, 2006) que básicamente el macroruteo consiste en dos etapas, el proyecto de gabinete y el ajuste de campo

a) Proyecto de gabinete

Se hace el cálculo teórico del número de vehículos y por ende, la cantidad de zonas en que será dividida el área de estudio en la comuna.

b) Ajuste de campo

Consiste en afinar los contornos de las zonas de trabajo para balancear y nivelar las cargas de trabajo entre las diferentes cuadrillas. Para conseguir un equilibrio en la cantidad de residuos que retira cada camión, se sectoriza por la cantidad de residuos que se retira por área de trabajo.

4.2.Microruteo

Microruta es el recorrido específico que deben cumplir diariamente los vehículos de recolección en las áreas de la población donde han sido asignados, con el fin de recolectar en la mejor manera posible los residuos sólidos generados por los habitantes de dicha área.

Este proceso consiste en desarrollar una ruta de recorrido para cada subsector, de manera que permita a cada equipo llevar el trabajo de recolección en una menor cantidad de tiempo y recorrido. Para lograr dicha ruta de recorrido se desarrollan los siguiente pasos:

a) Definición del tipo de problema de ruteo que presenta el caso de estudio

El proceso de recolección tiene actualmente un solo depósito, de donde sale una flota homogénea de vehículos recolectores con una capacidad limitada, a recolectar residuos sólidos domiciliarios depositados en las calles. Ante estas características es que se define que el modelo que mejor representa el sistema actual de recolección de la empresa y se ajusta para encontrar la solución óptima es el Problema de Ruteo de vehículos Capacitados sobre Arcos.

b) Elección del modelo de solución

Para la elección del método de solución es necesario una revisión de la literatura, lo que según las características del problema y el tamaño de la instancia, se define que es necesario aplicar un método de solución heurístico de dos fases de Fisher y Jaikumar. Este método consiste primero agrupar los clientes, y luego encontrar la ruta más corta, que permita recorrer la menor cantidad de distancia atendiendo a todos los clientes.

c) Construcción del modelo CARP

Para construir el modelo, primero se grafican los puntos de recolección en Google Earth, con la ubicación y dirección de cada uno de los puntos que son visitados actualmente por los vehículos. Cada uno de los puntos tiene un valor asignado, que es la cantidad de basura que se retira desde ahí y cada vehículo tiene un valor asignado correspondiente a la capacidad, que en este caso es la misma para todos los camiones.

En base al mapa se plantea una gráfica, que consiste en que las esquinas de las calles son representadas por vértice, y las calles están representadas por un arco si esta tiene un único sentido de tránsito y por una artista en caso de tener ambos sentidos asignados, en el caso de que una calle tengas más de un punto de parada estas serán sumadas y asignadas a un solo arco o arista.

d) Programación del modelo GAP

Programar el modelo requiere de cuatro parámetros los que son: los clientes semillas, que en este caso son las paradas donde actualmente comienzan cada ruta, la demanda en cada parada, que corresponde a la cantidad de basura depositada en cada punto, la capacidad de los vehículos, que como se mencionó anteriormente es homogénea para toda la flota y el costo de asignación de clientes a los clientes semillas, que en este caso de estudio en particular, es igual a la distancias que existen entre el punto de inicio y el punto de recolección.

e) Transformación de una red de CARP a una ACVRP

La trasformación consiste en convertir una instancia de CARP dirigido a un Problema de Ruteo de Vehículos Capacitados Asimétrico ACVRP, donde primero se asocia a cada arco obligado a recorrerse en el CARP un nodo en el ACVRP, el cual hereda la demanda asociada al arco, manteniendo el nodo del depósito. Con la finalidad de obtener una gráfica más sencilla, con menos cantidad de puntos de recolección.

f) Programación del modelo TSP

Teniendo definido los conjuntos de clientes o cluster resultantes en el modelo GAP, se construye una matriz de costos (distancias), y se diseña el recorrido resolviendo el modelo TSP en Lingo 17.0 para encontrar el orden en que se visitará cada punto en el cluster, minimizando la distancia total recorrida, por ende, la ruta óptima para cada vehículo recolector.

g) Validación de resultados

Se verifica que los resultados obtenidos son coherentes y útiles. Para validar el modelo se compararon los resultados generados por el modelo de ruteo con la situación de la nueva sectorización. Para comprobar que exista un equilibrio en la cantidad de paradas por recolectar, los kilómetros a recorrer y el horario laboral con las exigencia legales y esperadas.

h) Análisis de costos

Evaluar si el modelo propuesto genera una posible reducción en los costos de combustible y mantenciones del vehículo recolector, como así una variación en los costos por conceptos de remuneraciones específicamente en horas extras, que eran provocadas por largos horarios de trabajos.

Capítulo 5: APLICACIÓN METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la solución del problema en dos grandes etapas, primero se realiza un Macroruteo para redistribuir los sectores de trabajo. Luego se resuelve el problema de ruteo de vehículos capacitados sobre arcos por medio del método de dos fases bajo la secuencia agrupar primero y rutear después.

5.1.Macroruteo

Un diseño preliminar de macrorutas se puede hacer partiendo de la población "P" de una zona de la cuidad, de la producción de residuos sólidos en Kg/hab/día "G" y de la frecuencia del servicio "F", expresado en días/semana. El número de días que transcurren entre dos recolecciones serán G/F, si no consideramos por el momento lo que ocurre los días domingo y se trabaja seis días por semana (Racero y Pérez, 2006).

Para iniciar el cálculo de los vehículos necesarios para ejecutar la recolección en la comuna de La Reina, se debe tener en cuenta que los vehículos recolectores que prestan servicio en la comuna, son una flota homogénea, es decir que todos los camiones tienen la misma capacidad de recolección, capacidad que corresponde a 14 toneladas de residuos sólidos domiciliarios. La flota debe recolectar el 100% de la basura domiciliaria y tener completa cobertura en sus zonas de trabajo.

Los datos que se utilizan para a formula del cálculo del número vehículos entregados por (Racero y Pérez, 2006) son la capacidad (C) que corresponde a 14.000 kg y la cantidad de residuos producidos $(G \times P)$ en promedio en la zona estudiada es de 111.836 Kg/día, se tiene además que el factor de cobertura (K) es 1 y el factor de reserva (F_r) es 1, el número de viajes (N) que realizan los camiones es de 2 y el número de días hábiles (d_h) es de 7.

Entonces el cálculo correspondería a:

$$N_v = \frac{G \times P}{N \times C} = \frac{111.836}{2 \text{ x } 14.000} = 3{,}99 \approx 4 \ vehículos$$

Se obtiene que la cantidad necesaria de vehículos para recolectar la zona en estudios es de 4 vehículos recolectores, este resultado también significa que ahora la zona estudiada de la comuna La Reina, tiene 4 zonas de trabajo y no 6 como lo era en la condición inicial. Este resultado puede significar un posible ahorro de dos vehículos, lo que en el capítulo de evaluación se verá reflejado.

Una vez calculado el número de camiones y por ende el número de zonas de trabajo, se procede a reorganizar los sectores y delimitar las 4 zonas en donde los vehículos de recolección deberán realizar las labores de recogida de residuos sólidos.

Para reorganizar las zonas, se hace un análisis de la cantidad de residuos promedio que retira cada uno de los camiones como se muestra en la Figura 5.1.

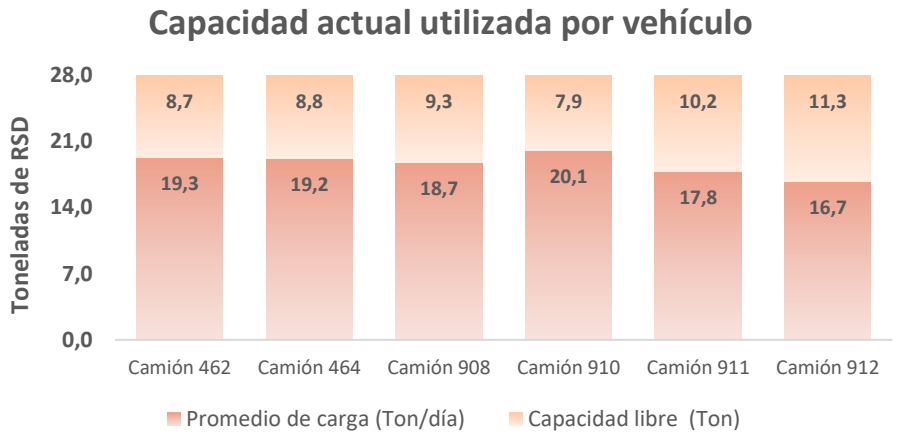


Figura 5.1: Capacidad en toneladas utilizada por camión.
Fuente: Elaboración propia.

En ella se puede apreciar que en la segunda columna, en el promedio de kilogramos retirados por día los camiones 911 y 912 son los que recogen menor cantidad de residuos promedios al día lo que si se compara con que la capacidad total de los camiones que es de 14 toneladas, 28 toneladas las dos vueltas, entonces se obtiene que ambos camiones terminan el servicio con 10 y 11 toneladas disponibles.

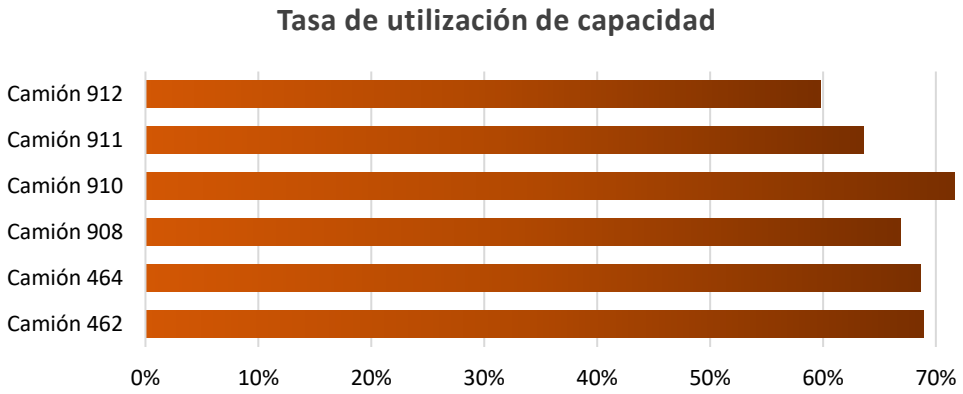


Figura 5.2: Tasa de utilización en porcentaje. Carga promedio v/s Capacidad máxima.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5.2 se analiza el porcentaje de la carga que transporta cada camión en comparación a la capacidad que tiene la caja compactadora. Se aprecia en el grafico mostrado, que la tasa de carga del vehículo recolector en los casos del camión 911 y camión 912 son los más bajos que el resto de los otros, con un 64% y 60% respectivamente.

La tasa de utilización de capacidad que tienen los camiones está por debajo de los estándares esperados por la empresa, la que corresponde a una tasa de al menos un 90%. Para alcanzar el estándar y reducir el número de camiones a 4 vehículos, según lo calculado anteriormente, es que se decide eliminar las zonas en donde la cantidad de residuos transportados es menor en comparación con las otras zonas y las que tengan menor tasa de carga. Es por eso que las zonas de trabajo de los camiones 911 y 912 serán las zonas eliminadas, por lo que el resto de los camiones disponibles deberán modificar sus rutas para incluir las áreas de dichos vehículos recolectores y recolectar los residuos de esas zonas.

Una vez decidida las zonas a eliminar, se procede a aumentar las zonas de trabajo de los 4 vehículos recolectores que ahora realizaran el trabajo en la comuna. Este aumento se realiza por medio de cuantificar la cantidad de residuos recolectados por área del sector. Para obtener los datos del área de trabajo de cada una de las zonas se utiliza la página https://www.freemaptools.com/ la cual puede medir el área de un polígono dibujado en la plataforma. Los Resultados de la medición de las áreas de trabajo son presentada a continuación en la Tabla 5.1.

Camión	Promedio de carga (Kg/día)	Área sector (m^2)	Tasa de recolección (Kg/m^2)
462	19.293	1.060.000	0,018
464	19.207	844.000	0,023
908	18.732	905.000	0,021
910	20.065	3.222.000	0,006
911	17.806	813.000	0,022
912	16.733	884.000	0,019
TOTAL:	**111.836**	**7.728.000**	

Tabla 5.1: Área en m^2 de trabajo de cada vehículo recolector en metros cuadrados.
Fuente: Elaboración propia.

Con la información de los kilogramos de residuos que recolecta cada uno de los camiones por metro cuadrado de su zona de trabajo, y la cantidad de kilogramos disponibles en cada camión al final del servicio, se procede a calcular cuanta área debería aumentar los camiones 462, 464, 908 y 910 para recolectar el total de residuos en la zona estudiada.

Se decide que el camión 462 y el 908 incorporen a sus rutas, el área de trabajo del camión 911, ya que la suma de sus capacidades disponibles da como resultado 17,9 toneladas disponibles y los camiones 464 y 910 que añadan a sus zonas de trabajo el área de trabajo del camión 912, debido a que la suma de las capacidades de ambos vehículos suman 16.7 toneladas disponibles.

Una vez que se define qué sector será eliminado y cuales deberán aumentar su área de recolección, se procede a realizar al cálculo de estas nuevas 4 delimitaciones de trabajo.

Los resultados de la nueva distribución de la Zona 1, son presentados en la Tabla 5.2. El cálculo del área que debe ser añadida a los sectores, de cada uno de los 4 vehículos recolectores que ahora van a recoger el total de la comuna, se obtiene multiplicando la capacidad disponible del camión con la tasa de recolección vehículo recolector que será eliminado.

Camión	Promedio de carga (Kg/día)	Capacidad disponible (Kg)	Área sector (m^2)	Tasa de recolección (Kg/m^2)	Área para agregar (m^2)	Área NUEVA (m^2)
462	19.293	8.707	1.060.000		395.773	**1.455.773**
908	18.732	9.268	905.000		421.273	**1.326.273**
✖ **911**	17.806		813.000	0,022		
464	19.207	8.793	844.000		462.789	**1.306.789**
910	20.065	7.935	3.222.000		417.632	**3.639.632**
✖ **912**	16.733		884.000	0,019		

Tabla 5.2: Cálculo del área de las nuevas zonas de trabajo.
Fuente: Elaboración propia.

El criterio para delimitar los sectores, consiste en que, además de considerar que se cumpla con el requisito de los metros cuadrados calculados, las áreas con las que se forman las nuevas zonas sean continuas y se permita el flujo cómodo para la creación de la ruta especifica que deberá recorrer el vehículo recolector.

La nueva distribución en cuatro sectores de recolección de residuos sólidos, se realiza por medio de https://www.freemaptools.com/ para calcular que efectivamente las nuevas zonas tengan las áreas presentadas en la Tabla 5.2 (última columna), y Google Earth para dibujar el polígono, y representar las nuevas sectorizaciones por medio de zonas con colores como se muestra en la Figura 5.3.

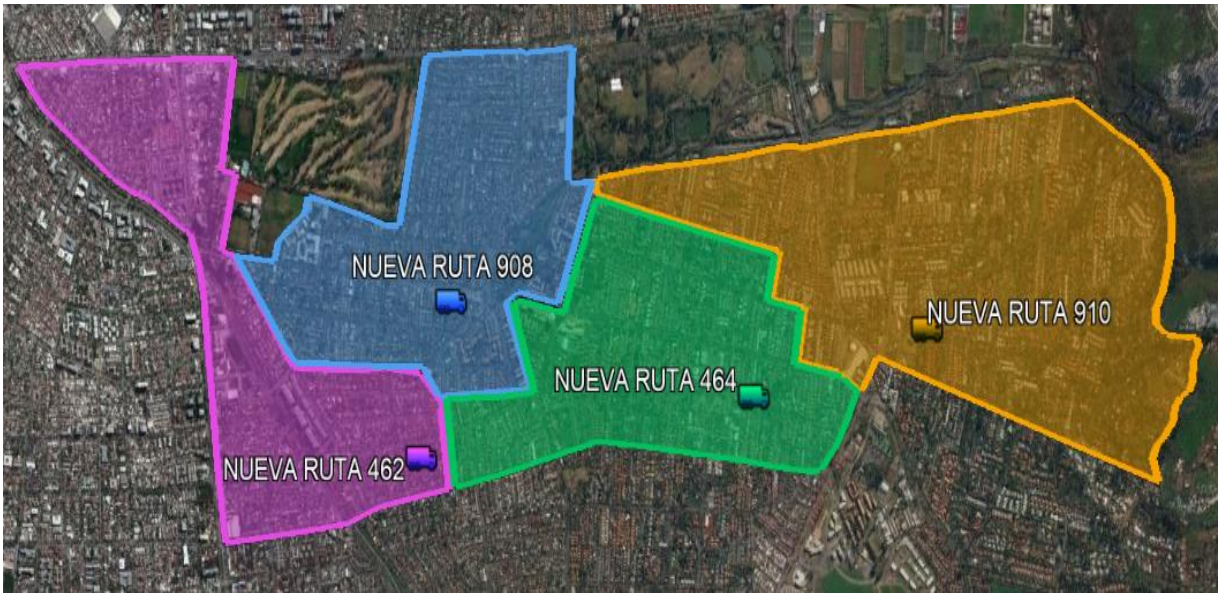


Figura 5.3: Nueva Sectorización para el área estudiada de la comuna de La Reina.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5.3 se puede apreciar la nueva sectorización, en donde el color morado representa el nuevo sector de trabajo del camión 462, en color celeste el sector de trabajo del camión 908, en color verde el sector del camión 464 y por último en color naranja el sector de recolección del camión 910.

En la Tabla 5.3 se presenta una comparación entre los kilómetros que recorren los vehículos y los kilogramos que recogen los vehículos con la distribución actual y con la distribución propuesta. En ella se puede apreciar que a pesar de que se eliminan dos sectores, los parámetros de kilogramos y kilómetros totales siguen teniendo el mismo valor, ya que es la misma área de trabajo pero dividida ahora en 4 sectores, manteniendo los 138,8 kilómetros recorridos y las 111,8 toneladas recolectadas.

	Distribución actual		**Redistribución propuesta**	
Camión	**Metros**	**kilogramos**	**Metros**	**kilogramos**
464	20.550	19.293	29.741	27.827
910	27.429	19.207	35.580	28.029
462	24.198	18.732	34.135	28.009
908	28.615	20.065	39.381	27.971
911	20.703	17.806		
912	17.342	16.733		
Total:	**138.837**	**111.836**	**138.837**	**111.836**

Tabla 5.3: Comparación de metros recorridos y kilogramos recogidos entre la distribución actual y la propuesta.
Fuente: Elaboración propia.

Cuando se obtienen las delimitaciones de los cuatro sectores, se procede con la realización del plan de ruta. Con el recorrido especifico de deberá efectuar cada uno de los camiones. Por lo que el Macroruteo le da paso al segundo punto que es el Microruteo.

5.2. Microruteo

Antes de comenzar con esta etapa, es necesario aclarar que debido a la complejidad y lo extenso del área de estudio, es que se aplicada la propuesta de microruteo a un solo sector, que en este trabajo será el área de trabajo del vehículo 464, representado por el color verde en la Figura 5.3.

Como se menciona en la descripción del proceso de recolección, para retirar el total de los residuos de basura en cada sector es necesario, que el vehículo realice dos vueltas. Para efectos del desarrollo de la solución propuesta, especialmente para programación del método de ruteo, es que se considera como si fuesen dos camiones diferentes con una misma capacidad.

5.3. Modelo de Asignación Generalizada

Este modelo puede ser un problema formulado como un problema de programación entera, con el objetivo de minimizar el costo total de la asignación de cada uno de los puntos de recolección a un vehículo recolector.

Los parámetros necesarios para resolver el Problema de Asignación Generalizada y realizar el modelo de solución son los siguientes:

- **Cantidad disponible de vehículos recolectores:** Número de camiones dispuestos para la recolección de basura en el sector 464. En este trabajo se determinó que esa cantidad de camiones será de dos por sector, para representar las dos vueltas, y se considerará que el punto de inicio de los circuitos, será en la ubicación actual en donde comienza el proceso en cada una de las vueltas.

- **Costos por asignación de punto de recogida a los vehículos recolectores:** Para una mejor resolución y basada en los casos de estudio del presente trabajo, es que los parámetros de costos están asociados únicamente a las distancias existentes entre el punto de inicio de proceso y las paradas de recolección.

- **Demanda por cada punto de recogida:** Los datos específicos de la cantidad de residuos recolectados por cada parada, no son datos conocidos por la empresa, por lo que se definió que del total de residuos recolectados en cada una de las vueltas realizadas por los camiones que antes del macroruteo recogían el sector fueran divididos por la cantidad de paradas en dicho recorrido, obteniendo así una cantidad promedio de kilogramos recogidos por cada una de las paradas.

- **Capacidad de los vehículos:** La capacidad que los vehículos recolectores tienen para recoger residuos sólidos domiciliarios corresponde a 14 toneladas.

En base a las definiciones anteriores, es que se puede determinar que los parámetros y las variables son las siguientes:

I: Conjunto de puntos de recogida $(i = 1, \dots, n)$
J: Conjunto de vehículos recolectores S_j $(j = 1, \dots, m)$
a_j:Capacidad del recurso j
b_{ij}:Residuos recolectados si el punto de recogida i es asignado al vehículo recolector j
c_{ij}:Costo del punto de recogida i si es asignado al vehículo recolector j

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 \text{ si el punto de recogida } i \text{ es asigando al vehículo recolector } j \\ 0 \text{ en caso contrario} \end{cases}$$

Donde la función objetivo y las restricciones son :

$$min \sum_{j=1}^{m} \sum_{i=1}^{n} c_{ij} * x_{ij} \qquad (5.1)$$

S.a

$$\sum_{i=1}^{n} b_{ij} * x_{ij} \leq a_j \quad , \quad j = \quad 1, \dots, m \qquad (5.2)$$

$$\sum_{j=1}^{m} x_{ij} = 1 \quad , \quad i = 1, \dots, n \qquad (5.3)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad , \quad i = 1, \dots, n; \; j = 1, \dots, m \qquad (5.4)$$

La restricciones (5.2) describe el cumplimiento con el límite de la capacidad del recurso a utilizar, la restricción (5.3) asegura que el punto de recogida i solo sea asignado a un vehículo j, ya que la variable x_{ij} es binaria (5.4) (Guerrero, Pérez y Olivares, 2011).

A modo de ejemplo, se presenta la Figura 5.4, en donde está determinado el punto de inicio de vehículo 1, representado por j =1. Los puntos de recolección en donde están dispuestos los residuos, están representados por i =1, 2, 3, 4, que corresponden a la calle completa. El costo c_{ij} es la distancia entre el vehículo j y el punto de recogida i, por b_{ij} que es la cantidad de residuos dispuestos en la calle desde j hasta el punto de recogida i.

Figura 5.4: Ejemplo de distribución de parámetros para la solución de GAP.
Fuente: Elaboración propia.

Cada punto de recogida además de contener el valor distancia, tiene asignada una cantidad de basura b_{ij}. Esta cantidad, es la suma de todos los residuos recolectados a lo largo de la calle, en donde puede haber más de una parada, como se muestra en el ejemplo en la Figura 5.5, que representa el punto de recogida 1 (color verde) y que contiene 4 paradas (color azul), cada una con una cantidad de residuos.

Figura 5.5 Ilustración ejemplo de variables contenidas en un arco.
Fuente: Elaboración propia.

5.4. Programación del Problema de Asignación Generalizada (GAP)

El modelo matemático GAP se programa en un software LINGO 17.0. Este modelo utiliza los parámetros de entrada descrito anteriormente y se programa con el siguiente pseudocódigo:

```
SETS:

PUNTO RECOGIDA:DEMANDA;
VEHÍCULO:CAPACIDAD;
PAR(PUNTO RECOGIDA,VEHÍCULO):DISTANCIA,ASIGNAR;

ENDSETS
```

DATA:

PUNTO RECOGIDA = Aquí se define la cantidad de puntos de recogida i= 1,…,206 .

VEHÍCULO = Aquí se define la cantidad de camiones j = 1,2 .

DEMANDA = Aquí se introduce la columna de demandas (b_{ij}).

CAPACIDAD = En este caso se igual a 14.000 toneladas.

DISTANCIA = Aquí se introduce la matriz de distancias.

ENDDATA

```
MIN= @SUM(PAR:DISTANCIA*ASIGNAR);

@FOR(PUNTO RECOGIDA(I):
      @SUM(VEHÍCULO(J):ASIGNAR(I,J))=1;);

@FOR(VEHÍCULO(J):
      @SUM(PUNTO RECOGIDA(I):DEMANDA(I)*ASIGNAR(I,J))<=
CAPACIDAD(J););

@FOR(PAR:@BIN(ASIGNAR));

END
```

En el seudocódigo descrito en SETS se define el conjunto de variables a utilizar en el modelo como lo son el número de puntos de recogida y sus demandas, donde comenzará su ruta cada vehículo recolector, y la variable de asignación de un punto de recolección a un camión. El comando DATA define el conjunto de parámetros que se introducen en forma de vector o matriz, (valores en Anexo1). En DEMANDA se colocan las demandas en cada parada; en CAPACIDAD se define la capacidad de cada camión recolector y en DISTANCIA la matriz de distancias de cada punto de inicio del vehículo recolector a todos los demás puntos de recogida. Los datos utilizados como input de este modelo se encuentran en el Anexo 4.

MIN es la función objetivo que permite minimizar la distancia total, que debe recorrer cada vehículo para recolectar todos los puntos de recogida que se le asignen. En las restricciones, se define que a cada punto de recolección se le asigna solo un vehículo y que la capacidad del vehículo recolector sea respetada.

5.5. Resultados del modelo GAP

El resultado de programar el modelo GAP, en el software LINGO 17.0, es el cluster que le corresponde a cada vehículo, es decir, el grupo de puntos de recogida que le corresponde a cada camión recolectar.

Vehículo S_j	**Punto de recogida *i* asignado al cluster *j***
S1 = Camión 1	1 2 3 4 5 6 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 31 32 33 34 35
S2 = Camión 2	7 25 26 27 28 29 30 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59

Tabla 5.4: Asignación de puntos de recogida a cada vehículo.
Fuente: Elaboración propia con base a los resultados de LINGO 17.0.

Vehículo S_j	**Puntos de recogida**	**Paradas por puntos**	**Cantidad de residuos (kg)**
S1	28	100	13.912
S2	31	106	13.915

Tabla 5.5: Validación resultados de asignación.
Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 5.4 muestra el grupo de puntos de recogida, específicamente el número del calles que le corresponde recolectar a cada uno de los camiones. Se puede apreciar, que en el caso de camión 1, se le asignan 28 puntos de recogida que contienen en total 100 paradas y en el caso de camión 2, se le asignan 31 puntos de recogida que contienen en total 106 paradas.

Para validar los resultados, se presenta la Tabla 5.5. En ella se demuestra que el trabajo que deberán efectuar los vehículos esta equilibrado. La evidencia de esto es que el total de puntos de recogida está dividido en 47% y el 53% , el total de paradas en 49% y 51% y la cantidad de residuos sólidos que recolecta cada conjunto de puntos es de 14 toneladas. Demostrando que ambos vehículos de distribuyen el sector de manera equitativa y que además sus capacidades están al 99% de rendimiento. Las ubicación de cada una de las paradas se pueden revisar en el Anexo 1, Anexo 2 y Anexo 3.

La solución obtenida por el GAP, presenta dos nuevas distribuciones de áreas en donde se agrupan los nuevos conjuntos de paradas, la primera representada en la Figura 5.6 por el color lila con un área de 0.680 km y la segunda por el color celeste con un área 0.746 km . Datos calculados en la pagina https://www.freemaptools.com/.

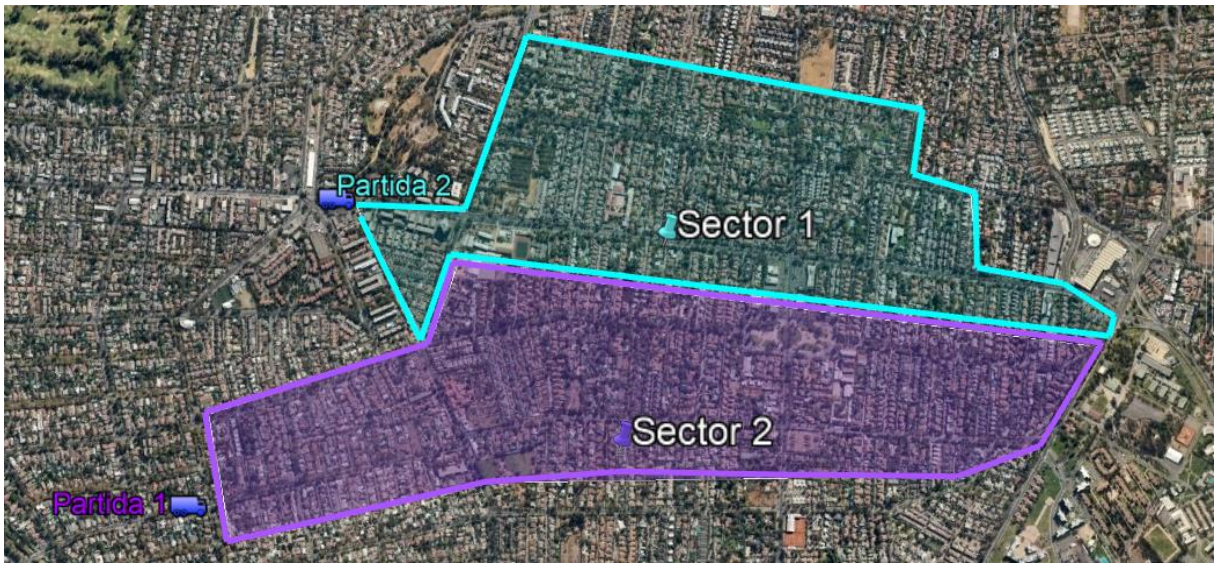


Figura 5.6: Áreas delimitadas para cada uno de los dos cluster formados, en base a los resultados del modelo GAP.
Fuente: Elaboración propia, en base a programación LINGO 17.0.

Ahora que ya se tienen agrupado los puntos de recogida que atenderá cada vehículo y delimitados los 2 cluster, se da paso a las segunda etapa del microruteo, que corresponde al diseño del recorrido por medio de la programación del problema del agente viajero, que se deberá realizar en cada una de estas nuevas zonas, definiendo los puntos por donde pasará el vehículo recolector en cada cluster y el orden de recorrido que tendrán.

5.6. Transformación de una red de CARP a una ACVRP

Sea R el conjunto de arcos (i,j) obligados a recorrerse y llamaremos vértice saliente a j y vértice entrante a i.

Para hacer la transformación de una instancia de CARP dirigido a un problema de ruteo de vehículos capacitados asimétrico ACVRP, primero se asocia a cada arco obligado a recorrerse en el CARP un nodo en el ACVRP, el cual hereda la demanda asociada al arco, manteniendo el nodo de inicio de ruta. En una segunda etapa se calcula la trayectoria más corta entre cada vértice saliente j (incluyendo el vértice deposito 0) y para cada vértice entrante h (incluyendo el vértice deposito 0), para cada par de vértices (i, j);(h, l) $\in$ R. En el caso de la trayectoria más corta desde j agregar la distancia dist (i, j). El resultado de esta transformación es una gráfica con m + 1 vértices y a lo más m^2 + m arcos, los cuales definen una instancia de ACVRP (Maniezzo, 2004).

Figura 5.7: Ejemplo de transformación de CARP a CVRP.
Fuente: Elaboración propia.

Después se define que sea R el conjunto de arcos (i,j) obligados a recorrerse donde llamaremos vértice saliente a j y vértice entrante a i, entonces el cruce por las esquinas del mapa será obligatorio, lo cual permitirá recoger la mayoría de la basura dentro del camino y tener visibilidad del recojo en todas las calles, ya que se podrá visualizar desde las esquinas si la basura de las calles ha sido recogida. Además en el resultado propuesto se debe asegurar que los arcos recorridos obligatorios sean las avenidas principales. En los nuevos mapas propuestos, se ha determinado cada arco como una variable, compuesta de dos nodos, que son las esquinas de las calles.

5.7. Programación del Problema del Agente Viajero.

Como se ha mencionado anteriormente la segunda fase para resolver el problema de ruteo consiste en resolver un Problema de Agente Viajero (TSP) donde se tiene como función objetivo en este caso de estudio, encontrar una secuencia en recolección en donde se recorra la menor cantidad de kilómetros, y que permita recolectar toda la basura dentro de cada uno de los cluster.

En por eso que en esta etapa se crea una ruta que visite a todos sus clientes. Las restricciones de capacidad se consideran en la primera etapa, asegurando que la demanda total de cada cluster no supere la capacidad del vehículo.

5.8. Modelo Matemático de un TSP

La formulación de la programación entera de un problema del agente viajero es representada de la siguiente manera:

Sea: $G = (V, A)$ donde $V = \{1, \dots, n\}$ es el conjunto de nodos, correspondiente a las esquinas de la red vial (intersecciones de las calles) y $A = \{(i, j) : i, j \in A\}$ el conjunto de arcos, representando a las calles donde se ubican los puntos de recogida. Sea C_{ij} el costo asociado al arco (i, j) , y x_{ij} la variable de decisión. Donde la función objetivo y las restricciones son :

$$Minimizar \sum_{j=1}^{m} \sum_{i=1}^{n} c_{ij} * x_{ij} \qquad (5.5)$$

S.a

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 1 \quad , \quad j = 1, \dots, n \qquad (5.6)$$

$$\sum_{j=1}^{m} x_{ij} = 1 \quad , \quad i = 1, \dots, n \qquad (5.7)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad , \quad \forall (i, j) \in V \qquad (5.8)$$

El modelo presenta en (5.5) la minimización de c_{ij} en función a los arcos seleccionados x_{ij}, con restricciones (5.6) y (5.7), las cuales aseguran que un solo camión atenderá a una determinada parada, (5.8) declara que x_{ij} esta en función de una variable binaria. Pero a la formulación de programación entera para TSP, es necesario añadir restricciones para eliminar los subtours que son formados por nodos intermedios. A continuación se presentan las restricciones (5.9), propuestas por Miller-Tucker-Zemlin.

$$u_i - u_j + p x_{ij} \leq p - 1,1 \leq i \neq j \leq n \qquad (5.9)$$

Donde, p denota el máximo número de paradas que pueden ser visitadas por un camión.

5.9. Pseudocódigo para la programación del modelo TSP

El modelo matemático TSP se programa en un software LINGO 17.0. Este modelo utiliza los parámetros de entrada descrito anteriormente y se programa con el siguiente pseudocódigo:

```
SETS:
CITY/1.. 22/:U;
LINK(CITY,CITY):DIST,X;
ENDSETS

 DATA:
        DIST =;
 ENDDATA

MIN = @SUM(LINK:DIST*X);

 @FOR(CITY(K):
        @SUM(CITY(I)|I #NE# K: X(I,K)) = 1;
        @SUM(CITY(J)|J #NE# K: X(K,J)) = 1;

 @FOR(CITY(J)|J #GT# 1 #AND# J #NE# K:
        U(J)>= U(K)+X(K,J)-(N-2)*(1-X(K,J))+(N-3)*X(J,K)););

 @FOR(LINK:@BIN(X));

 @FOR(CITY(K)|K#GT#1:
        U(K)<= N-1-(N-2)*X(1,K);U(K)>=1+(N-2)*X(K,1));

END
```

En el código se define en SETS el número de nodos a visitar, el alcance de nodo a nodo en términos de distancia y de variable de decisión. En DATA se define el conjunto de parámetros que se introducen, que son las distancias de todos los nodos con todos los nodos en forma de matriz. En MIN de define la función objetivo que consiste en minimizar la distancia recorrida en el circuito. Las restricciones garantizan la asignación de cada parada de un único camión recolector y por último se viene la restricción de eliminar los sub-tours que se pudieran llegar a formar. En el Anexo 5 y Anexo 6 se pueden encontrar las matrices de input para el modelo.

5.10. Resultados del modelo TSP

Los resultados de la programación, del modelo de agente viajero en el software LINGO 17.0, son los puntos que el camión debe recorrer para recolectar todas las paradas de generación de basura dentro de cada cluster y la secuencia en que deben ser recorridos, como se muestran en las Tabla 5.6.

Cluster	Secuencia de nodos a recorrer
Sector 1 = RUTA 1	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Sector 2 = RUTA 2	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22

Tabla 5.6: Secuencia de recorrido por cada cluster.
Fuente: Elaboración propia.

El resultado de las secuencias, coincide con el orden que se le asigno de manera aleatoria a cada uno de los nodos. Una vez divida la zona estudiada, se reasignan los números a cada nodos, no necesariamente coincidente con el número de calle que se le asigno para realizar el modelo GAP.

Con la secuencia de recolección en cada uno de los cluster, ya definida, se realiza una representación gráfica en Google Earth, de los nodos y el orden de recogida que efectuarían los vehículos en las Figuras 5.6 y 5.7.

Figura 5.8: Representación del recorrido del primer cluster.
Fuente: Elaboración propia.

El color lila de la Figura 5,6 representa la ruta propuesta por solución LINGO 17,0 (Anexo 7), y el color blanco representa las calles por las son el personal debe acercar la basura depositada en la acera al punto de parada del vehículo recolector, que en promedio según Google Maps son distancias que recorriéndolas de nodo a nodo una persona caminando se demora 4

minutos, donde en la realidad de la recolección de basura, se recogería la mitad de la calle cuando el vehículo está parado en uno de los nodos y la otra mitad cuando este en el nodo contrario.

Lo mismo ocurre con la Figura 5,7 donde el color celeste representa el camino que deberá recorrer el vehículo en el segundo cluster (Anexo 8), y en color blanco las calles donde los auxiliares de recolección deben acercar la basura hacia el camión. En este caso son 5 las calles que se podrían recolectar caminando, demorando la misma cantidad de tiempo mencionado para el sector anterior.

Figura 5.9: Representación del recorrido del segundo cluster.
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 5.7 se comparan las distancias a recorrer por cada cluster con el agregado de área de trabajo al sector 464 y con la solución propuesta de ruteo. En ella se puede apreciar, que al aplicar la solución propuesta, se pude disminuir 18,3 kilómetros equivalentes a una reducción de un 62% en la cantidad de kilómetros para recoger la basura ubicado en todo el sector del vehículo.

Distancias recorridas por cluster en el sector 464 (metros)

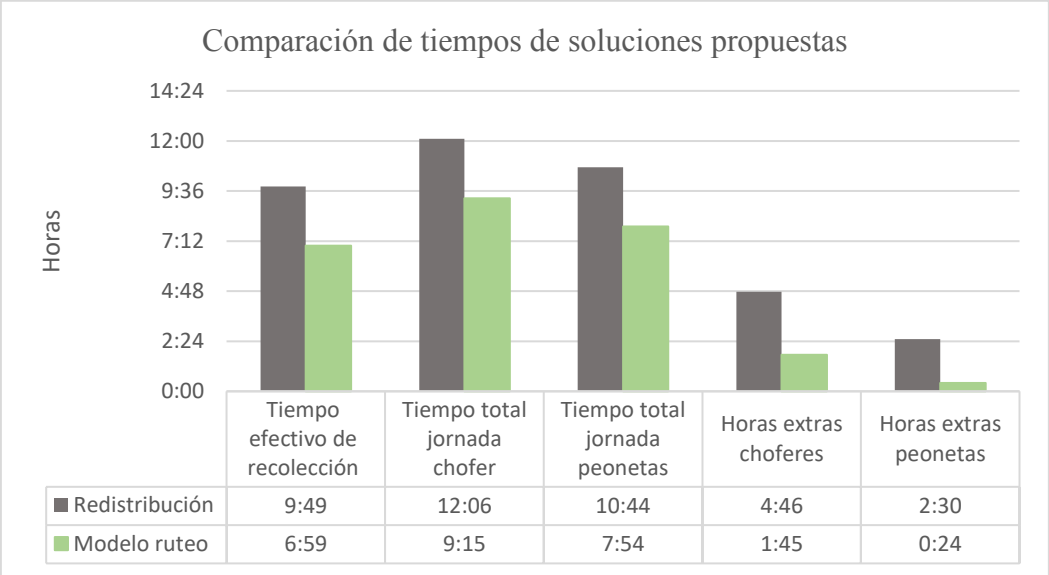
Cluster	Con distribución propuesta	Con aplicación de modelo
1	9.191	4.840
2	20.550	6.610
Total:	**29.741**	**11.450**

Tabla 5.7: Distancias recorridas, en el proceso de recolección del sector 464, con cada aplicación de solución.
Fuente: Elaboración propia.

La solución propuesta no solo reduce los kilómetros recorridos, sino que también, permite equilibrar el recorrido de ambos conjuntos de puntos. El sector 464, con la distribución de sectores propuesta, debería recorrer para recolectar el segundo cluster 2,2 veces la distancia que recorre para recoger el primer cluster. Esta situación cambia cuando se aplica la solución propuesta de ruteo ya que, permite disminuir esta diferencia a 1,4 veces, repartiendo las distancias de manera más equitativa.

Para realizar un análisis de los resultados de la aplicación del modelo de ruteo, es necesario definir que la reducción de kilómetros recorridos fue solo en el proceso de recolección de basura, y no a las distancias de traslado. La distancia de traslado corresponde a 121,6 kilómetros, por lo que con la distribución del sector de trabajo para el vehículo 464 se deberán recorrer 151,4 kilómetros en total diariamente pero, con la aplicación de solución de ruteo esta distancia disminuiría a 133,1 kilómetros, es decir se logra reducir en un 12% lo que debe recorrer el vehículo en el circuito completo.

Reducir las distancias recorridas en el sector, generan una disminución en los horarios de trabajo del personal. En la Figura 5.10, se presentan los tiempos que llevaría recolectar el sector con la redistribución propuesta y con la aplicación del modelo de ruta.



	Tiempo efectivo de recolección	Tiempo total jornada chofer	Tiempo total jornada peonetas	Horas extras choferes	Horas extras peonetas
Redistribución	9:49	12:06	10:44	4:46	2:30
Modelo ruteo	6:59	9:15	7:54	1:45	0:24

Figura 5. 10: Comparación de parámetros diarios afectos a la variables de kilómetros recorridos.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5.10 se puede apreciar lo significativo que es reducir un 12% la cantidad de kilómetros recorridos por el vehículo, ya que todas las columnas, que representan el tiempo en horas, disminuyen al aplicar el modelo de solución demostrando que las jornadas laborales pueden ser mejoradas y en consecuencia, reducir las horas extras de trabajo para el personal de aseo.

En la Tabla 5.8 se muestra más detalladamente cuales fueron los porcentajes de reducción que tuvieron los tiempos involucrados en la recolección. La jornada laboral de los choferes se reduce en 3 horas diariamente, y las de los auxiliares en 2 horas. Esto a su vez genera, que las horas extras necesarias para recolectar el sector bajen de las 4,8 horas a solo 1,75 horas para los choferes, y para los peonetas de las 2,5 horas a casi 0,4 horas.

Sector 464	Redistribución	Modelo ruteo	% reducción
Tiempo efectivo de recolección	9:49	6:59	29%
Tiempo total jornada chofer	12:06	9:15	24%
Tiempo total jornada peonetas	10:44	7:54	26%
Horas extras choferes	4:46	1:45	63%
Horas extras peonetas	2:30	0:24	84%

Tabla 5.8: Comparación de tiempos entre las soluciones propuestas y su porcentaje de ahorro
Fuente: Elaboración propia.

Los horarios presentados en la tabla anterior también evidencian que sugerir implementar solo un macroruteo o redistribución de sectores de trabajos no es una solución viable ya que, el aumento en la jornada laboral es significativo a pesar de disminuir la cantidad de números de vehículos necesarios para recolectar las zonas. Esto no solo generaría un aumento en los costos, sino que también incrementaría la tensión existente entre el personal de aseo y la empresa por las condiciones laborales.

La aplicación del modelo de solución de ruta genera entonces una reducción de kilómetros, que además de mejorar los horarios laborales, produce un efecto de disminución en los costos asociados, como los costos de horas extras, combustible y mantenciones.

La Tabla 5.9 presenta los costos anuales en los que se debería incurrir, con la aplicación de la redistribución y después con el modelo de solución propuesto. En ella se puede apreciar, que el modelo de solución permite generar ahorros de hasta $5 millones de pesos anuales, siendo el ahorro más significativo, el de las horas extras de los 4 auxiliares o peonetas que trabajan junto al vehículo 464.

Sector 464	Redistribución	Modelo solución	Ahorro
Horas extras choferes	$2,50	$0,90	$1,50
Horas extras peonetas	$3,20	$0,50	$2,70
Costo en combustible	$4,17	$3,66	$0,51
Costo en mantenciones	$2,52	$2,20	$0,32
Total	**$12,39**	**$7,26**	**$5,03**

Tabla 5.9: Comparación de costos entre las soluciones propuestas y el ahorro obtenido.
Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 6 : ANÁLIS DE RESULTADOS

En este capítulo se realizará una validación de los resultados obtenidos en los capítulos anteriores que comprueben que los resultados obtenidos son los esperados, y un análisis de los costos asociados a la recolección de residuos sólidos antes y después de implementar el modelo de solución de optimización de rutas.

6.1. Validación de Resultados

Para validar los resultados obtenidos de la aplicación del modelo de solución, es que se realiza una breve comparación entre dos situaciones. La primera representa los resultados de la redistribución y la segunda la situación después de aplicar el modelo de ruteo.

La finalidad de la validación es comprobar y demostrar que los problemas expuestos en este trabajo, pueden ser solucionados mediante un modelo de minimización de distancias recorridas.

Lo primero que se corrobora es que las cargas de trabajo laboral del personal de aseo, sea lo más equitativa posible. La Figura 6.1 presenta un resumen de los resultados obtenidos, en las situaciones nombradas anteriormente.

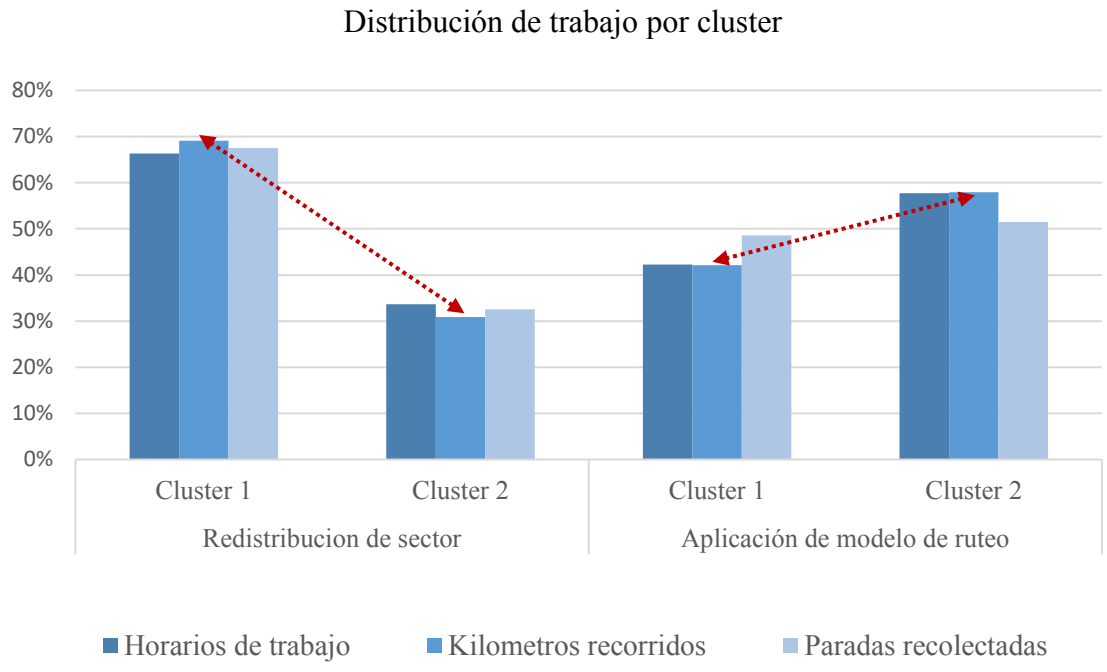


Tabla 6.1: Comparación de parámetros en las situaciones de solución propuestas.
Fuente: Elaboración propia

En ella se puede apreciar que en la primera situación, los trabajos de recolección son desproporcionados ya que, el cluster 1 contiene el 68% de la carga de recogida de basura, mientras que el cluster 2 solo el 32%. Con la solución propuesta, se logra balancear los trabajos en cada uno de los cluster, permitiendo que la distribución de recolección sea en promedio de 44% -56%.

Lo segundo punto por comprobar es si la reducción de los kilómetros necesarios para recolectar el sector 464, disminuyen los tiempos del proceso, jornada laboral y horas extras. Este resultado ya fue presentado en el capítulo anterior, demostrando que la aplicación del modelo de solución puede acortar las jornadas laborales y por consecuencia las horas extras del personal.

La inexistencia de un diseño de planificación de ruta, dejaba en manos de los conductores el orden de las calles a recolectar. Esto provocaba que muchas veces los vehículos, en sus sectores de trabajos, transiten más de una vez la misma calle es por eso que el modelo presentado en este trabajo, también genera cambios ante esta situación.

Como se ha mencionado anteriormente en este trabajo, la redistribución de los sectores, implica que el sector 464 recolecte su área de trabajo y un 52% del área del sector 912. Por consiguiente el vehículo deberá recorrer 29,8 kilómetros en el proceso de recolección. En este recorrido existen momentos en que el camión solo se traslada de una calle a otra, sin necesariamente recoger basura, por lo que a este recorrido se le llamará improductivo.

En la Tabla 6.2, se muestran los kilómetros y el tiempo del proceso improductivos. Que corresponden a 9 kilómetros, equivalentes a un tiempo de 3 horas. Este porcentaje de improductividad es de un 30%.

Recorrido y tiempo improductivo

Sector	Kilómetros recorridos	Tiempo en recorrer	Kilómetros no productivos	Tiempo no productivo
464	20,6	6:30	6,3	1:59
912	9,2	3:19	2,7	0:58
Total	**29,8**	**9:49**	**9**	**2:57**

Tabla 6.2: Kilómetros y tiempos productivos e improductivos.
Fuente: Elaboración propia.

La aplicación del modelo de solución al sector, elimina los kilómetros recorridos improductivos y por consiguiente sus costos asociados. El recorrido que es improductivo, equivale a cerca de $396.151 pesos anuales por costos de combustible y mantención, solo en el sector 464 de la zona 1.

Una vez que se comprueba que el modelo de solución distribuye la carga laboral de forma más equitativas, que disminuye tiempos y que además elimina el recorrido improductivo, se puede validar el modelo de ruteo. Por lo que en el paso siguiente corresponde analizar si se logra reducir los costos asociados a la recolección y en consecuencia, aumentar las utilidades operacionales.

6.2. Análisis de Costos y Resultados

La primera etapa de esta memoria plantea una nueva distribución de sectores. Para eso se realizó un modelo de macroruteo que presenta como resultado, que cada una de las zonas, se puede recolectar con 4 vehículos. Esto provoca que los sectores de trabajo aumenten en área para que no quede lugar sin recoger.

Esta primera solución propuesta, generaría que las utilidades operativas aumenten en un 13%, cerca de $28,9 millones anuales más por recolectar la comuna de La Reina.

Ingresos y costos del proceso de recolección	CON 6 VEHICULOS		CON 4 VEHICULOS	
	Mensual	Anual	Mensual	Anual
+ **Ingreso por servicio de recolección**	**$24,5**	**$294,0**	**$24,5**	**$294,0**
Sueldo base Choferes	$2,9	$34,6	$1,9	$23,2
Sueldo base Auxiliares	$7,0	$83,5	$4,6	$55,7
Horas extras Choferes	$0,8	$9,7	$2,2	$26,2
Horas extras auxiliares	$0,0	$0,0	$1,5	$18,1
Costo en combustible y lubricante	$4,3	$51,6	$2,9	$34,5
Costo en mantenciones	$2,6	$31,0	$1,7	$20,7
Costos en seguros vehiculares	$0,7	$8,4	$1,0	$11,9
- **Total costos recolección**	**$18,3**	**$218,8**	**$15,8**	**$190,2**
= **Utilidad bruta**	**$6,2**	**$75,2**	**$8,7**	**$103,8**

Tabla 6.3: Comparación de balance operativo, en millones de pesos, entre situación actual y macroruteo.
Fuente: Elaboración propia.

La disminución en el número de vehículos para recolectar las zonas, genera una reducción del personal necesario provocando un ahorro por conceptos de sueldos del personal de un 33%, equivalente a 39,2 millones de pesos anuales. Los costos de combustible, mantenciones y seguros también se ven afectados de manera positiva, logrando ahorros de un 26%, equivalente a unos $23,6 millones anuales.

Como se ha mencionado anteriormente, la reducción de vehículos tiene como consecuencia que los sectores aumenten su área de trabajo, es por eso que los ítem de horas extras son 4,6 veces sus costo inicial, los cuales son equivalente a un incremento de $34,6 millones de pesos anuales.

La primera solución propuesta genera aumento en la utilidad bruta, pero también incrementaría el problema de horarios laborales, ya que las horas extras de los choferes serian de cerca de 6 horas y las de los auxiliares de 5 horas diarias. Por lo tanto, esta no sería una solución válida para el problema presentado en este trabajo.

Es por lo anterior, que después de cuantificar los vehículos necesarios para recolectar las zonas y realizar una redistribución, es que se presenta un modelo de solución de optimización de ruta con el objetivo de minimizar los kilómetros recorridos, que a su vez permita aumentar las utilidades de la empresa, pero también, mantener dentro de los márgenes los horarios laborales.

Una vez lograda la función objetivo, se estudian los cambios provocados por la disminución de los kilómetros recorridos en el sector del vehículo 464. Cuando se aplica el modelo solución a la nueva distribución de ese sector, se obtienen los resultados presentados en la Tabla 6.4. En ella se puede apreciar, que todos los parámetros que están influenciados por la cantidad de kilómetros recorridos, disminuyeron después de aplicar el modelo de optimización de ruta propuesto.

Sector 464	Redistribución	Modelo ruteo	% de reducción
Kilómetros recorridos solo recolectando	29,7	11,5	61%
Kilómetros recorridos total circuito recolección	151,3	133,1	12%
Tiempo efectivo de recolección	9:49	6:59	29%
Tiempo total jornada chofer	12:06	9:15	24%
Tiempo total jornada auxiliares	10:44	7:54	26%
Horas extras choferes	4:46	1:45	63%
Horas extras auxiliares	2:30	0:24	84%
Horas extras choferes	$2,5	$0,9	64%
Horas extras auxiliares	$3,2	$0,5	84%
Costo en combustible	$4,2	$3,7	12%
Costo en mantenciones	$2,5	$2,2	13%
Total costos variables	**$12,4**	**$7,3**	**41%**

Tabla 6.4: Comparación de parámetros entre las soluciones de maro y micro ruteo en el sector del vehículo 464.
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados indican que la reducción de un 12% en la cantidad de kilómetros recorridos en el circuito de recolección efectivo, genera que la jornada laboral de choferes y auxiliares disminuya en 24% y 26% respectivamente. Esto equivale a una baja en las horas extras necesarias para el personal, en un 63% para los choferes y en un 84% para los auxiliares, equivalentes a una reducción de 3 horas y 2 horas respectivamente.

Los costos de combustible se redujeron en un 12% y los de mantención un 13%. Estos porcentajes son equivalentes a un ahorro monetario de $0,5 y $0,3 millones anuales en el sector. Sumando entre los costos de horas extras, combustible y mantención, un ahorro de $5,3 millones de pesos en el sector.

Si se aplicara el modelo de solución de diseño de ruta al resto de los sectores, y se trabajara bajo el supuesto de que la reducción de los kilómetros recorridos en el proceso productivo de

recolección fueses de un 55%, y no de un 62% como se obtuvo en el sector 464, se obtendría que el resto de los tres sectores que son recolectados por los vehículos números 910, 462 y 908 disminuyen la cantidad de kilómetros. La cantidad reducida se expone en los datos entregados en la Tabla 6.4 .

	Redistribución de Sectores					Aplicación de Modelo Solución					
Sectores, Zona 1	**464**	**910**	**462**	**908**	**Promedio**	**464**	**910**	**462**	**908**	**Promedio**	**Ahorro**
Kilómetros recorridos en recolectar sector	29,7	35,6	34,3	39,2	34,7	11,5	16,02	15,4	17,64	15,1	19,6
Tiempo en recolectar sector	9:49	11:52	11:26	13:04	11:32	6:59	9:04	8:44	9:59	8:42	2:50
Kilómetros recorridos total jornada	151,3	157,2	155,9	160,8	156,3	133,1	137,6	137,0	139,2	136,7	19,6
Tiempo total jornada chofer	12:06	14:09	13:43	15:21	13:49	9:15	11:21	11:01	12:16	10:58	2:50
Tiempo total jornada auxiliares	10:44	12:47	12:21	13:59	12:27	7:54	9:59	9:39	10:54	9:37	2:50
Horas extras choferes	4:46	6:39	6:13	7:51	6:22	1:45	3:51	3:31	4:46	3:28	2:53
Horas extras auxiliares	2:30	5:17	4:51	6:29	4:46	0:24	2:29	2:09	3:24	2:07	2:39

Tabla 6.5: Estimación de kilómetros y tiempos de cada vehículo con las aplicaciones del modelo de solución.
Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 6.4, demuestra que la aplicación del modelo de optimización de ruta logra reducir de 34,7 kilómetros promedios recorridos por cada uno de los 4 vehículos recolectores en el procedo efectivo de recolección, a solo 15,1 kilómetros promedio cada uno. Esto es equivalente a una disminución de 19,1 kilómetros diarios por vehículo.

La reducción de kilómetros, genera una reducción en las horas trabajadas por los choferes y los auxiliares 2,8 horas en sus jornadas laborales por sector.

Si se transforman los kilómetros y tiempos disminuidos a costos, la estimación de ahorro por la aplicación de modelo solución, se puede apreciar en la Tabla 6.6, que representa los ahorros en millones de pesos por la optimización de ruta.

	Redistribución de Sectores					Aplicación de Modelo Solución					
Costos anuales:	**464**	**910**	**462**	**908**	**Total**	**464**	**910**	**462**	**908**	**Total**	**Ahorro**
Costo horas extras choferes	$2,5	$3,6	$3,3	$3,7	$13,1	$0,9	$2,1	$1,9	$2,6	$7,4	$5,7
Costo horas extras peonetas	$3,2	$2,2	$1,6	$2,1	$9,0	$0,5	$1,2	$1,1	$1,1	$4,0	$5,1
Costo en combustible	$4,2	$4,3	$4,3	$4,4	$17,2	$3,7	$3,8	$3,8	$3,8	$15,1	$2,2
Costo en mantenciones	$2,5	$2,6	$2,6	$2,7	$10,4	$2,2	$2,3	$2,3	$2,3	$9,0	$1,3
Total costos anuales	**$12,4**	**$12,7**	**$11,8**	**$12,9**	**$49,7**	**$7,3**	**$9,4**	**$9,1**	**$9,8**	**$35,5**	$14,2

Tabla 6.6: Estimación de costos en cada vehículo con las aplicaciones del modelo de solución.
Fuente: Elaboración propia.

Los costos por concepto de horas extras de los choferes serian en promedio de $7,4 millones anuales, y los de los auxiliares $4,0 millones anuales, si se aplicara el modelo de solución a todos los sectores de la Zona 1. Entre ambos el ahorro provocado podría ser de $10,8 millones de pesos anuales. Los costos de combustible pasarían de ser $17,2 a $15,1 millones anuales y los de mantenciones de $10,4 a $9,0 millones anuales, un ahorro equivalente entre ambos mencionados de $3,5 millones anuales. En total el ahorro producido por el modelo de solución sería de $14,2 millones de pesos anuales por los 4 vehículos de la Zona 1.

Cuando se extrapolan los resultados a la totalidad de la zona de la comuna de La Reina, con 4 vehículos recolectores por zona, se pueden establecer entonces tres situaciones. La primera con la situación actual de recolección, la segunda con la aplicación del modelo de macroruteo o redistribución de zonas, y la tercera cuando a esta última se le aplica el diseño de ruta y optimización de los kilómetros recorridos.

Para la analizar los resultados de las tres situaciones presentadas anteriormente, se expone la Tabla 6.7, donde muestra todos los costos asociados en cada una de ellas.

Ingresos y costos del proceso de recolección	**CON 6 VEHICULOS**		**CON 4 VEHICULOS**		**CON 4 VEHICULOS + RUTEO**	
	Mensual	**Anual**	**Mensual**	**Anual**	**Mensual**	**Anual**
+ **Ingreso por servicio de recolección**	**$24,5**	**$294,0**	**$24,5**	**$294,0**	**$24,5**	**$294,0**
Sueldo base Choferes	$2,9	$34,6	$1,9	$23,2	$1,9	$23,2
Sueldo base Auxiliares	$7,0	$83,5	$4,6	$55,7	$4,6	$55,7
Horas extras Choferes	$0,8	$9,7	$2,2	$26,2	$1,2	$14,8
Horas extras auxiliares	$0,0	$0,0	$1,5	$18,1	$0,7	$8,0
Costo en combustible	$4,3	$51,6	$2,9	$34,5	$2,5	$30,1
Costo en mantenciones	$2,6	$31,0	$1,7	$20,7	$1,5	$18,1
Costos en seguros vehiculares	$0,7	$8,4	$1,0	$11,9	$1,0	$11,9
- **Total costos recolección**	**$18,3**	**$218,8**	**$15,8**	**$190,2**	**$13,4**	**$161,8**
= **Utilidad bruta**	**$6,2**	**$75,2**	**$8,7**	**$103,8**	**$11,1**	**$132,2**

Tabla 6.7: Comparación de balance operativo entre situación actual, macroruteo e implementación de optimización de ruta en millones de pesos.
Fuente: Elaboración propia.

Los costos totales de recolección varían según sea la situación. En la primera situación, situación actual, los costos totales corresponden a $218,8 millones anuales para la empresa. Si en base a la primera situación se logra disminuir la cantidad de vehículos recolectores y redistribuir las zonas, manteniendo los mismo kilómetros y cantidades recolectadas, los costos disminuirían a $190,2 millones de pesos anuales. La redistribución o macroruteo podría llegar a aumentar las utilidades brutas de la empresa a $103,8 millones anuales, equivalentes a 38% más de utilidades que las actuales.

Una aplicación de un diseño de ruta, que optimice los kilómetros recorridos por cada uno de los vehículos, podría aumentar aún más las utilidades de la empresa, logrando reducir los costos de $190,2 a $161,8 millones anuales, alcanzando un incremento en las utilidades de un 75% en comparación con la primera situación y de un 28% con respecto a la segunda situación. La empresa podría llegar a generar utilidades de $132,2 millones de pesos anuales si se aplicara el modelo de diseño de rutas.

La Tabla 6.7 también demuestra que las condiciones del proceso de recolección pueden mejorar si se aplica un diseño completo de modelo de solución, que involucre macro y microruteo convirtiendo el proceso de recolección de basura en la comuna de La Reina y en otras comunas, sea un proceso eficiente.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para la investigación sobre recolección de basura y modelos de ruteos que podrían aplicarse a este sistema se encontraron trabajos existentes en la literatura como artículos y memorias con aplicaciones de modelos de ruteo para la recolección de residuos sólidos domiciliarios, y aunque en comparaciones con otros temas, la información es acotada, en todos los casos estudiados se obtuvo como solución una mejora en el proceso de recolección por medio de la reducción en los kilómetros que se recorren en el proceso. Este trabajo no fue la excepción, ya que se obtuvieron los mismos resultados encontrados en la investigación, disminuyendo kilómetros recorridos y reduciendo variables como kilómetros y tiempos ociosos, costos de combustible, mantenciones, seguros y costos por horas extras.

Estos beneficios se extienden a los trabajadores ya que, las cargas laborales de las patrullas de aseo son más equitativas y se logra una reducción en las horas extras de los trabajadores, mejorando los horarios laborales y las relaciones entre empresa y personal.

El trabajo se enfocó en la etapa de recolección efectiva, la cual es una de las etapas más costosas dentro del total de las etapas de gestión de residuos sólidos que son la generación, recolección, transferencia, selección y disposición final. En esta etapa están presentes problemas asociados a la planificación de ruta, la cual es dirigida por la experiencia del personal, no por un modelo que determine las trayectorias de los camiones recolectores, que considere variables como la demanda, capacidades de las cajas compactadoras y direcciones de calles, lo que origina problemas de horarios de trabajos, desigualdad en la carga laboral en los sectores, calles en donde los vehículos recolectores transitan más de una vez y lugares en donde que se dejan sin recolectar.

Para dar solución a los problemas presentados, primero fue necesario determinar qué tipo de modelo de ruteo era el que mejor representaba al tipo de sistema de recolección en la comuna, por lo que se definió que el problema se abracaría como un problema de ruteo de vehículos capacitados sobre arcos (CARP), que es lo que recomienda la literatura en el caso de recolección por acera. La resolución de este tipo de modelo de optimización conlleva complejidad y costos computacionales involucrados por lo que se define también que la solución se aplicará en dos fases, en la primera se realiza un macroruteo para determinar el número de vehículos necesario para recolectar la zona y realizar una nueva sectorización de trabajo y luego la segunda fase, en donde se trabaja en un microruteo, en donde se le aplica a esta nueva sectorización la solución heurística de Fisher & Jaikumar, de agrupar primero y después rutear.

De primera fase de la solución propuesta, se logró reducir el número de vehículos y por consecuencia sectores de trabajo de la Zona 1 de la comuna de La Reina de seis sectores a solos cuatro. Esta primer acercamiento a la solución esperada logra reducir los costos gracias a la disminución en la cantidad de vehículos y personal que se determina que son necesarios, equivalente a un ahorro de $28,6 millones de pesos anuales en el proceso de recolección en la comuna. Aunque el ahorro es significativo, las condiciones laborales principalmente en los horarios de trabajo serian mayores que en la situación actual por lo que se debe seguir con la segunda fase del modelo de solución.

En la segunda fase se tiene como principal objetivo minimizar la distancia recorrida por los vehículos en el proceso de recolección de basura. Para ello se aplica el modelo de heurística de Fisher & Jaikumar, donde primero se agrupan los puntos de recolección y se le asignan a cada uno de los camiones, tomando en cuenta variables como la distancia, la cantidad de residuos por recoger en cada punto de recolección y la capacidad máxima del vehículos recolector. Una vez formados los cluster o grupos, se aplica el modelo de solución para resolver el problema, donde se realiza primero una trasformación del problema de ruteo de vehículos capacitados sobre arcos (CARP) a un problema de ruteo de vehículos capacitados asimétrico (ACVRP), para luego resolverlo como un problema de agente viajero (TSP).

El modelo de solución propuesto entrega resultados positivos ya que, se logra minimizar la distancia total recorridas en el circuito de recolección de residuos sólidos en un 12% lo que le permite a la empresa disminuir las distancias no productivas de recolección, y consigo reducir tanto los horarios laborales, principalmente las horas extras, como los costos asociados al proceso que son los costos de combustible y mantención donde se podría generar un ahorro de $5 millones de pesos anuales en el sector de recolección correspondiente al vehículo 464.

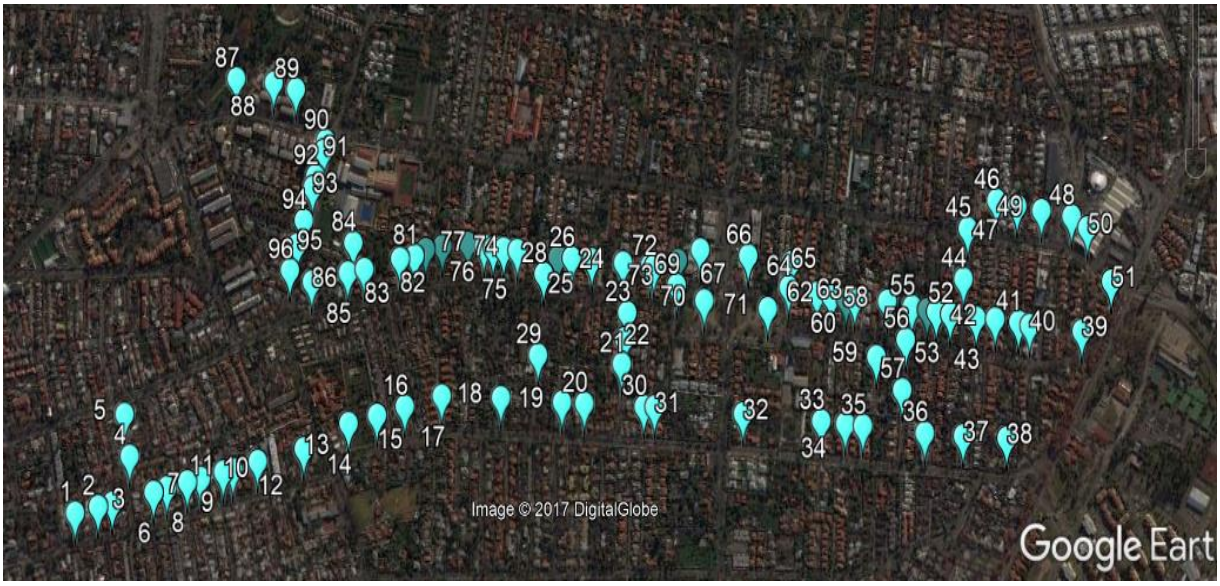
Los resultados obtenidos son los esperados en la presente memoria, ya que en general todas las variables afectas a la cantidad de kilómetros recorridos, mejoraron. Es por eso que también se presenta una situación en donde se estiman los resultados que se podrían obtener si el modelo de solución se aplicara en el resto de la zona 1 y en toda la comuna. Si se expandiera la solución al resto de los sectores los ahorros podrían ser de $57 millones anuales en comparación con la situación actual, aumentando las utilidades operacionales en un 75,8%.

Para los trabajos futuros se propone que el macroruteo se realice con el mismo modelo de agrupación generalizada (GAP) para definir de manera más exacta la sectorización de lugares de trabajos y número de vehículos recolectores necesarios para el servicio de aseo.

También se sugiere, que el modelo de solución planteado en el presente trabajo pueda ser llevado a cabo en cada uno de los sectores en el país recolectados por la empresa, ya que la implementación de un diseño de ruta tiene una potencialidad de ahorro de $1,7 mil millones de pesos anuales, solo si se logra alcanzar un ahorro de $3,5 millones de pesos anuales por cada uno de los cuatrocientos noventa y cuatro sectores en donde la empresa Dimensión recolecta residuos sólidos domiciliarios.

ANEXOS

Anexo 1: Representación de los 96 puntos de parada del primer sector o primera vuelta del vehículo 464.



Fuente: Elaboración propia, con información de GPS de la empresa.

Anexo 2: Representación de los 43 puntos de parada del segundo sector o segunda vuelta del vehículo 464.

Fuente: Elaboración propia, con información de GPS de la empresa.

Anexo 3: Representación de los 67 puntos de parada del sector del vehículo 912 que se adhiere al sector del vehículo 464.

Fuente: Elaboración propia, con información de GPS de la empresa.

Anexo 4: Relación de costos de clientes Ci con clientes semilla Sj (Input modelo GAP).

Cij	Semilla j		bij
Arco	Distancia 1 (metros)	Distancia 2 (metros)	Cantidad de RSD (Kg)
1	260	1100	371
2	500	1100	247
3	550	1400	989
4	1000	850	543
5	1300	850	1812
6	700	1100	725
7	1300	500	865
8	1300	1000	494
9	950	1000	552
10	1100	1200	543
11	1100	1200	247
12	1400	1100	247
13	1600	900	741
14	1300	1400	247
15	1500	1300	371
16	1700	1100	494
17	1500	1700	247
18	2000	1500	362
19	1800	1300	247
20	2000	1500	124
21	1800	1800	494
22	2100	2100	247
23	2300	2300	1038
24	2400	2000	494
25	2600	2100	124
26	2600	1800	618
27	3200	1900	244
28	2800	1700	122
29	2400	1700	247
30	2800	1400	1087

Cij	Semilla j		bij
Arco	Distancia 1 (metros)	Distancia 2 (metros)	Cantidad de RSD (Kg)
31	2700	1200	181
32	2500	1600	247
33	2300	2100	865
34	2300	1900	494
35	2800	1400	247
36	2200	800	1630
37	1800	650	122
38	2100	1000	244
39	1800	750	488
40	1600	500	244
41	1800	700	366
42	2000	900	366
43	2100	1000	244
44	2200	1100	244
45	2400	1300	122
46	2000	950	366
47	2500	1300	366
48	3100	1600	244
49	2300	1200	731
50	2600	1500	488
51	3100	1700	366
52	2800	1700	122
53	2600	1500	731
54	3300	2300	731
55	2400	1000	975
56	2800	450	244
57	1600	200	371
58	1700	1200	247
59	1800	800	552

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 5: Matriz de distancias entre todos los nodos (esquinas) cluster 1.

	Sector 1																	
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**
1	0	220	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	200
2	8000	0	450	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	210	8000
3	8000	8000	0	220	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	270	8000	8000
4	8000	8000	8000	0	230	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	230	8000	8000	8000
5	8000	8000	8000	8000	0	230	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	240	8000	8000	8000	8000
6	8000	8000	8000	8000	8000	0	160	8000	8000	8000	8000	8000	240	8000	8000	8000	8000	8000
7	8000	8000	8000	8000	8000	8000	0	350	8000	8000	8000	270	8000	8000	8000	8000	8000	8000
8	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	0	260	8000	210	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
9	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	0	210	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
10	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	210	0	350	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
11	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	210	8000	8000	0	400	8000	8000	8000	8000	8000	8000
12	8000	8000	8000	8000	8000	8000	270	8000	8000	8000	8000	0	230	8000	8000	8000	8000	8000
13	8000	8000	8000	8000	8000	240	8000	8000	8000	8000	8000	8000	0	170	8000	8000	8000	8000
14	8000	8000	8000	8000	240	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	0	300	8000	8000	8000
15	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	0	230	8000	8000
16	8000	8000	270	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	0	400	8000
17	8000	210	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	0	230
18	200	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	0

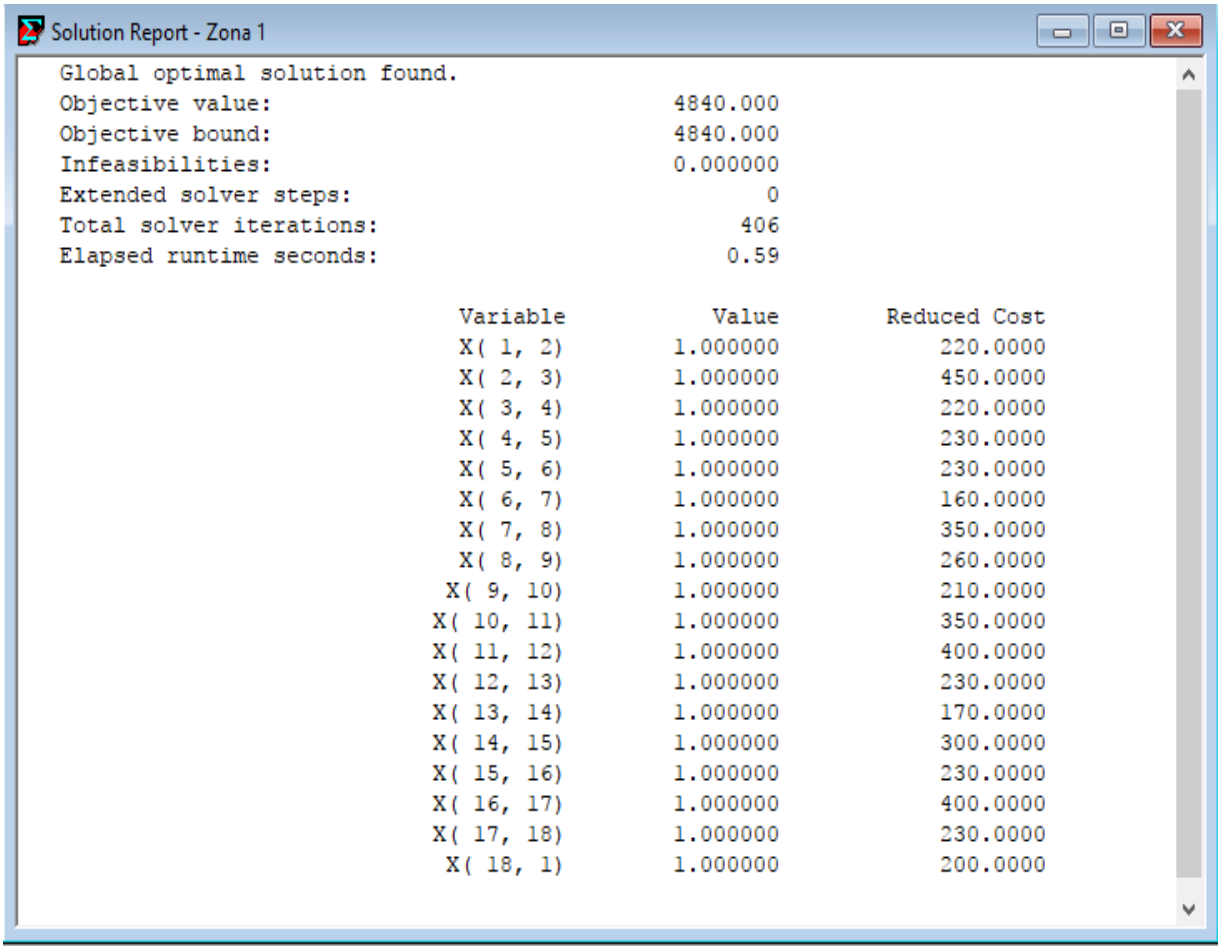
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 6: Matriz de distancias entre todos los nodos (esquinas) cluster 2.

	Sector 2																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	0	300	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
2	8000	0	850	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
3	8000	8000	0	700	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
4	8000	8000	8000	0	280	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
5	8000	8000	8000	8000	0	500	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
6	8000	8000	8000	8000	8000	0	190	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	450	8000	8000	8000
7	8000	8000	8000	8000	8000	190	0	180	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
8	8000	8000	8000	8000	8000	8000	180	0	180	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	280	8000	8000	8000	8000
9	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	180	0	300	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
10	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	0	300	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
11	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	300	0	150	8000	8000	8000	8000	180	170	8000	8000	8000	8000
12	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	150	0	200	8000	8000	180	8000	8000	8000	8000	8000	8000
13	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	200	0	180	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
14	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	180	0	210	8000	8000	8000	8000	8000	280	8000
15	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	0	230	8000	8000	8000	240	8000	8000
16	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	180	8000	8000	230	0	160	8000	8000	8000	8000	8000
17	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	180	8000	8000	8000	8000	160	0	300	8000	8000	8000	8000
18	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	280	8000	170	8000	8000	8000	8000	8000	8000	300	0	230	8000	8000	8000
19	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	230	0	550	8000	8000
20	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	240	8000	8000	8000	8000	0	270	8000
21	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	280	8000	8000	8000	8000	8000	8000	0	350
22	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	350	0

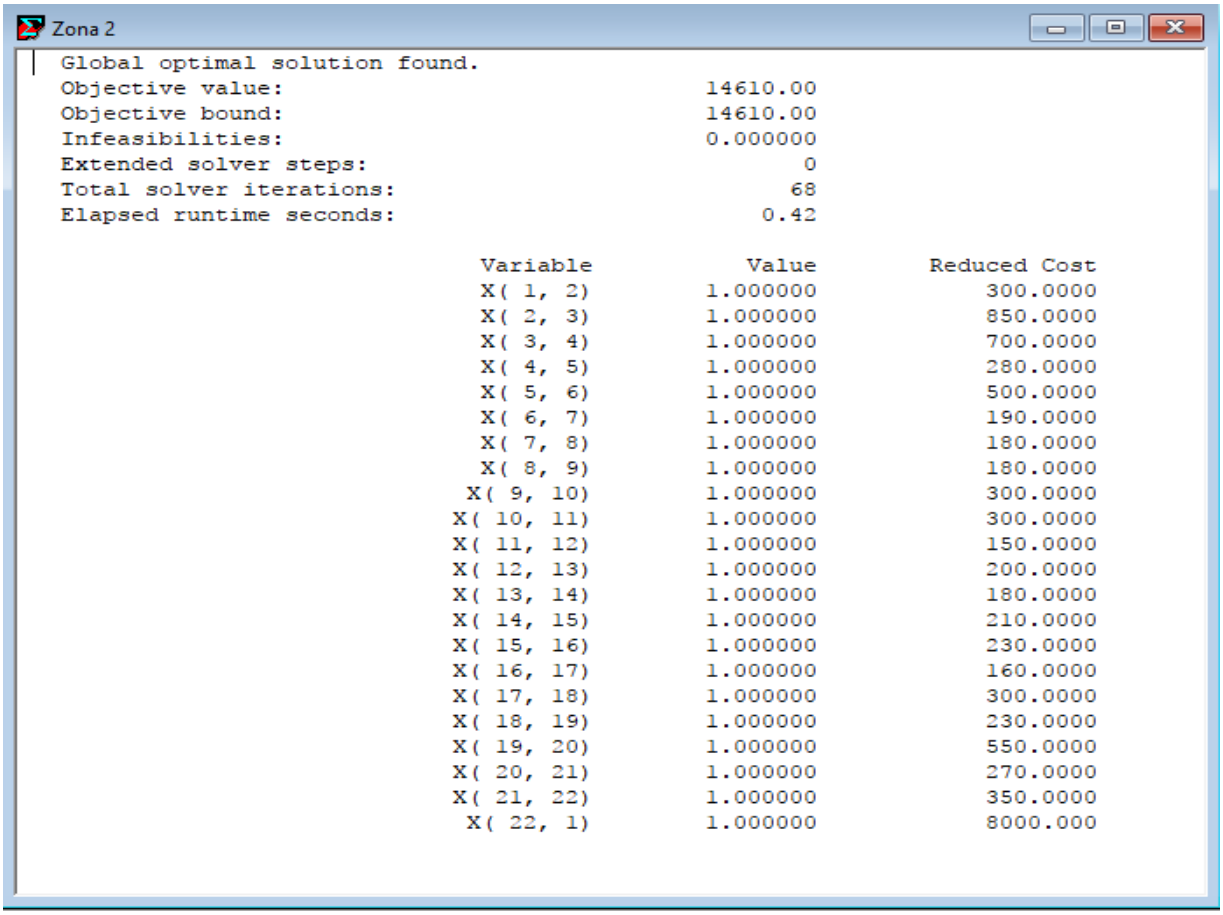
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 7: Resultado de LINGO 17.0 de la programación del modelo TSP para el sector 1.



Fuente: Resultados del programa LINGO 17,0.

Anexo 8: Resultado de LINGO 17.0 de la programación del modelo TSP para el sector 2.



Fuente: Resultados del programa LINGO 17,0.

Nota: El último punto (22,1) no se considera al momento de medir el recorrido completo, ya que el modelo lo considera solo porque como restricción debe volver al punto de inicio, pero en la realidad no es necesario por lo que cuando el camión llega al nodo 22, termina su circuito y se puede dirigir a botar la basura desde ese punto.

Bibliografía

Alonso, Cordón, Fernández & Herrera. (2001). *La metaheurística de optimización basada en colonias de hormigas: modelos y nuevos enfoques.* Optimización inteligente: técnicas de inteligencia computacional para optimización, 261-314.

Arito, F. L.-A. (2010). *Algoritmos de Optimización basados en Colonias de Hormigas aplicados al Problema de Asignación Cuadrática y otros problemas relacionados.* San Luis–Argentina: Universidad Nacional de San Luis Facultad de Ciencias Físico Matemáticay Naturales Departamento de Informática.

Assad y Golden. (1995). Arc routing methods and applications. En A. A. Golden., *Handbooks in operations research and management science, Volume 8* - (págs. pages 375-483.).

Ayala & Gonzáles. (2001). Asignación de rutas de vehículos para un sistema de recolección de residuos sólidos en la acera. Revista de Ingeniería, (13).

Bakarcic & Di Piazza. (2012). *Ruteo de vehículos y asignación de conductores: un enfoque combinado.* Universidad de Buenos Aires, Argentina: Doctoral dissertation, Tesis de Licenciatura.

Benavent, Campos, Corberán & Mota. (1983). *Problemas de rutas por arcos.* Qüestiió vol. 7, núm. 3.

Blum, & Roli. (2001). *Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison.*

Bodin, L. G. (1981). *The state of the art in the routing and scheduling of vehicles and crews .* (No. UMTA-MD-11-0004-81-2Final Rpt.

Bonabeau, Dorigo & Theraulaz. (1999). *Swarm intelligence: from natural to artificial systems (No. 1).* Oxford university press.

CONAMA. (2010). *Primer reporte del manejo de residuos sólidos en Chile.*

Contreras P. & Díaz D. (2010). *Métodos Heurísticos para la solución del ruteo de vehiculos con capacidad CVRP. .* Universidad Industrial de Santander.

Dantzig, G. B. (1959). *The truck dispatching problem.* Management science,6, 80-91.

Daza, Montoya & Narducci. (2013). *RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO DE VEHÍCULOS CON LIMITACIONES DE CAPACIDAD UTILIZANDO UN PROCEDIMIENTO METAHEURÍSTICO DE DOS FASES .* Revista EIA, 6(12), 23-38.

De la Cruz, J. (2003). *Alternativa heurística de dos fases para el problema de enrutamiento de vehículos con ventanas de tiempo, múltiples productos y flota heterogénea. .* Barranquilla, 155 p: (Doctoral dissertation, Tesis de maestría (Ingeniería Industrial). Universidad del Norte.

De la Cruz, J. (. Barranquilla, 2003, 155 p). *Alternativa heurística de dos fases para el problema de enrutamiento de vehículos con ventanas de tiempo, múltiples productos y flota heterogénea.* (Doctoral dissertation, Tesis de maestría (Ingeniería Industrial). .

Dib, Moalic & Caminada. (2015). *Dib , O., Manier , M.-A., Moalic , L., & Caminada , A. Combining VNS with Genetic Algorithm to solve the one-to-one routing issue in road networks.* Computers & Operations Research.

Dorigo, & Di Caro. (1999). *Ant colony optimization: a new meta-heuristic.* In Evolutionary Computation, 1999. CEC 99. Proceedings of the 1999 Congress on (Vol. 2, pp. 1470-1477). IEEE.

Dorigo, M. (1992). *Optimization, learning and natural algorithms. .* Politecnico di Milano, Italy.: Ph. D. Thesis,.

Edmonds & Johnson . (1973). Matching, Euler tours and the Chinese postman. Mathematical programming, 5(1).

Eiselt H, G. M. (1995). En *Arc routing problems, part I: The Chinese postman problem.* (págs. 231-242). Operations Research, 43(2).

Evans, J. (1992). *Optimization algorithms for networks and graphs. .* CRC Press.

Fisher y Jaikumar. (1981). A generalized assignment heuristic for the vehicle routing problem. Networks 11.

Gaskell. (1967). Bases for vehicle fleet scheduling. . Journal of the Operational Research Society, 18(3),.

Glover & Laguna. (1997). *Tabu search kluwer academic.* Boston, Texas.

Golden y Wong. (1981). Capacitated arc routing problems. Networks.

Guerrero, Pérez y Olivares. (2011). Un caso logistico del problema de ruteo vehícular múltiple m-VRP resuelto con la heurística de Fisher & Jaikumar. México.

Hsieh & Ho. (1993). Optimization of solid waste disposal system by linear programming technique. J. Resour. Manage. Technol., 21(4).

Ignizio & Cavalier. (1994). *Linear programming.* Prentice-Hall, Inc.

Ignizio & Cavalier. (1994). *Linear programming (pp. 457-505).* Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Laporte, G. (1992). The traveling salesman problem: An overview of exact and approximate algorithms. European Journal of Operational Research, 59(2).

Lüer, A. B. (2009). *El Problema de Rutas de Vehículos: Extensiones y Métodos de Resolución, estado del Arte. .* In EIG.

Lysgaard & Sørensen. (1997). *Algoritmo de ahorro de Clarke y Wright.* Ciencia del Departamento de gestión y logística.

Maniezzo, V. (2004). *Algorithms for large directed CARP instances: urban solid waste collection operational support. .* UBLCS Techni-cal Report Series, Bolonha, Italy: University of Bolonha, 27.

Márquez. (2010). *Macro y micro ruteo de residuos sólidos residenciales.*

Mei-Ko., K. (1962). Graphic programming using odd or even points. Chinese Mathematics, 1.

Méndez, A. S. (2010). *Dos Enfoques para la Solución del Problema de Ruteo De Vehículos (CVRP): Aplicación a un Caso Real de Recolección de Residuos. .* Mecánica Computacional, 29, 9367-9377.

Moraga, R. (2002). *Meta-RaPS: an effective solution approach for combinatorial problems.* Ph.D. thesis. Orlando,: FL: University of Central Florida.

Narducci, F. (2005). *Programación de talleres intermitentes flexibles, por medio de la heurística del margen de tolerancia.* Barranquilla, , 117 p: Doctoral dissertation, Tesis de maestría (Ingeniería Industrial). Universidad del Norte.

Orrego Cardozo, J. P. (2013). *Solución al problema de ruteo de vehículos con capacidad limitada" CVRP" a través de la heurística de barrido y la implementación del algoritmo genético de Chu-beasley.* Universidad Tecnológica de Pereira: Doctoral dissertation.

Pólya, G. (1990). *Mathematics and plausible reasoning: Induction and analogy in mathematics (Vol. 1).* Princeton University Press.

Prins, Lacomme & Prodhon. (2014). *Order-first split-second methods for vehicle routing problems.* A review. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 40, 179-200.

Punnen. (2007). The traveling salesman problem: Applications, formulations and variations. In The traveling salesman problem and its variations. Springer US.

Racero y Pérez. (2006). Optimización del sistema de rutas de recolección de residuos sólidos domiciliarios (Ecoeficiencia). *X Congreso de Ingeniería de Organización.*

Reeves, C. R. (1996). *Modern heuristic techniques.* Modern heuristic search methods, 1-25.

Sachs, H., Stiebitz, M., & Wilson, R. J. . (1988). An historical note: Euler's Königsberg letters. Journal of Graph Theory, 12(1), .

SEDESOL. (1999). *SEDESOL.*

Toth & Vigo. (2002). *Models, relaxations and exact approaches for the capacitated vehicle routing problem. .* Discrete Applied Mathematics, 123(1), 487-512.

Toth y Vigo. (2002). The Vehicle Routing Problem. En *Monographs on Discrete Mathematics and Applications.* S.I.A.M., Philadelpia, PA,.

Whlk, S. (2008). *A Decade of Capacitated Arc Routing. In Bruce L. Golden, S. Raghavan, and Edward A. Wasil, editors,.* The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges. Springer.

Yu, G. (1998). *Industrial applications of combinatorial optimization.* Boston: Kluwer Academic Publishers.