



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**OPTIMIZACIÓN DE LA PLANIFICACIÓN DE LA RECOLECCIÓN DE
RESIDUOS DOMICILIARIOS EN LA COMUNA DE VITACURA USANDO
INFORMACIÓN GEORREFERENCIADA**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN GESTIÓN DE OPERACIONES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

DANIEL IGNACIO IRIARTE ARELLANO

PROFESOR GUÍA:
RAFAEL EPSTEIN NUMHAUSER

PROFESOR CO-GUÍA:
DENIS SAURÉ VALENZUELA

COMISIÓN:
JORGE ALARCÓN DIAZ

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:
ANID - Subdirección de Magíster Nacional 2022 - Folio 22221663

SANTIAGO DE CHILE
2023

**TESIS PARA OPTAR AL
GRADO DE: DE MAGÍSTER EN GESTIÓN DE OPERACIONES
MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL
POR: DANIEL IGNACIO IRIARTE ARELLANO
FECHA: 2023
PROF. GUÍA: RAFAEL EPSTEIN NUMHAUSER**

OPTIMIZACIÓN DE LA PLANIFICACIÓN DE LA RECOLECCIÓN DE RESIDUOS DOMICILIARIOS EN LA COMUNA DE VITACURA USANDO INFORMACIÓN GEORREFERENCIADA

Este trabajo se desarrolla en el contexto de la gestión de residuos reciclables en Vitacura, una comuna de Santiago de Chile, a través de un exhaustivo análisis del Programa Reciclaje Casa a Casa (PRCC).

El desarrollo de proyecto consistió en desarrollar una metodología para georeferenciar con precisión las dinámicas de recolección de residuos de la comuna de Vitacura con el objetivo de identificar áreas con demandas específicas y diseñar zonas de recolección optimizadas. A través de este análisis, se descubrieron patrones de distribución y se propusieron soluciones para aportar a la forma en que Vitacura aborda la recolección de residuos reciclables.

Los resultados obtenidos evidencian que si bien el programa ha tenido logros notables en la gestión de residuos, hay un margen para la mejora a través de la implementación de las estrategias propuestas. Además de los hallazgos específicos, este estudio subraya la importancia de la participación activa de la comunidad y la necesidad de que los programas sean flexibles y se adapten a las dinámicas urbanas en constante cambio. La metodología propuesta no solo tiene implicaciones para Vitacura sino que plantea un modelo que puede ser adaptado y replicado en otras comunas y ciudades, evidenciando el potencial transformador de las técnicas basadas en datos en la gestión ambiental.

Dedicada a mi familia.

Agradecimientos

Quiero partir agradeciendo a mi familia, Carolina, Giovanni, Rocío, Samy y Rojo, por su cariño y apoyo incondicional. Sin duda todo lo que he logrado se basa en lo que ustedes me han dado, son maravillosos. Nadie me ha enseñado más lo que significa ser perseverante mi hermana Ro, Roxy, Rock, Roxyrock... gracias por tu apoyo infinito.

Me gustaría seguir agradeciéndole a mis amigos y amigas. En mi camino universitario me acompañaron en distintos procesos personas geniales que quiero muchísimo, y que se han transformado en amigos de la vida. Les agradezco por todos los momentos compartidos, sus consejos y enseñanzas, pero por sobre todo por su linda amistad. El camino no hubiese sido lo mismo sin ustedes, y de seguro yo tampoco, de cada uno he aprendido cosas geniales.

Desde plan común y durante todo mi camino universitario tuve la suerte de compartir, y seguir compartiendo, con Cris, Mati, Carlos y Javiera Torres (Jota), son increíbles! Incontables anécdotas con juntos. Gracias por ser las personas maravillosas que son.

Luego desde industrias y de natación, compartí con personas llenas de dedicación y determinación, gracias por contagiarme con sus alegrías y metas. Tantas tardes de estudio con Pancho, Ro, Nati, Giovi, Maca y Pavlo, y tantas mañanas de piscina con Tania, Luccas, Clau, Cata, Zana y Cacho.

Mi semestre en KTH fue muy especial, con la pandemia por el mundo. Gracias Ruth por tu amistad chilena en las tierras lejanas.

El MGO fue un período complejo, pero se hizo mucho más ameno con el increíble grupo de personas con las que compartí este periodo. Nati, Jo, Martín y Exe, unos soles.

Además, gracias a todas las personas que me animaron a terminar la tesis en los momentos precisos, en particular gracias Maca!!

Finalmente, gracias a los profesores que dedicaron de su tiempo y energía para formarme, enseñarme, y abrirme las puertas a oportunidades de desarrollo en la docencia y en el mundo laboral. Gracias Fernando Ordoñez, Denis Sauré y Rafael Epstein.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes y contexto	1
1.2. Oportunidad de Investigación	2
1.3. Objetivos	3
1.4. Alcance de la investigación	3
1.5. Estructura de la investigación	3
2. Revisión del Programa de Reciclaje Casa a Casa	5
2.1. Introducción	5
2.2. Reuniones de levantamiento de información con la municipalidad	5
2.3. Descripción del programa	5
2.4. Análisis del proceso de reciclaje casa a casa	6
2.5. Conclusión	9
3. Planteamiento de la Investigación	11
4. Fundamentos Teóricos	13
4.1. Fundamentos Teóricos Generales	13
4.2. Fundamentos Teóricos Específicos al Proyecto	19
5. Revisión de Literatura	21
5.1. Introducción	21
5.2. Gestión de Residuos Sólidos Municipales	22
5.3. Conclusión	26
6. Metodología	28
6.1. Descripción General	28
6.2. Metodología Cualitativa	28
6.3. Metodología Cuantitativa	30
7. Resultados y Recomendaciones de la Investigación	40
7.1. Resultados	40
7.2. Propuesta de Solución	43
7.3. Conclusión	51
8. Discusión	55
9. Bibliografía	57

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes y contexto

La comuna se constituye de una población aproximada de 82.500 habitantes a 2017 y una superficie de poco más de 28 kilómetros cuadrados¹. La municipalidad de Vitacura está fuertemente comprometida con la sustentabilidad, lo que se demuestra con el gran número de proyectos que impulsa al respecto.

Uno de los programas de reciclajes más importantes de la comuna es el Programa de Recolección de Reciclaje Casa a Casa. Este programa está diseñado para recoger tres tipos de materiales reciclables: papel y cartón, botellas de bebidas PET, y botellas de vidrio. La Dirección de Medio Ambiente, Aseo y Ornato (DMAO) es responsable de organizar y gestionar el programa para garantizar que estos materiales sean recogidos y reciclados adecuadamente. Para cumplir con su objetivo, la DMAO recopila información acerca de la operación del programa, por ejemplo, datos GPS de los camiones, la carga total recopilada por camión, tiempo total de operación, entre otros.

Con el objetivo de organizar la recolección de materiales reciclables, la municipalidad ha decidido dividir la comuna en seis secciones, a cada una de las cuales se le asigna un día específico de la semana, de lunes a sábado, para su recolección. Inicialmente, se asignaban cuatro camiones a cada sección para recolectar los materiales, donde cada camión recogía los 3 tipos de reciclaje, y por ende cada camión recorría una sub-zona de cada sección. Luego, el camión depositaba su carga para que una maquina separara el material recolectado por tipo de material reciclable.

Sin embargo, la contaminación entre los residuos resultó en que un 17% de los materiales se reciclara efectivamente después del proceso de separación. Por lo tanto, la administración desarrolló un nuevo plan de reciclaje donde el proceso de separar el reciclaje se traspasa a los residentes de la comuna. Este enfoque tiene como objetivo prevenir la contaminación y garantizar que el 100% de los materiales correctamente separados sean reciclados, aumentando así la efectividad del reciclaje.

Bajo el nuevo plan, se asignan tres camiones especializados a cada sección y son responsables de recolectar solo un tipo de material reciclable. Además, un cuarto camión queda

¹ <http://www.censo2017.cl/>

disponible para brindar apoyo (generalmente se enfoca en ayudar en la recolección de cartón, ya que es el tipo de material que se recolecta en mayor cantidad). Este enfoque optimiza el proceso de recolección y permite una mayor precisión en la clasificación y procesamiento de los materiales recolectados.

Facilitar el retiro casa a casa de residuos reciclables diferenciados es un componente crítico del Programa de Reciclaje Casa a Casa (PRCC). Para lograr este objetivo, cada hogar debe tener tres compartimentos separados para desechar los tipos de materiales reciclables. Estos compartimentos pueden obtenerse del municipio sin costo alguno. Además, la municipalidad recuerda a los residentes que deben asegurarse de que sus materiales reciclables estén correctamente clasificados y separados antes de colocarlos en los contenedores, para evitar la contaminación y garantizar que los materiales recolectados puedan ser procesados efectivamente para el reciclaje.

El sistema de tres contenedores en Vitacura ha mejorado significativamente la clasificación de residuos reciclables. Sin embargo, también se han presentado desafíos, tales como que algunos residentes pueden tener dificultades para manejar múltiples contenedores (contenedores de reciclaje y de basura). Además, los camiones de recolección de residuos anteriormente cubrían solo una cuarta parte de una zona cada día. Sin embargo, con el nuevo sistema, los camiones ahora tienen que cubrir la zona completa, lo que resulta en rutas más largas y horarios de trabajo más extensos, entre otros.

Por otra parte, en los últimos años se ha observado un aumento en la cantidad de material reciclado recolectado en la comuna, y además ha experimentado cambios significativos en su infraestructura urbana. La construcción de edificios, oficinas, colegios, parques, entre otros, ha generado una necesidad de revisar la eficiencia del programa de recolección de residuos, especialmente en la división de zonas de reciclaje. Este fenómeno ha subrayado la importancia de optimizar los recursos y mejorar la eficiencia de la recolección de residuos domiciliarios. Asimismo, se ha registrado una disminución en la generación de basura domiciliaria, lo cual permite una reevaluación de la asignación de recursos destinados a la gestión de residuos.

1.2. Oportunidad de Investigación

La municipalidad ha recopilado datos del PRCC, los que presenta una oportunidad para hacer un diagnóstico de la operación. Los camiones de recolección en Vitacura están equipados con dispositivos de seguimiento GPS que reportan su ubicación cada 10 segundos cuando el vehículo está encendido. Además, los camiones reportan las cargas totales que recogen por día.

La oportunidad de investigación se deriva de un análisis exhaustivo de los datos del programa, lo cual permite diagnosticar el desempeño del programa actual y, de esta manera, identificar oportunidades de mejora. Los datos recolectados son valiosos para incluir en el diagnóstico las rutas de los camiones, estudiar la cobertura eficiente de cada zona, determinar la cantidad de residuos generados en cada área y realizar un seguimiento del progreso del programa de reciclaje.

Con base en la información recopilada y analizada, se pueden identificar oportunidades de mejora en el PRCC. Estos cambios pueden incluir la optimización de rutas de recolección, la implementación de nuevas tecnologías para facilitar la recolección de residuos, y modificar la división geográfica de las zonas de operación. Es fundamental evaluar y medir el impacto de estos cambios en la eficiencia operacional y en el bienestar de la comunidad, para asegurar que sean beneficiosos en ambos aspectos.

En definitiva, un estudio analítico de investigación del PRCC en Vitacura proporcionará información valiosa para mejorar aún más la eficiencia del programa.

1.3. Objetivos

El objetivo principal de esta tesis es realizar un diagnóstico del PRCC, evaluando los recursos utilizados actualmente y determinar si existen oportunidades para mejorar la eficiencia del proceso, buscando al mismo tiempo un impacto positivo a los vecinos de Vitacura.

Para lograrlo, se han identificado los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar un marco de análisis de datos para identificar patrones en la generación de residuos reciclables domiciliarios.
- Analizar los patrones de recolección de reciclaje actual en Vitacura para identificar posibles áreas de mejora.
- Proporcionar recomendaciones en relación a las áreas de mejora identificadas.

1.4. Alcance de la investigación

La presente investigación estudia el PRCC en Vitacura. El análisis se basará en datos de recolección proporcionados por la municipalidad, la utilización de bases de datos geográficas públicas, y las entrevistas realizadas a distintos actores claves del municipio y en particular de la DMAO. El modelo propuesto se desarrollará en función de los datos disponibles y puede no capturar todos los factores que influyen en el sistema de recolección de reciclaje, como el tráfico. Sin embargo, el estudio proporcionará información valiosa sobre la eficiencia del sistema actual y las oportunidades para mejorar el PRCC.

1.5. Estructura de la investigación

En esta sección se presenta la estructura de la investigación, la cual se enfoca en el PRCC en el municipio de Vitacura. En primer lugar, se realiza una revisión exhaustiva del programa en el municipio de Vitacura. A continuación, se presentan los conceptos teóricos fundamentales para entender la investigación realizada. Luego, se realiza una revisión bibliográfica de los estudios e investigaciones más relevantes sobre las operaciones de recolección de residuos en hogares. Seguido, se describe detalladamente el diseño de investigación, incluyendo las técnicas y herramientas utilizadas para la recolección y análisis de datos. Posteriormente, se presentan los resultados obtenidos tras el análisis de los datos recopilados y se discuten en relación con los objetivos planteados. Finalmente, se realiza una reflexión sobre los resultados

obtenidos, su relevancia y sus implicaciones para el PRCC en Vitacura, así como se proponen recomendaciones y áreas de investigación futura. A continuación se presenta de manera detallada el contenido de cada capítulo.

- 1) **Introducción:** Introduce la importancia del reciclaje en Vitacura y establece el marco para la investigación, subrayando la necesidad de mejorar el proceso existente.
- 2) **Revisión del proceso de reciclaje casa a casa:** Examina en profundidad el programa actual de reciclaje, con énfasis en las interacciones con la municipalidad y las prácticas vigentes de recolección.
- 3) **Planteamiento de la Investigación:** Define el propósito y dirección del estudio, sentando las bases para las propuestas y recomendaciones estudiadas.
- 4) **Fundamentos Teóricos:** Proporciona las definiciones teóricas necesarias, tanto a nivel general como específico, que respalda las metodologías y recomendaciones propuestas.
- 5) **Revisión de Literatura:** Realiza un análisis de literatura relacionada con la gestión de residuos, ofreciendo una perspectiva amplia sobre tendencias y prácticas actuales.
- 6) **Metodología:** Detalla los enfoques metodológicos utilizados, tanto cualitativos como cuantitativos, esenciales para la distinción y mejora de las soluciones recomendadas.
- 7) **Resultados y Recomendaciones:** Expone los hallazgos clave de la investigación y presenta recomendaciones específicas, incluyendo aspectos como el balanceo de cargas y la segmentación geográfica.
- 8) **Discusión:** Reflexiona sobre la investigación desde su inicio hasta las recomendaciones, enfatizando la adaptabilidad y participación comunitaria. Además, señala áreas potenciales para futuras investigaciones en el ámbito del reciclaje y la sostenibilidad.

Capítulo 2

Revisión del Programa de Reciclaje Casa a Casa

2.1. Introducción

En este capítulo se lleva a cabo una revisión detallada del PRCC de la municipalidad de Vitacura. El objetivo principal de este análisis es comprender el proceso completo de recolección y gestión del programa para poder realizar un diagnóstico de su situación actual y detectar posibles áreas de mejora. Para ello, se ha realizado un seguimiento de las diferentes etapas del proceso, desde el diseño inicial y hasta la implementación del mismo. Además, se han llevado a cabo reuniones con los principales actores involucrados en la planificación y ejecución del programa para obtener una visión completa y detallada.

2.2. Reuniones de levantamiento de información con la municipalidad

Para obtener una comprensión completa del PRCC, se llevaron a cabo una serie de reuniones con la alcaldesa de la Municipalidad de Vitacura y los directores de la DMAO. Durante estas reuniones, se recopiló información detallada sobre los datos disponibles y cómo acceder a ellos, el funcionamiento operativo del programa, incluyendo aspectos clave como la logística de recolección, la frecuencia de recolección, los tipos de materiales reciclados aceptados, la selección de zonas de recolección y los procesos de información a la comunidad.

2.3. Descripción del programa

El nuevo PRCC se enfoca en retirar exclusivamente los materiales de mayor capacidad de reciclaje, que representan más del 90 % de los residuos que se retiran en el programa. El 10 % restante es material que no se retira debido a que está mal clasificado o no está dentro de las categorías que se retiran. Los materiales de mayor de mayor capacidad de reciclaje son papeles, cartones, botellas de bebidas (PET) y botellas de vidrio.

La recolección de reciclaje se lleva a cabo una vez a la semana según el día correspondiente de cada sector, desde las 7:30 hasta las 18:30, y los tres tipos de residuos son retirados por separado. Es importante destacar que en variadas oportunidades la recolección se extiende pasado el horario definido. Para lograr una mayor eficiencia en el reciclaje, el municipio proporciona tres bolsas reutilizables por domicilio para que los elementos se depositen por separado. Es importante tener en cuenta que los papeles y cartones deben estar limpios y no deben incluir cajas que hayan contenido alimentos, las botellas deben estar aplastadas para reducir su volumen, y no se deben incluir latas de comida o conservas.

Para reciclar otros elementos que no están contemplados en este retiro, como pilas, medicamentos vencidos, latas de conservas, otros tipos de plásticos, monitores y pantallas, entre otros, se pueden llevar a los distintos Punto Limpio ubicados en la comuna. También se pueden llevar cartones del tipo Tetra a los mini puntos limpios. Además, el primer domingo de cada mes se realiza el Mercado de Reciclaje, donde se reciben más de 30 tipos de residuos difíciles de reciclar, como plumavit, baterías de autos, madera, textiles, aerosoles y muchos otros.

La DMAO es la entidad responsable de gestionar el PRCC, velando por la correcta ejecución de la operación. Es esencial que cada hogar en la comuna sea visitado en el momento correspondiente y que los materiales reciclables se clasifiquen y se trasladen a las plantas de tratamiento correspondientes. Desde la implementación del nuevo plan, se ha observado un incremento en el peso total de los materiales reciclables recolectados y una disminución en la cantidad de residuos sólidos urbanos generados en la comuna. Esta situación ha generado inquietud en la DMAO, la cual se encuentra trabajando en el uso eficiente de los recursos disponibles para mantener el más alto nivel de servicio a la comunidad. En este sentido, se han evaluado varias alternativas, tales como la posible utilización de los vehículos de recolección de residuos sólidos urbanos para el retiro de materiales reciclables, la reducción de la frecuencia de recolección de residuos sólidos urbanos y/o materiales reciclables, el uso de vehículos equipados con compartimentos separados para la recolección de varios tipos de materiales reciclables sin mezclarlos, entre otras medidas.

2.4. Análisis del proceso de reciclaje casa a casa

Con el objetivo de facilitar la gestión municipal, la comuna ha sido subdividida en 15 unidades vecinales. El servicio de recolección de reciclaje se realiza semanalmente, siendo cada domicilio visitado una vez por semana. Para tal fin, el municipio ha agrupado las unidades vecinales en 6 secciones, cada una compuesta por una agrupación de unidades vecinales, a las cuales se les ha asignado un día específico para la recolección, desde el lunes hasta el sábado.

La figura 2.1 presenta la división de las unidades vecinales de la comuna, en las cuales se ha asignado un nombre que se encuentra ubicado en el centro de cada unidad. Estas unidades vecinales se agrupan para formar la división de zonas de retiro de reciclaje.

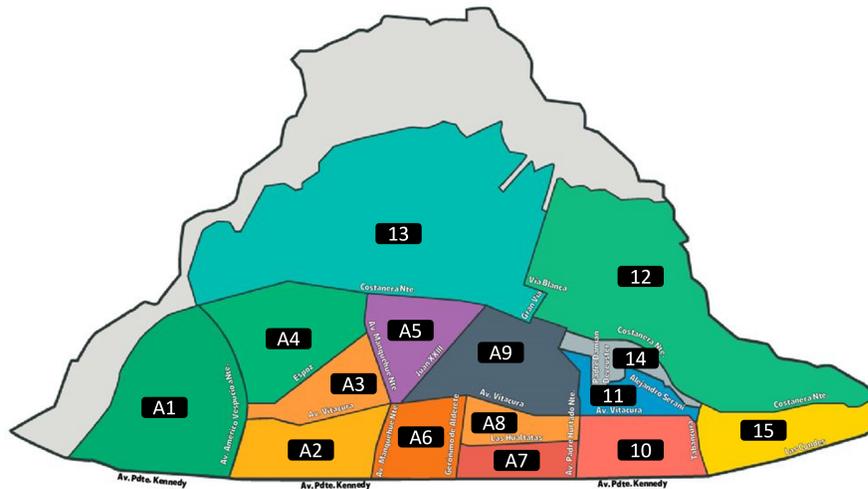


Figura 2.1: División de la comuna en unidades vecinales. Fuente: Página web Municipalidad de Vitacura

La figura 2.2 muestra la agrupación de unidades vecinales que se utilizaban en la comuna a la fecha de la investigación. Por ejemplo, la zona correspondiente al día lunes está compuesta por las unidades vecinales A3 y A5. Es importante destacar que la unidad vecinal A2 se divide en dos debido a que el día viernes, representado en celeste, presentaba la mayor cantidad de carga retirada. Como resultado, se decidió redistribuir parte de la recolección del viernes al día martes, lo que evidencia la existencia de oportunidades de mejora en la operación del PRCC.



Figura 2.2: Zonas de retiro de reciclaje del programa casa a casa. Fuente: Página web municipalidad de Vitacura.

Durante el 2021, el municipio utilizaba cuatro camiones para el servicio de reciclaje en la comuna. Cada camión recolectaba los 3 tipos de reciclaje y los trasladaban a la Estación de Transferencia Quilicura (ETQ) para luego ser procesados en la planta de reciclaje en Tiltil. Con el fin de optimizar la recolección, cada sección se dividía en cuatro sectores, cada uno asignado a un camión específico, no obstante, la mezcla de los residuos y su consiguiente contaminación dificultaba el reciclaje de un gran porcentaje de ellos, lo que disminuía significativamente la efectividad del proceso de reciclaje, llegando a tan solo un 17 %, según fue señalado por el municipio en 2022.

El nuevo plan del PRCC implementado por la alcaldía se inició en octubre de 2021 como un proyecto piloto para la sección correspondiente al día miércoles, y se terminó de implementar en toda la comuna a mediados de 2022. Este plan consiste en la recolección diferenciada de los residuos, donde un camión retira solo un tipo de reciclaje, delegando la tarea de separación a los residentes de la comuna, con el objetivo de optimizar el proceso y aumentar la tasa de reciclaje efectivo. Tres camiones recorren cada sub-área, cada uno de ellos recolectando un único tipo de residuo y se tiene un cuarto camión de apoyo. En términos de efectividad, el nuevo plan ha logrado aumentar la tasa de reciclaje efectivo al 100 % de los materiales separados correctamente, según fue señalado por el municipio en 2022.

La figura 2.3 muestra una comparación de rutas de los camiones encargados del reciclaje en la zona correspondiente al día lunes en dos momentos diferentes: antes y después de la implementación del nuevo plan en 2022. Estas rutas se componen de puntos GPS emitidos por los camiones. En la imagen 2.3.a, se puede observar que cada uno de los cuatro camiones encargados del reciclaje cubre una parte específica de la zona de recolección. Por otro lado, en las imágenes 2.3.b, 2.3.c y 2.3.d se puede ver que en el nuevo plan, cada camión se encarga de recolectar un solo tipo de residuo (plásticos y latas, vidrio, y papel y cartón) y debe cubrir toda la zona de recolección en su recorrido. Además, se observa un cuarto camión de apoyo que se encarga de la recolección de los residuos de papel y cartón. En conjunto, los camiones de papel y cartón y el camión de apoyo recorren la zona completa, tal como se puede apreciar en las imágenes 2.3.d y 2.3.e. Este cambio en la forma de recolección de residuos ha demostrado ser más eficiente y efectivo en el proceso de reciclaje, pero trae consigo nuevos desafíos, dado que ahora cada camión recorre aproximadamente 4 veces la distancia que recorría antes.



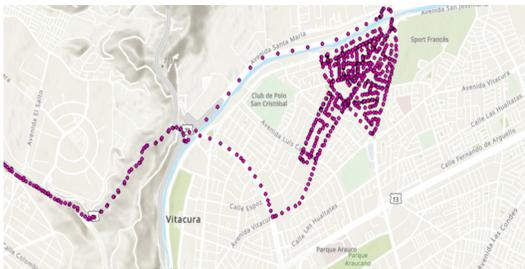
(a) Previo implementación del nuevo plan



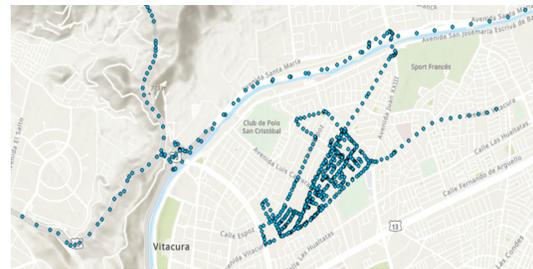
(b) Post implementación nuevo plan: plásticos y latas



(c) Post implementación nuevo plan: vidrio



(d) Post implementación nuevo plan: papeles y cartones



(e) Post implementación nuevo plan: apoyo

Figura 2.3: Ruta de día lunes previo y posterior a la implementación del nuevo PRCC.

2.5. Conclusión

La revisión detallada del PRCC implementado en el municipio de Vitacura, permitió comprender el proceso completo de recolección y gestión del programa para realizar un diagnóstico preciso de su situación actual y detectar posibles áreas de mejora. El programa se enfoca en retirar exclusivamente los materiales de mayor reciclabilidad: papeles y cartones, botellas de bebidas (PET) y latas, y botellas de vidrio. La recolección se lleva a cabo una vez a la semana según el día correspondiente de cada sector, y los tres tipos de residuos son retirados por separado. Además, existen otros puntos de reciclaje para materiales que no están contemplados en este retiro.

La DMAO es la entidad responsable de gestionar el PRCC, y desde la implementación del nuevo plan, se ha observado un incremento en el peso total de los materiales reciclables recolectados.

Con el objetivo de facilitar la gestión municipal, la comuna ha sido subdividida en 15 unidades vecinales y se agrupan para formar la división de zonas de retiro de reciclaje. Se han evaluado varias alternativas para mantener el más alto nivel de servicio a la comunidad, como la reducción de la frecuencia de recolección de residuos sólidos urbanos y/o materiales reciclables, el uso de vehículos equipados con compartimentos separados para la recolección de varios tipos de materiales reciclables sin mezclarlos, entre otras medidas.

En conclusión, el PRCC en Vitacura ha sido efectivo en la recolección de materiales reciclables y en la disminución de residuos sólidos urbanos generados en la comuna. Sin embargo, se pueden implementar mejoras para optimizar el proceso de recolección y gestión, y mantener el más alto nivel de servicio a la comunidad.

Capítulo 3

Planteamiento de la Investigación

La gestión eficiente de los residuos es una tarea crucial en cualquier municipio, que es más compleja cuando se trata de retiro de reciclaje. La recolección, clasificación y posterior tratamiento de estos materiales requiere un monitoreo constante y, cuando sea posible, optimización.

En el caso de Vitacura, la Municipalidad ha establecido el PRCC, que se caracteriza por su cuidadoso enfoque en la recopilación diferenciada de residuos reciclables. Sin embargo, como cualquier otro sistema logístico y operacional de gran escala, existen áreas en las que el programa puede mejorar para optimizar sus operaciones y aumentar su eficiencia.

En el curso de la investigación preliminar de datos y de una serie de reuniones con los directores de la DMAO, se identificó una oportunidad para mejorar la eficiencia del programa. Esta oportunidad radica específicamente en la forma en que están divididas las zonas de recolección, la cual puede no ser óptima.

Un análisis preliminar de los datos se muestra en la siguiente Figura:

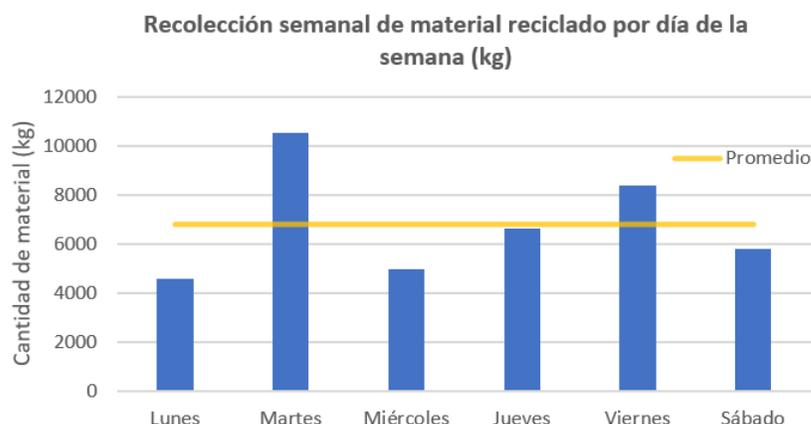


Figura 3.1: Distribución de carga de total de material de reciclaje recolectado por día de la semana. Fuente: Elaboración propia utilizando datos de Julio y Agosto 2022.

Como se muestra en la figura 3.1, el análisis de la distribución de carga total promedio de material de reciclaje recolectado por día de la semana permite identificar una disparidad significativa. Los días martes y viernes son los de mayor carga, mientras que los lunes y miércoles presentan una menor cantidad de material recolectado.

La diferencia en la carga recolectada por día sugiere un desequilibrio en la distribución de zonas de retiro de reciclaje, lo que a su vez genera problemas en la operación. Los días de mayor carga se encuentran menos preparados para afrontar el creciente volumen de material reciclado, lo que generan una mayor carga de trabajo e impacta negativamente en los trabajadores, que terminan pasada su hora estipulada de salida, y la municipalidad debe incurrir en costos extra.

En particular, se observaron desequilibrios en términos de la carga de trabajo asignada a los camiones recolectores, lo que puede llevar a ineficiencias en la operación. Por ejemplo, un camión recolector puede terminar su ruta antes que los demás porque su zona de recolección es más pequeña o produce menos residuos reciclables, mientras que otro camión recolector puede tener dificultades para completar su ruta porque su zona de recolección es más grande o produce más residuos reciclables.

Por lo tanto, la investigación se centró en el desarrollo de una metodología para equilibrar las zonas de recolección de la Municipalidad, con el objetivo de mejorar la eficiencia de la operación. El balanceo de las zonas de recolección implica redistribuir las áreas de recolección entre los camiones recolectores de tal manera que se minimice la variabilidad en la carga de trabajo de los camiones y se optimice la eficiencia de la operación.

Es importante aclarar que aunque también se realizaron mejoras en las rutas de recolección para la operación de retiro de reciclaje y de basura, estas quedaron fuera del alcance de la presente tesis debido a que se identificó que el mayor impacto del proyecto estaba en balancear las zonas de recolección de manera adecuada. Si bien se contemplaron otras líneas de investigación, como determinar el número óptimo de camiones para la operación, no se profundizó en ellas al estimar que no representaban la solución con mayor impacto.

En los siguientes capítulos, se detalla la metodología empleada para abordar este problema, así como los resultados obtenidos y las recomendaciones para su implementación.

Capítulo 4

Fundamentos Teóricos

En este capítulo se introducen definiciones clave necesarias para comprender el trabajo realizado. Estas definiciones se clasifican en fundamentos teóricos generales y fundamentos específicos del proyecto. Los fundamentos generales se refieren a conceptos establecidos que son ampliamente utilizados en el ámbito del análisis de datos geoespaciales. Por otro lado, los fundamentos específicos del proyecto son conceptos que se definen o aplican en el contexto de este estudio particular, ya que brindan las herramientas necesarias para comprender, analizar e interpretar los datos recopilados durante la investigación y los resultados del análisis.

4.1. Fundamentos Teóricos Generales

En esta sección se presentan los conceptos claves para comprender y abordar de manera efectiva el uso y aplicación de datos geoespaciales y geotemporales. Esta sección abarca un amplio espectro de ideas y tecnologías, incluyendo elementos de la geometría, la cartografía, los sistemas de referencia geográficos, la tecnología de GPS, formatos de datos espaciales y herramientas para la manipulación y análisis de datos geoespaciales como OpenStreetMap, ArcGIS y el lenguaje de programación Python.

4.1.1. Geometría y cartografía

El campo de la geometría se ocupa de estudiar las propiedades y magnitudes de las figuras en el plano o en el espacio, incluyendo las que se describen mediante un sistema de coordenadas. Esto ha dado lugar a la rama de la geometría analítica, que se centra en el uso de coordenadas para describir y analizar figuras geométricas. Los conceptos fundamentales de la geometría, como los puntos, las líneas y los polígonos, son de gran importancia para la construcción de modelos espaciales que permiten comprender la estructura y distribución de los objetos en un espacio determinado.

La figura 4.1 ilustra de manera clara los conceptos de punto, línea y polígono. Los puntos son representaciones de coordenadas para una ubicación dada, sin presentar área ni volumen. Las líneas se utilizan para describir la forma y ubicación de objetos geográficos, definiéndose como un conjunto de segmentos que unen puntos y en donde el punto final es diferente al inicial. Por último, los polígonos se corresponden con objetos cerrados definidos por un conjunto de líneas o puntos conectados entre sí.

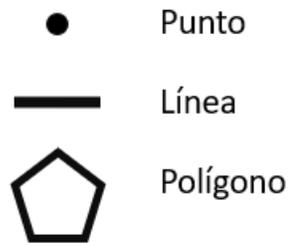


Figura 4.1: Ilustración de los conceptos de línea, punto y polígono.

La cartografía, por su parte, es una disciplina que se encarga de representar información geográfica de manera visual y efectiva. Los mapas son herramientas fundamentales de la cartografía, que utilizan la proyección de los puntos, líneas y polígonos en un plano para representar la superficie de la Tierra. De esta forma, la cartografía se convierte en un medio para comunicar la información geográfica de manera accesible y comprensible.

La escala es un concepto crítico de la geometría, ya que determina la relación entre las dimensiones de un objeto en el mundo real y su representación en un mapa. Una escala incorrecta puede afectar significativamente la precisión y la utilidad de los datos.

En conclusión, la comprensión de los conceptos de geometría es esencial para cualquier investigación que involucre datos que representen información en un mapa. La representación gráfica de estos conceptos permite una mejor comprensión de la estructura y distribución de los objetos en el espacio, mientras que la cartografía permite visualizar y comunicar esta información de manera clara y efectiva.

4.1.2. Datos geospaciales y geotemporales

Los datos geospaciales, también conocidos como datos georreferenciados, hacen referencia a información relacionada con una ubicación geográfica específica en la Tierra, la cual se recopila y analiza a través de tecnologías de localización como el Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

Por otro lado, los datos geotemporales combinan información sobre la ubicación espacial y el tiempo en el que se recopiló esa información, permitiendo el análisis temporal de patrones y procesos espaciales.

La combinación de ambos tipos de datos, geospaciales y geotemporales, permite una mayor comprensión de los procesos espaciales a lo largo del tiempo y es útil para la toma de decisiones en diferentes ámbitos, como la planificación urbana o la gestión de recursos naturales. Además, estos datos se representan mediante un sistema de coordenadas y se utilizan para la creación de mapas y otros análisis espaciales.

4.1.3. Sistemas de referencia

El entendimiento de los sistemas de referencia resulta crucial para la adecuada interpretación y representación de datos en un mapa. Un sistema de coordenadas es una red de líneas imaginarias que se emplea para indicar la ubicación de un objeto en un mapa o espacio. Las

coordenadas, las cuales son pares de números, establecen la posición del objeto en relación a un origen definido por el sistema de coordenadas. Por otro lado, la proyección cartográfica es un proceso matemático que permite representar la superficie curva de la Tierra en un plano. Debido a que la Tierra es una esfera, cualquier proyección cartográfica implica distorsiones en cuanto a forma, distancia y dirección. De ahí que se disponga de diversas proyecciones cartográficas, cada una con sus ventajas y desventajas.

Entre los sistemas de referencia terrestres más utilizados en la actualidad destaca el Sistema de Referencia Geodésico Mundial (WGS 84), el cual se vale de la latitud y longitud para señalar la ubicación de los objetos en la Tierra. Este sistema se sustenta en la forma ligeramente achatada de la Tierra en los polos y ensanchada en el ecuador. Además, WGS 84 sirve como base para el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), una herramienta esencial para la navegación y el posicionamiento en tiempo real.

Las aplicaciones de mapas como Google Maps u OpenStreetMap emplean WGS84 y varias proyecciones cartográficas para representar la superficie terrestre en un plano, lo que permite la visualización y el análisis de datos geospaciales en un mapa. Los datos se guardan en una base de datos que se emplea para suministrar información detallada acerca de la ubicación y características de los objetos en el mapa.

Otro sistema de coordenadas es el Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM), un sistema de referencia cartográfico que se utiliza para representar la superficie terrestre en un plano. Se divide la Tierra en 60 zonas, cada una con una anchura de 6 grados de longitud. En lugar de utilizar coordenadas de latitud y longitud, UTM se vale de una cuadrícula rectangular bidimensional que se superpone a cada una de las zonas. El sistema UTM se usa frecuentemente en cartografía, navegación y sistemas de información geográfica (GIS) para facilitar la medición y representación precisa de las distancias y dirección entre dos puntos en un mapa.

4.1.4. OpenStreetMap (OSM)

En este estudio se emplea OpenStreetMap (OSM) ², un mapa de acceso abierto que recopila información geográfica de diferentes lugares del mundo mediante la colaboración de instituciones y personas. Este mapa recoge datos geográficos y viales de la comuna de Vitacura y sus sectores contiguos, identificando atributos de las calles como su dirección, velocidad máxima o tipo de calle (autopista, residencial, pasaje, entre otros). El formato del mapa descargable es Shapefile (extensión .shp), el cual almacena mapas basados en los elementos geométricos de punto, línea y polígono.

4.1.5. Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

La tecnología GPS, por sus siglas en inglés "Global Positioning System", es una red de satélites que permite a los usuarios determinar su posición geográfica con una precisión de centímetros a metros.

² <https://www.openstreetmap.org/>

El sistema GPS se compone de tres segmentos principales: el segmento espacial, el segmento de control y el segmento de usuario. La figura 4.2 ilustra la relación entre los componentes mencionados.

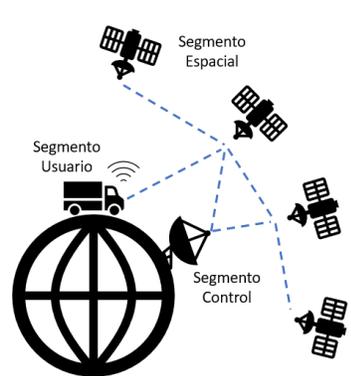


Figura 4.2: Ilustración del funcionamiento de señal GPS.

El segmento espacial consiste en una constelación de al menos 24 satélites que orbitan la Tierra y transmiten señales de radio a los receptores GPS en la superficie. Estos satélites se colocan en seis órbitas diferentes y están diseñados para proporcionar cobertura global las 24 horas del día.

El segmento de control está compuesto por estaciones terrestres que monitorean los satélites y corrigen cualquier desviación en sus órbitas. Este segmento garantiza que los satélites estén operando correctamente y transmitiendo información precisa.

El segmento de usuario está formado por los receptores GPS que están disponibles en una variedad de dispositivos, desde teléfonos inteligentes hasta sistemas de navegación en vehículos y equipos de campo. Los receptores GPS reciben las señales de los satélites y utilizan algoritmos para determinar su posición, velocidad y dirección del usuario.

En este proyecto, los camiones recolectores de reciclaje cuentan con receptores GPS, asociados a una marca temporal, por lo que se guarda información geotemporal.

La precisión del GPS depende de varios factores, como la calidad del receptor, la cantidad de satélites visibles, la presencia de obstáculos (como edificios o árboles) y la interferencia de la señal. Los receptores GPS modernos utilizan técnicas como la corrección diferencial para mejorar la precisión y reducir los errores.

El GPS tiene una amplia variedad de aplicaciones, desde la navegación en vehículos y el seguimiento de la flota hasta la agricultura de precisión y la cartografía.

4.1.6. Archivos KML y Shapefile

Los archivos KML y Shapefile son formatos utilizados en los sistemas de información geográfica para almacenar datos geoespaciales. KML (Keyhole Markup Language) es un formato de archivo que se utiliza para visualizar datos geográficos en aplicaciones como Google Earth y Google Maps. Este formato es basado en XML y permite la representación de información

geográfica en tres dimensiones. Los archivos KML contienen datos de puntos, líneas y polígonos, junto con otros atributos, como nombres, descripciones y enlaces a recursos adicionales.

Por otro lado, Shapefile es un formato de archivo utilizado en sistemas de información geográfica para almacenar datos vectoriales en un formato tabular. El formato Shapefile se compone de varios archivos, incluyendo un archivo principal que contiene los datos de geometría (puntos, líneas o polígonos), así como archivos adicionales que contienen información sobre los atributos asociados con los objetos geográficos. El formato Shapefile es ampliamente utilizado en aplicaciones SIG para el análisis y visualización de datos geoespaciales.

4.1.7. Software ArcGIS

ArcGIS es un software de sistema de información geográfica (GIS por sus siglas en inglés) utilizado para crear, editar, analizar y visualizar datos espaciales en una variedad de formatos, incluyendo shapefiles. De hecho, shapefile es uno de los formatos de archivo más comunes utilizados en ArcGIS Pro, ya que permite almacenar información geográfica y atributos relacionados con la ubicación de los objetos en un mapa.

ArcGIS tiene una amplia gama de herramientas de análisis espacial y procesamiento de datos que pueden utilizarse en shapefiles. Por ejemplo, puede realizar análisis de proximidad y de redes en una capa de shapefile para determinar rutas óptimas, o utilizar herramientas de geoprocésamiento para generar una capa de densidad a partir de puntos.

Además, ArcGIS permite trabajar con shapefiles en un entorno de proyecto, lo que facilita la gestión de múltiples capas y la realización de análisis espaciales complejos. Los usuarios pueden agregar capas de shapefile a un proyecto de ArcGIS Pro, realizar ediciones y actualizaciones, y exportar los resultados en diferentes formatos.

4.1.8. Lenguaje de programación Python

Python es un lenguaje de programación interpretado y de alto nivel que se utiliza ampliamente en aplicaciones de ciencias de datos y análisis geoespaciales. Es conocido por su sintaxis simple y legible, y también por su capacidad de trabajar con múltiples plataformas y sistemas operativos.

En el ámbito de la geoinformática, Python es uno de los lenguajes de programación más utilizados debido a sus capacidades de procesamiento de datos geoespaciales y su integración con herramientas de análisis geoespacial como ArcGIS.

Python se integra perfectamente con ArcGIS a través de la API de ArcPy. ArcPy es un conjunto de módulos de Python que permite la automatización de tareas y flujos de trabajo en ArcGIS, lo que permite a los usuarios escribir scripts y programas en Python para realizar tareas específicas de análisis geoespacial y procesamiento de datos. La capacidad de integrar Python con ArcGIS a través de ArcPy ha aumentado significativamente la eficiencia y eficacia de los flujos de trabajo geoespaciales, lo que hace que la plataforma sea más accesible y útil para los profesionales de la geoinformática.

4.1.9. Algoritmos

El término algoritmo hace referencia a un conjunto de instrucciones lógicas y ordenadas que se utilizan para resolver un problema específico. Este término se utiliza en distintas áreas de la informática y la tecnología, abarcando desde la programación de software hasta la creación de modelos de inteligencia artificial. Las instrucciones que conforman un algoritmo se pueden implementar y ejecutar en una computadora, utilizando diversos lenguajes de programación, siendo Python uno de los más utilizados. Además, en algunos casos, los programas como ArcGIS ya incorporan algoritmos específicos para realizar tareas de análisis y procesamiento de datos geoespaciales.

4.1.10. Algoritmos de clustering

El clustering o agrupamiento (en español) es una técnica utilizada en la minería de datos para organizar una gran cantidad de datos en grupos o clústeres según su similitud. En el contexto del clustering, los algoritmos se utilizan para agrupar datos en diferentes clústeres. Estos algoritmos pueden variar desde los más simples, como el método de k-means, hasta los más complejos que utilizan técnicas de aprendizaje automático para analizar y clasificar los datos.

Existen diferentes métodos para realizar el clustering, desde los más simples que se basan en medidas de distancia hasta los más avanzados que utilizan algoritmos de aprendizaje automático. En general, estos métodos buscan agrupar los datos de tal manera que los elementos de cada clúster sean lo más similares posible entre sí y lo más diferentes posible de los elementos de otros clústeres.

Otras utilidades de clustering es formar grupos de tal forma que cada cluster tenga una cantidad similar de alguna característica. En particular, en este estudio se utiliza el concepto de cluster para agrupar unidades mínimas en 6 clusters, donde la carga total, calculada como la suma de la carga de todas las calles, sea parecida en cada cluster.

4.1.11. Algoritmo genético para clustering

El algoritmo genético es una técnica de optimización que se inspira en el proceso de evolución natural de las especies. Este algoritmo comienza con una población inicial de soluciones aleatorias. Luego, mediante la aplicación de operadores genéticos como la selección, la mutación y el cruce, se generan nuevas soluciones que van evolucionando hacia soluciones más óptimas.

En el contexto del clustering, el algoritmo genético puede ser utilizado para encontrar la partición óptima de los datos en clústeres. En este proceso, se definen los cromosomas como la partición de los datos en clústeres y se aplican los operadores genéticos para evolucionar hacia una partición óptima.

Una de las ventajas del algoritmo genético para clustering es su capacidad para manejar conjuntos de datos grandes y complejos. Además, puede ser utilizado para optimizar diferentes criterios de clustering, como la minimización de la distancia intra-cluster o la maximización de la distancia inter-cluster.

El algoritmo genético para clustering se puede resumir en los siguientes pasos:

1. **Inicialización:** Se genera una población inicial de particiones aleatorias.
2. **Evaluación:** Se evalúa la calidad de cada partición de la población mediante un criterio de clustering, como la suma de las distancias intra-cluster.
3. **Selección:** Se seleccionan las mejores particiones de la población para reproducirse.
4. **Cruce:** Se generan nuevas particiones a partir de las particiones seleccionadas mediante operaciones de cruce.
5. **Mutación:** Se aplican mutaciones a las nuevas particiones para explorar el espacio de soluciones.
6. **Reemplazo:** Se reemplazan las peores particiones de la población con las nuevas particiones generadas.
7. **Convergencia:** Se repiten los pasos 2 a 6 hasta que se cumpla un criterio de convergencia, como el número máximo de iteraciones o la estabilización de la calidad de las soluciones.

En resumen, el algoritmo genético para clustering es una técnica de optimización poderosa y flexible que puede ser utilizada para encontrar la partición óptima de los datos en clústeres, incluso en conjuntos de datos grandes y complejos.

4.2. Fundamentos Teóricos Específicos al Proyecto

En este capítulo, se abordan los principios que se utilizan en el análisis de la eficiencia logística de la gestión de residuos en la comuna. Con el apoyo de la plataforma BTRACK, y a través de la noción de unidad mínima, se realiza un estudio de la eficiencia del PRCC.

4.2.1. Plataforma BTRACK

La plataforma BTRACK³ es un sistema avanzado de gestión logística de flotas. Proporciona seguimiento en tiempo real y almacenamiento de la información de ubicación generada por dispositivos GPS en vehículos, incluyendo en este caso, los camiones de recolección de la Municipalidad. Esta capacidad de almacenamiento de datos geoespaciales fue fundamental para el análisis y evaluación detallada de las rutas de recolección en el PRCC.

³ <https://www.btrak.cl/>

4.2.2. Unidad mínima

Con el objetivo de simplificar la comprensión de los mapas de la comuna, se ha decidido fragmentar cada calle en segmentos que inicien y finalicen en cada intersección, estableciendo este proceso como la unidad mínima de análisis.

En la figura 4.3, se muestran tres ejemplos de unidades mínimas en la Calle Obispo Sierra. Cada tramo de calle comprendido entre dos puntos es considerado una unidad mínima, siendo éstas, en su gran mayoría, equivalentes a una cuadra en la comuna. Esta estrategia facilita la representación gráfica y análisis de los datos geospaciales de la comuna, permitiendo una mejor visualización y comprensión de los patrones espaciales presentes en la zona.



Figura 4.3: Tres unidades mínimas en Calle Obispo Sierra.

Capítulo 5

Revisión de Literatura

5.1. Introducción

Los residuos sólidos municipales (MSW por sus siglas en inglés), se refieren a los materiales sólidos o semisólidos desechados por residentes y empresas, excluyendo residuos peligrosos y aguas residuales (Vergara & Tchobanoglous, 2012).

“*What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*” es un informe elaborado por el Banco Mundial, en este informe se indica que anualmente se generan aproximadamente 2.000 millones de toneladas de desechos sólidos municipales, y por lo bajo el 33 % de ellos no se gestionan sin riesgo para el medio ambiente. Así mismo, indica que es esperable que bajo el mismo escenario de prácticas actuales, 3.000 millones de toneladas de basura municipal se produzcan anualmente para el 2050.

Por otro parte, la literatura postula que el creciente aumento de los residuos sólidos municipales está correlacionado con los niveles de ingreso y las tasas de urbanización. (Silpa Kaza, Lisa Yao, Perinaz Bhada-Tata y Frank Van Woerden, et al., 2018).

Una de las bases del problema radica en que las ciudades y países se están desarrollando rápidamente sin contar con sistemas adecuados para manejar la cambiante composición de residuos de los ciudadanos. Este rápido desarrollo ha llevado a un aumento en la generación de residuos, lo que plantea desafíos significativos para su gestión adecuada, y en particular para una gestión que se preocupe por el medio ambiente.

La revisión de literatura presente a continuación expone una recopilación de diversas fuentes de investigación respecto al tópico central del documento, Gestión de Residuos Sólidos Municipales. Lo anterior con el objetivo de identificar parámetros clave que se presentan en las líneas de investigación, y de esa manera poder establecer las bases para poder desarrollar un modelo innovador y eficiente para abordar la Gestión de Residuos Sólidos Municipales.

5.2. Gestión de Residuos Sólidos Municipales

Gedefaw (2015) presenta los principales procesos involucrados en la Gestión de Residuos Sólidos Municipales (GRSM). Dentro de ellos se encuentran los siguientes 4 procesos: producción de residuos, recolección, transporte y la transferencia de los residuos a plantas de tratamiento. A partir de aquella contribución, Ezugwu et al. (2019) aborda diferentes líneas de investigación para hacer frente a la problemática de GRSM, dentro de ellas se consideran por separado estudios referentes en primer lugar, a la generación de basura (p.ej., conciencia pública, tipo de basura, relación entre características económicas y cantidad de basura generada). En segundo lugar, abordan el desarrollo de modelos de ruteo de vehículos (VRP por sus cifras en inglés, ampliamente abordado en la literatura), presentando estudios ligados al transporte de residuos y en tercer lugar, se presenta el desarrollo de modelos para el estudio y control del proceso, y ayuda para la toma de decisiones (p.ej., utilización de sensores, información geográfica, estimación de basura generada de manera granular). En cuarto lugar, se analizan estudios de políticas de gestión del proceso de retiro de basura.

5.2.1. Primera línea de investigación: Generación de basura

El estudio acerca la generación de residuos sólidos es de suma importancia ya que de este se desprenden las variables que influyen en la tasa de producción y reciclaje de residuos, con lo cual se realiza investigación con el objetivo de predecir la dinámica futura de los residuos sólidos domésticos. (Grazhdani, 2015).

En la investigación de Kontokosta et al. (2018), realizan un análisis detallado de los patrones de comportamiento en la generación de residuos a nivel de hogares a través de una combinación de técnicas de aprendizaje automático y de estimación de residuos a nivel granular con el objetivo de predecir la generación de residuos tanto diarios como semanales.

Para ello utilizaron los datos recopilados por el departamento de saneamiento de la ciudad de Nueva York, utilizando una línea histórica de 10 años. Dentro de las principales variables utilizadas para realizar el modelo de aprendizaje automático utilizaron variables de temporalidad, datos demográficos y económicos de la población, y características de la construcción de la ciudad. Una vez realizado con éxito el modelo, los autores dan cuenta de la importancia de las variables utilizadas.

Del estudio se desprende una alta correlación entre tasas de reciclaje y atributos económicos, tales como ingresos y logros educativos. Por otro lado, afirman que las variables climáticas (temperatura, precipitación, nieve y viento) son un factor clave en la estimación de los modelos tanto en términos de estacionalidad por la generación de residuos como en la recolección de estos. Asimismo, consideran que variables referentes al tipo de residencia también juegan un papel importante a la hora de predecir los modelos.

Por otro lado, Stephen (2006) utiliza un sistema de encuestas a hogares a fin de determinar los factores más relevantes al momento de explicar la generación de residuos, de ello concluye que los factores más significativos para determinar la generación de residuos recogidos por el hogar son el número de personas que viven en el hogar, el sistema de recogida de residuos y la clasificación económica.

Grazhdani (2015), también presenta un estudio dedicado a estimar las variables que más inciden en la generación, disposición y reciclaje de residuos sólidos. Para ello utiliza un modelo de efectos fijos con el objetivo de estimar las variables socio económicas, estructura de vivienda y políticas que impactan en la generación de residuos, y para poder capturar los efectos heterogéneos no observables, tales como clima, patrones de consumo y condición económica de las diferentes utilizadas en el estudio.

Los estudios presentados dan cuenta de la importancia de incluir principalmente factores económicos y sociales al momento de estimar la generación de basura futura y tomar decisiones respecto a la gestión de residuos sólidos municipales.

5.2.2. Segunda línea de investigación: Modelos de recolección de basura

El desarrollo de modelos de planificación de las rutas de transporte de vehículos, cada vez juega un rol más importante al momento de reducir los costos logísticos. El tópico acerca del problema de ruteo de vehículos (VRP por sus siglas en inglés) fue propuesto por primera vez en 1959 por G. B. Dantzig, con el propósito de estudiar el problema de optimización de ruteo de camiones cisterna entre la refinería de Atlanta y sus estaciones de servicio subordinadas. (Zhang et al. (2021).

Años más tarde, en 1991 Gilbert Laporte en su publicación “*The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithm*” define el Problema de Ruteo de Vehículos como el problema de diseñar rutas óptimas de entrega o recolección desde uno o varios depósitos hacia un número de ciudades o clientes geográficamente dispersos, sujeto a restricciones adicionales.

Los investigadores Akbarpour; et.al (2021) ilustran, a través del uso de programación basada en restricciones de probabilidad junto con cuatro algoritmos metaheurísticos diferentes, el uso de VRP con el propósito de optimizar la ruta de la flota de vehículos entre los lugares de generación de residuos y las instalaciones de separación. Los cuatro algoritmos metaheurísticos corresponden a Simulated Annealing (SA), Genetic Algorithm (GA), Hybrid GA-SA, y Hybrid GA-PSO. Los resultados mostraron una buena consistencia de las metaheurísticas aplicadas, y Algoritmo Genético con Optimización por Enjambre de Partículas mostró los mejores resultados.

Por otro lado, (Akhtar et.al, 2017) presentan un modelo de optimización de vehículos con capacidades, es decir, se centran en encontrar rutas de recolección que cumplan con las restricciones de capacidad y minimicen la distancia total recorrida. El modelo incorpora el Algoritmo de Búsqueda Backtracking (BSA) para resolver el problema de optimización de rutas, utilizando datos de los contenedores inteligentes, los cuales proporcionan datos en tiempo real sobre el estado del contenedores a través de sensores ultrasónicos para medir el nivel de residuos, módulos de carga para pesar los residuos y sensores magnéticos en la tapa para saber si ha sido vaciado.

5.2.3. Tercer línea de investigación: Desarrollo de modelos para la toma de decisiones

Los autores Burrough & McDonnell (1998), abordan en su libro “*Principles of Geographical Information System*” definiciones referentes al área de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), de ello se desprende que corresponden a un poderoso conjunto de herramientas para recopilar, almacenar, recuperar a voluntad, transformar y mostrar datos espaciales del mundo real.

En las últimas décadas, para el desarrollo de modelos y control se han utilizado Sistemas de Información Geográfica (*GIS* por sus siglas en inglés) (Karadimas, N. V., & Loumos, V. G. 2008). En este contexto, gran cantidad de modelos se han implementado para cumplir con distintos propósitos: la selección apropiada de sitios de vertedero (Nas, B., Cay, T., Iscan, F., et al. 2010., Şener, B., Süzen, M. L., & Doyuran, V. 2006) selección de lugar de instalación de contenedores receptores de reciclaje (Chang, N.-B., & Wei, Y. L. 2000), como también la estimación de la cantidad de desechos generados.

Asimismo, se han empleado diversas estrategias de estimación de basura generada por sector. Típicamente estas estrategias incluyen la utilización de distintos parámetros de la generación de basura, la densidad de población y la distribución de ingresos del sector (Vijay, R., Gupta, A., Kalamdhad, A. S., & Devotta, S. 2005), proporción de área residencial y comercial, y ubicación de basureros municipales (Karadimas, N. V., & Loumos, V. G. 2008).

Los autores Purcell, M., & Magette, W. L. (2008) se adentran en una investigación novedosa para Irlanda en el tópico de la eficiencia de los residuos, elevando así la investigación de gestión de residuos de Irlanda a estándares de clase mundial. La investigación se realizó a fin de predecir la cantidad y distribución de la generación de residuos municipales biodegradables (BMW por sus siglas en inglés) en Dublín, a través variables relacionadas a factores socioeconómicos, tipo de viviendas y las actividades principales de los establecimientos comerciales. Para llevar a cabo la estimación, utilizaron un enfoque de Sistema de Información Geográfica (SIG) por medio de un ArcMap.

Como punto de partida, debieron mapear tanto los datos socioeconómicos como el tamaño de los hogares a nivel de distrito electoral, en conjunto con la información histórica disponible a fin de obtener estimaciones a nivel general de la generación de BMW, logrando así identificar patrones de generación de residuos a partir de cambios demográficos y de desarrollo.

Anagnostopoulos et.al (2015) proponen algoritmos a fin de otorgar soluciones eficientes y escalables al problema dinámico de recolección de residuos, gestionando el equilibrio entre la recolección inmediata y su costo. Lo anterior a través de la obtención de datos de contenedores que cuentan con sensores que miden el volumen de los residuos.

Los modelos por los autores se basan en un algoritmo de enrutamiento dinámico, dentro de ellos destaca el Modelo de Camiones Dedicados (DTM) que asigna camiones específicos para atender contenedores de alta prioridad, Modelo de Desvío (DM) en el cual los camiones se desvían de su ruta original para atender contenedores de alta prioridad, Modelo de Distancia Mínima (MDM) que cuenta con el objetivo de minimizar desviaciones de las rutas iniciales

y atender de inmediato contenedores de alta prioridad en áreas fronterizas, y Modelo de Reasignación (RM) que maximiza el rendimiento y eficiencia mediante reasignación de áreas de recolección según alertas activadas. La contribución de los modelos corresponde a integrar un conjunto de algoritmos realizan adaptación dinámica sobre criterios específicos, a fin de contribuir a la toma de decisiones.

5.2.4. Cuarta línea de investigación: Políticas de gestión

En base a la cuarta línea de investigación, el estudio de políticas de gestión del proceso de retiro de basura ha experimentado un notable aumento en el interés público en los últimos años debido al crecimiento exponencial de la población humana junto con la rápida industrialización y urbanización, ha desencadenado una enorme producción de desechos. (Das; Sotavento; Kumar;Kim, 2020).

(Daskalopoulos Badr, Probert, 1998) Destacan la gran preocupación que enfrentan los países industrializados para hacer frente a los residuos sólidos municipales, haciendo énfasis en la necesidad de abordar los desafíos de la gestión de residuos en países industrializados.

Gardiner & Hajek pioneros en la investigación acerca de la relación entre crecimiento económico y la generación de residuos, en su publicación del año 2020, “*Municipal waste generation, R&D intensity, and economic growth nexus a case of EU regions*” basan su trabajo en determinar la relación entre la generación de residuos municipales, la intensidad en materia de investigación y desarrollo (I + D), y el crecimiento económico en las regiones de la Unión Europea con el objetivo de entender cómo se relacionan las variables, con el fin último de poder tomar políticas públicas adecuadas.

A modo de conclusión, logran demostrar la existencia de causalidad bidireccional a corto y largo plazo entre la generación de residuos y el crecimiento económico en las regiones de la Unión Europea. Además, tras la investigación reconocen la importancia de la implementación de políticas de gestión de residuos descentralizada, es decir, implementar políticas de gestión tanto a nivel local como regional, en lugar de políticas centralizadas a nivel nacional. Ya que las políticas se deben adaptar a las características de cada región en particular, tomando en cuenta las diferencias en la intensidad en I + D. Además, recalcan la importancia del desarrollo de políticas de desarrollo en el ámbito económico que vayan en línea con la reducción de residuos a fin de avanzar hacia un modelo de economía circular.

No obstante, es importante recalcar que el estudio realizado se limitó a vertederos e incineradoras, sin considerar el reciclaje de residuos municipales, lo cuál genera una oportunidad de investigación extrapolar el estudio a datos municipales.

Investigaciones recientes sobre el tema, tales como (Rosecký, Somplak, Slavík, Kalina, Bulkova y Bednár, 2021) en “*Journal of Environmental Management*” indagan en formas de llevar a cabo la gestión efectiva de los residuos, específicamente en diferentes niveles territoriales de República Checa. Lo anterior va en línea con la política europea de economía circular.

Para llevar a cabo la investigación utilizaron diversas técnicas de modelado, a fin de poder hacer una comparación entre ellas y utilizar la que presenta resultados más precisos. Dentro

de las técnicas utilizadas se encuentran los modelos tradicionales tales como regresión lineal multivariable y modelo lineal generalizado, y técnicas de modelos de aprendizaje automático basadas en árboles tales como árboles de regresión, random forest y árboles de regresión con refuerzo gradiente.

De las técnicas utilizadas los autores concluyen que el uso de técnicas de regresión lineal logra la mayor precisión en comparación a las otras técnicas descritas. Por otro lado, se encontraron con problemas a nivel general en todos los modelos utilizados a medida que disminuían los niveles territoriales, es decir, a medida que pasaban de nivel regional, micro-regional y municipal, siendo a nivel municipal el territorio que presenta una menor precisión en los datos.

Adicionalmente, los autores recalcaron la importancia en el uso de variables sociodemográficas y económicas en los modelos utilizados ya que son variables que impactan directamente en la cantidad de residuos municipales generados en una determinada área. Concluyendo así que existen más de una política pública efectiva que se ajuste a todos los niveles territoriales, y por ende, las políticas se deben enfocar a niveles territoriales específicos.

Por último, (Grazhdani, 2015) estudia factores que cuentan con el potencial de promover la reducción de residuos sólidos, con el objetivo de identificar aquellas variables que inciden en la producción de residuos. Lo anterior con el objetivo de disponer de información esencial para que esta pueda ser utilizada por los responsables de la toma de decisiones y desarrollar políticas y medidas integradas para la gestión de residuos a lo largo de un período de tiempo más largo.

Los factores estudiados corresponden a las políticas e incentivos económicos. A nivel económico se evaluó el cobro a hogares en función de la cantidad de residuos generados, de ello se obtuvo que la medida aplicada incentiva el reciclaje dentro de los hogares, aumentando su tasa en 1.87 puntos porcentuales con un nivel de significancia del 1% mediante el modelo de efectos fijos.

Igualmente, el autor encuentra que el gasto acumulado en educación sobre reciclaje aumenta la tasa de reciclaje, y que los hogares con mayores niveles educativos tienen una tendencia a generar una menor cantidad de residuos, y a tener mayores tasas de reciclaje.

De esa manera, el autor desprende de su análisis que los municipios deben ser conscientes tanto de factores sociales, económicos y políticos para abarcar la gestión de residuos.

5.3. Conclusión

Ha quedado en evidencia que la correcta gestión de residuos municipales es de suma importancia hoy en día debido a la creciente urbanización de las ciudades y el consiguiente aumento de residuos que estas generan a diario. La literatura presentada anteriormente da cuenta de las diversas áreas de estudio que existen en torno a la gestión de residuos municipales a nivel internacional, cada una de ellas abordando métodos que contribuyen a la correcta gestión de residuos municipales.

Estudios relacionados a entender la generación de basura concluyen que es clave la utili-

zación de variables sociodemográficas y económicas para estimar la generación de basura de los hogares. Si bien con los modelos planteados los autores han podido realizar predicciones significativas que contribuyen a la creación de modelos de optimización de rutas, estos modelos quedan limitados a las variables sociodemográficas y económicas.

Por otro lado, en base a los modelos desarrollados con el objetivo de recolección de basura, resulta importante destacar el uso de programación basada en VRP con el propósito de optimizar la ruta de los vehículos. Se han presentado modelos que consideran el uso de contenedores inteligentes, lo cual resulta interesante para estimar las rutas óptimas de los vehículos.

En cuanto a los modelos para la toma de decisiones, cabe destacar el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para identificar patrones de generación de residuos a partir de cambios demográficos y de desarrollo. Así mismo, destacan el uso de algoritmos de enrutamiento dinámico a fin de realizar una adaptación dinámica sobre criterios específicos que puedan contribuir a la toma de decisiones.

Por último, en cuanto a las políticas de gestión, se ha encontrado que es clave abordar el problema de la gestión de residuos en base a políticas públicas, de la mano con políticas económicas. Por otro lado, se ha encontrado que las políticas y medidas tomadas tienen un mejor impacto y significancia cuando son tomadas de manera descentralizada, es decir, medidas tomadas a nivel municipal y no nacional debido a la precisión de los datos.

Tras una meticulosa revisión bibliográfica, se ha observado una notable ausencia de estudios que utilicen datos analíticos provenientes de sistemas GPS instalados en camiones recolectores para predecir la acumulación de residuos. Estos datos GPS, que ofrecen información precisa sobre rutas, tiempos y patrones de recolección, podrían ser esenciales para una gestión más eficiente de los residuos municipales. Esta laguna en la literatura representa una oportunidad significativa para desarrollar un modelo innovador que no solo gestione los residuos de manera integral, sino que también incorpore estos valiosos datos geoespaciales, abarcando así todos los aspectos previamente identificados en investigaciones anteriores.

Capítulo 6

Metodología

6.1. Descripción General

Este capítulo describe el enfoque metodológico utilizado para evaluar el PRCC y equilibrar las zonas de recolección, como se detalla en el capítulo 3. Esencialmente, el propósito es describir el proceso de recopilación, análisis e interpretación de datos para garantizar que los resultados sean válidos y aplicables al contexto de estudio.

Este estudio se centra en un enfoque mixto, combinando técnicas de investigación cualitativas y cuantitativas para proporcionar una comprensión holística del PRCC. Inicialmente, los métodos cualitativos permiten explorar las razones, opiniones y motivaciones de las partes interesadas en el PRCC. Posteriormente, los métodos cuantitativos se utilizan para medir y cuantificar las variables de interés para establecer relaciones entre ellas.

La metodología permitió adquirir una comprensión detallada del PRCC. La recopilación de datos cualitativos a través de interacciones regulares, acompañada de análisis de datos, proporcionó un desarrollo integral de la investigación, asegurándose que esta no se alejara de la realidad.

6.2. Metodología Cualitativa

El estudio implementó una metodología cualitativa para explorar a profundidad el PRCC en Vitacura. Este enfoque implicó la recolección de datos a través de reuniones con distintos actores clave y miembros del comité directivo del PRCC y de la municipalidad.

6.2.1. Reuniones de recopilación de información

Las reuniones de recopilación de información fueron un componente importante de la metodología cualitativa de la investigación. Estas sesiones tenían un objetivo central de adquirir una comprensión holística del funcionamiento del PRCC. Los directores de la Dirección de Medio Ambiente, Aseo y Ornato (DMAO) desempeñaron un papel fundamental, aportando detalles específicos sobre la implementación y operación del PRCC.

Durante la fase inicial del proyecto, estas reuniones proporcionaron la base conceptual y empírica de la investigación. A medida que se desarrollaba el análisis de los datos, surgían nuevas dimensiones y cuestionamientos que requerían mayor claridad. En consecuencia, se

organizaron reuniones de seguimiento con los directores de la DMAO para entender las interpretaciones emergentes y los análisis con las directrices y expectativas operativas del PRCC. Este diálogo continuo y colaborativo garantizó que la investigación permaneciera alineada con el PRCC, proporcionando una perspectiva detallada y actualizada.

6.2.2. Reuniones de dirección

El propósito de estas reuniones fue presentar los avances del proyecto a los directivos de la municipalidad, asegurándose de que el trabajo realizado estuviera alineado con las metas y expectativas del PRCC y del proyecto. Al inicio de la investigación, se presentó la metodología a utilizar, con el objetivo de ser validada. A medida que el estudio avanzaba, los hallazgos preliminares y las futuras etapas de la investigación se discutían durante estas reuniones, que contaban con la presencia de la alcaldesa de la municipalidad, los directores de la DMAO y otros líderes municipales. Este nivel amplio de participación aseguró que el estudio fuese pertinente a la realidad y beneficiario para todas las partes interesadas en el PRCC.

Estas sesiones de dirección también brindaban un foro para recibir retroalimentación sobre los hallazgos preliminares (por ejemplo, las métricas estimadas a partir de los datos, el tiempo y la distancia recorrida dentro de la comuna por camión, carga total recolectada por sector de la comuna, carga total recolectada semanal, etc). Esta retroalimentación era esencial para ajustar la dirección del estudio, asegurar la precisión de los hallazgos y mejorar la relevancia de los resultados.

6.2.3. Reunión de entrega de proyecto

Para concluir el proyecto, se organizó una presentación final. En esta ocasión, se compartieron los resultados finales del estudio, junto con las recomendaciones derivadas de los hallazgos. Además de la presentación final, se realizó un informe completo del proyecto, el cual fue facilitado a la municipalidad, incluyendo los pasos seguidos en el estudio, los resultados obtenidos, y las recomendaciones que podrían implementar en la municipalidad para mejorar la eficiencia del proceso.

6.2.4. Hallazgos clave de las reuniones con la municipalidad

A lo largo de las reuniones de recopilación de información y las reuniones de dirección, surgieron varios puntos que dictaminaron las limitaciones geográficas y operacionales que se debían tener en cuenta al desarrollar una solución que equilibre la necesidad de una recolección de residuos eficiente e implementable. Estos puntos se mencionan a continuación.

1. Es importante reorganizar la división de zonas con el objetivo que la carga total recolectada por día sea más equilibrada. No obstante, cualquier cambio que se realice no debería dividir las unidades vecinales a lo largo de calles arbitrarias. Esto se debe a que resultaría difícil comunicar a los residentes el calendario de recolección de reciclaje.
2. Las zonas de operación deben ser contiguas. Esto ayudará a garantizar que los servicios de recolección de residuos sean fácilmente accesibles para todos los miembros de la comunidad, independientemente de su ubicación dentro de la comuna.
3. La comuna se encuentra dividida por el río Mapocho y la autopista Américo Vespucio,

como se puede apreciar en la figura 6.1. El segmento azul representa el río Mapocho, mientras que la autopista norte se encuentra justo después del río hacia el norte, y los círculos amarillos representan los pasos que comunican la parte sur de la comuna con la parte norte. Como consecuencia, la zona correspondiente al cronograma de recolección de residuos del día sábado (como se muestra en la figura 2.2) no puede ser modificada con facilidad, debido a las dificultades que los camiones recolectores de reciclaje tendrían para cruzar el río y la autopista ida y vuelta para entrar y salir de esa zona.



Figura 6.1: División geográfica de la comuna por Río Mapocho y Américo Vespucio Norte.

6.3. Metodología Cuantitativa

Esta sección detalla la metodología cuantitativa empleada para la recolección, procesamiento y análisis de datos esenciales para evaluar el funcionamiento del PRCC y proponer alternativas para optimizar el proceso. Para la visualización y estudio de los datos se utilizó el software ArcGIS Desktop apoyado por su librería de Python Arcpy y otras librerías complementarias de Python.

Se llevaron a cabo análisis de datos relacionados con los camiones encargados de la recolección de reciclaje, abarcando un periodo de dos meses: julio y agosto de 2022.

Los datos GPS examinados provienen de aproximadamente 3.000 registros diarios por camión, lo que se traduce en 12.000 registros diarios considerando los 4 camiones. Al tener en cuenta un periodo de cerca de 9 semanas y considerando que las operaciones de retiro de reciclaje se realizan de lunes a sábado, resulta en un total de 648.000 datos geotemporales analizados.

La metodología de esta fase se divide en cuatro etapas, las cuales se describirán a continuación:

1. **Recolección de datos:** Se recopilaron de manera sistemática datos del sistema de recolección de reciclaje en Vitacura, facilitados por la Municipalidad, junto con datos geográficos.
2. **Procesamiento de datos:** Se sometieron los datos a cuatro procesos esenciales:
 - a) Preprocesamiento: Adaptación de los datos para su análisis posterior.
 - b) Tiempo de permanencia: Estimación del tiempo que cada camión pasa en cada calle.
 - c) Cuantificación de carga: Medición de residuos (kg) desglosada por calle.
 - d) Análisis de agrupamientos: Implementación de algoritmos de clusters.
3. **Análisis de datos:** Se llevaron a cabo análisis geoespaciales utilizando los datos procesados. Esta etapa tuvo como finalidad evaluar la eficiencia del PRCC en cuanto a volumen de residuos recolectados, cobertura geográfica y cumplimiento de horarios.
4. **Oportunidades de mejora:** Se propusieron modelos de zonas de recolección alternativas que la Municipalidad podría adoptar para optimizar la recolección de residuos.

6.3.1. Recolección de los datos

El proyecto se apoyó en 3 fuentes esenciales de datos: los mapas detallados de la comuna, los registros geotemporales de los camiones de reciclaje y la documentación de la carga total recolectada diariamente por cada camión. Específicamente, para los dos últimos tipos de datos, la municipalidad mantiene un registro detallado a nivel de “instancia”. Una **instancia** se define como una ruta específica realizada por un camión en una fecha determinada. A continuación, se describirán en detalle estas fuentes de datos.

1. Mapas

Identificar geográficamente las rutas de los camiones de reciclaje requiere información geográfica de la comuna. Para ello se utiliza la información de Open Street Map (OSM).

Utilizando esta información se obtienen los datos geográficos y viales de la comuna de Vitacura. Se identifican atributos de las calles como su dirección, velocidad máxima o tipo de calle (autopista, residencial, pasaje, entre otros). El mapa es descargado en formato shapefile, y posteriormente es cargado a Python, como una matriz, y a ArcGis, que reconoce este tipo de archivos y presenta una visualización del mapa, y sus elementos.

La visualización del mapa de la comuna en ArcGis se muestra en la figura 6.2.



Figura 6.2: Información geográfica de la Vitacura visualizada en ArcGis

2. Datos GPS

La municipalidad cuenta con datos históricos para cada instancia de los camiones de retiro de residuos, que se obtienen desde la plataforma BTRACK, en formato KML.

Para cada instancia, el intervalo de tiempo entre señales enviadas por el GPS es de aproximadamente 10 segundos, variando cuando el camión se encuentra detenido por un período largo de tiempo, como cuando está fuera de su horario de funcionamiento, en donde las señales se envían cada una hora.

El archivo KML se procesó y visualizó en ArcGIS. El resultado se muestra en la siguiente figura 6.3.

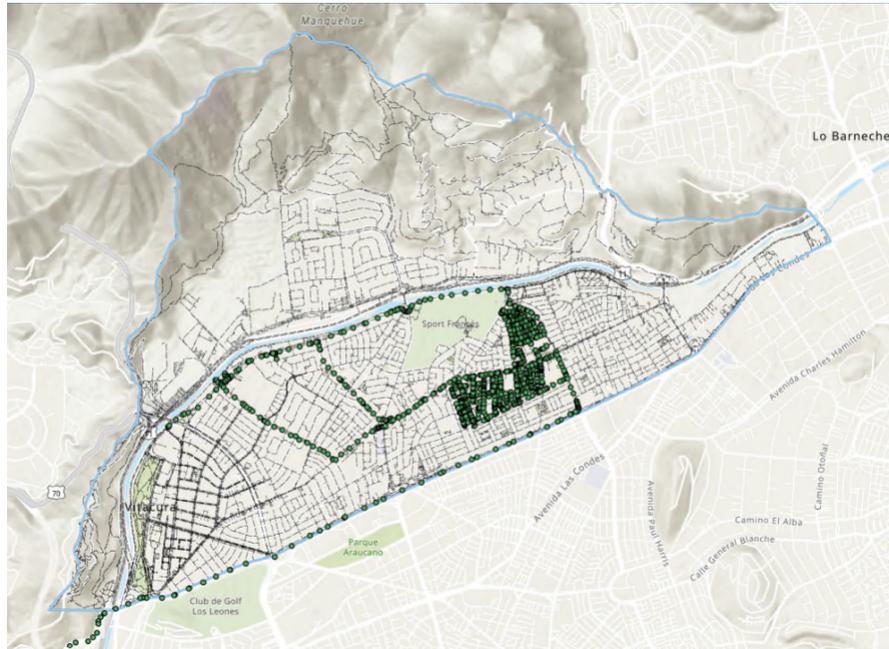


Figura 6.3: Ruta de recolección de vidrio (08/06/22), visualizada en ArcGis

3. Volumen descargado en plantas de reciclaje

La municipalidad mantiene registro de la carga total recolectada en cada instancia. La figura 6.4 ilustra un ejemplo de estos registros, en los que se refleja la cantidad de residuos reciclados recolectados. En la cuarta columna, se puede observar el ID del camión, el cual está asociado a un tipo particular de residuo reciclado que el vehículo está encargado de recoger.

Gracias a los identificadores únicos de cada camión y su relación con los diferentes tipos de residuos reciclados, fue posible realizar un análisis detallado sobre la carga recolectada por cada vehículo en un día específico.

Cabe mencionar que en ciertas ocasiones un camión puede ser sustituido debido a inconvenientes mecánicos. En estos casos, se recurre a los datos de otro camión como sustituto. Estas eventualidades fueron debidamente consideradas en el presente estudio para garantizar la exactitud y confiabilidad del análisis.

FECHA	PROGRAMA	TURNO	N° MC	TIPO DE RES	PESO	MES
12-07-2022	RECICLAJE CASA CASA	DIURNO	3191	RECICLAJE	5140	JULIO
12-07-2022	RECICLAJE CASA CASA	DIURNO	3201	RECICLAJE	693	JULIO
12-07-2022	RECICLAJE CASA CASA	DIURNO	3202	RECICLAJE	1377	JULIO
12-07-2022	RECICLAJE CASA CASA	DIURNO	3207	RECICLAJE	2357	JULIO
11-07-2022	RECICLAJE CASA CASA	DIURNO	3191	RECICLAJE	176	JULIO

Figura 6.4: Extracto de los registros de la cantidad de residuos reciclados recolectados.

6.3.2. Procesamiento de datos

6.3.2.1. Preprocesamiento

El proceso comienza con la carga del mapa de OSM en ArcGIS. Para optimizar el análisis de los datos, se segmenta cada calle en tramos delimitados por intersecciones. Estos tramos descritos en detalle en el Capítulo 4 se definen como la **unidad mínima**.

Posteriormente, se procede a la descarga de datos geotemporales desde la plataforma BTRACK en formato KML, que luego se transforman al formato Shapefile (mismo formato que el mapa cargado). Se descarga un archivo para cada instancia. Es importante señalar que los datos descargados corresponden a los camiones que participaron en la operación del PRCC durante el periodo de estudio.

Con la segmentación de las calles ya establecida, se trabaja en las imprecisiones de las coordenadas GPS. Estas imprecisiones pueden comprometer el análisis, por lo tanto, el paso siguiente es su corrección.

Para corregir la posición de una señal GPS, se examinan secuencialmente todos los puntos GPS de una instancia. Una posición se considera incorrecta si su distancia está a más de 1 metro de una calle (si esta demasiado alejada, se considera el punto como ruido y se elimina). Si las observaciones indican que el camión se desplaza por una única calle, lo que se realiza mirando la posición del punto anterior y posterior, se reposiciona el punto incorrecto al lugar más cercano dentro de la misma calle. Sin embargo, si las observaciones sugieren que el camión ha cambiado de calle, la posición incorrecta se ajusta al punto más cercano entre las dos calles posibles (la calle antes y después de doblar). Es crucial que al corregir una posición esta se reinserte en la secuencia manteniendo el orden cronológico de las observaciones.

Esta fase de corrección se visualiza en la figura 6.5. Los puntos amarillos representan las coordenadas originales, mientras que los puntos azules indican las coordenadas corregidas. Gracias a este ajuste se logra una precisión en la información geoespacial derivada de la ruta del camión.



Figura 6.5: Corrección de datos GPS. Los puntos amarillos representan las coordenadas originales y los puntos azules representan las coordenadas corregidas.

6.3.2.2. Tiempo de permanencia

El concepto de **tiempo de permanencia** hace referencia al intervalo que un camión emplea en una calle para recoger material, distinguiéndolo del tiempo de tránsito. A partir de los datos disponibles, surge la complejidad de identificar entre ambos tiempos. Para superar este desafío, y basándose en el conocimiento del funcionamiento del PRCC, se estructura un procedimiento en tres etapas. Estas etapas se fundamentan en datos semanales, considerando que cada camión recoge reciclaje una vez a la semana por calle. Sin embargo, la ruta que sigue puede llevarlo a transitar más de una vez por la misma calle. Posteriormente, se promedian los resultados obtenidos durante las 9 semanas del periodo de estudio.

El procedimiento se compone de las siguientes etapas:

1. Estimación diaria: Se determina el tiempo que un camión dedica a cada unidad mínima de calle durante la semana. Si transita más de una vez se registra el tiempo máximo considerando que es más probable que el camión se demore más al recoger material.
2. Corrección de valores atípicos: Se identifican y ajustan valores de tiempo que superan los 15 minutos, los cuales en su mayoría corresponden a paradas prolongadas, como los almuerzos de los tripulantes. Estos valores se reemplazan por el valor del percentil 95.
3. Consolidación semanal: Se repite el proceso para los 6 días de operación del camión en la semana, seleccionando el valor máximo de tiempo de permanencia para cada calle.

Para ilustrar el proceso de estimación del tiempo por calle, se presenta el siguiente ejemplo. La figura 6.6.a muestra una secuencia de datos geotemporales de un camión que permite identificar la ruta que sigue. Dado que los puntos GPS no siempre indican cuando un camión

pasa específicamente por una esquina, se busca agregar marcas temporales a la ruta para cada esquina de una unidad mínima (considerando que calles con el mismo nombre pueden tener diferentes identificadores de unidad mínima). Esta identificación se realiza siguiendo la ruta del camión y detectando cambios en el ID de unidad mínima, como se muestra en la figura 6.6.b.

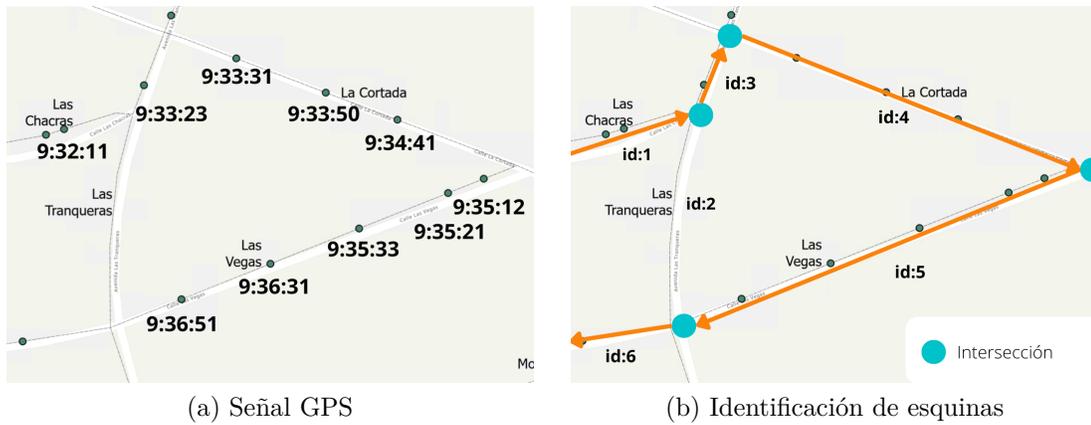


Figura 6.6: Identificación de esquinas

Posteriormente, se asignan marcas temporales a las esquinas basándose en la proporción entre la distancia de la esquina y los puntos GPS adyacentes en la ruta, como se ilustra en las figuras 6.7.a y 6.7.b. Por ejemplo, el tramo CB mide 9 m, luego la proporción $\frac{9}{9+33} = 0,22$, dado que el tiempo total es de 31 s ($9:35:12 - 9:34:41$), el tiempo asignado a BC es de $0,21 \cdot 31 = 6,6$ s. El mismo procedimiento se realiza para el tramo AB, donde su proporción de tiempo es de $1 - 0,21$ o $\frac{33}{9+33}$.

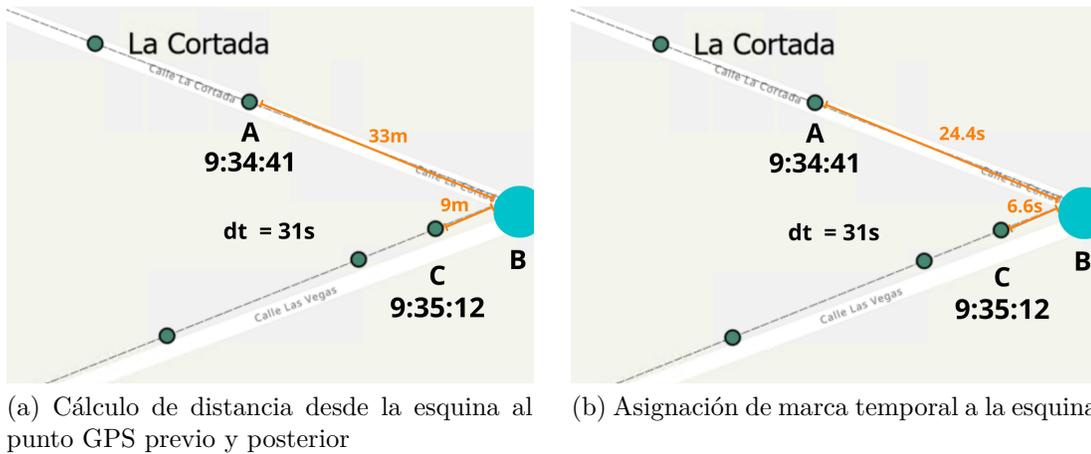
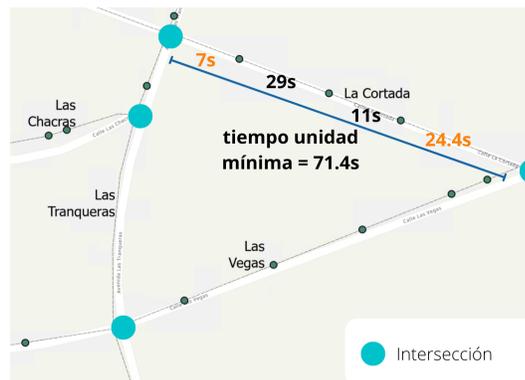


Figura 6.7: Método utilizado para la estimación de tiempo por unidad mínima

Una vez determinadas las marcas temporales, se estima el tiempo de permanencia en cada unidad mínima restando el tiempo entre esquinas consecutivas. En el ejemplo de la figura 6.8.a, el resultado es de 71.4 segundos, lo que sugiere una velocidad aproximada de 10 km/h, consistente con un camión en proceso de recolección de reciclaje.



(a) Cálculo de proporcionalidad del tiempo

Figura 6.8: Estimación de tiempo por unidad mínima

Al finalizar esta etapa, se tiene para el tiempo de recolección para cada camión (recordando que distintos camiones retiran distinto tipo de reciclaje) en cada unidad mínima.

6.3.2.3. Cuantificación de carga

El núcleo del análisis se centra en determinar la cantidad de carga de reciclaje producida en cada calle específica de la comuna. Para alcanzar este fin, el análisis sigue una metodología que se detalla a continuación:

1. **Recolección de Datos:** Se toman en cuenta los datos de carga recolectada por cada camión durante sus respectivas instancias de operación.
2. **Consideración de Tránsito:** Se reconoce que, fuera de la comuna, el camión se dedica únicamente al tránsito, sin realizar actividades de recolección.
3. **Distribución Proporcional:** La carga total recolectada por un camión se distribuye proporcionalmente según el tiempo de recolección asignado a cada unidad mínima dentro de la comuna.
4. **Aplicación Sistemática:** El procedimiento se repite para cada día de la semana, permitiendo al análisis ofrecer una representación precisa de la carga de reciclaje recolectada por camión en cada unidad mínima.

Con los datos recolectados, se calcula el valor promedio de carga de reciclaje para cada camión durante las 9 semanas de análisis, como se ilustra en la figura 6.9, donde se muestra como ejemplo la unidad mínima asignada al id 1.

DOMINGO	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SÁBADO
29	30	31 id 1 15 kg	1	2	3	4
5	6	7 id 1 12 kg	8	9	10	11
12	13	14 id 1 19 kg	15	16	17 id 1 = 15,8 kg	18
19	20	21 id 1 18 kg	22	23	24	25
26	27	28 id 1 15 kg	29	30	1	2

Figura 6.9: Estimación final de carga para cada unidad mínima.

Dado que los camiones de reciclaje manejan diferentes tipos de carga pero operan simultáneamente en la misma zona de la comuna, y considerando la logística y conveniencia para los residentes, se opta por consolidar la carga de recolección de los distintos materiales en cada unidad mínima, lo que se realiza sumando los valores pertinentes. Así, se obtiene un valor único para cada unidad. Estas estimaciones, realizadas semanalmente, se promedian para cada unidad mínima a lo largo del periodo de 9 semanas.

Este análisis detallado proporciona información esencial para diseñar estrategias de gestión de residuos optimizadas, considerando las características específicas de cada sector de la comuna.

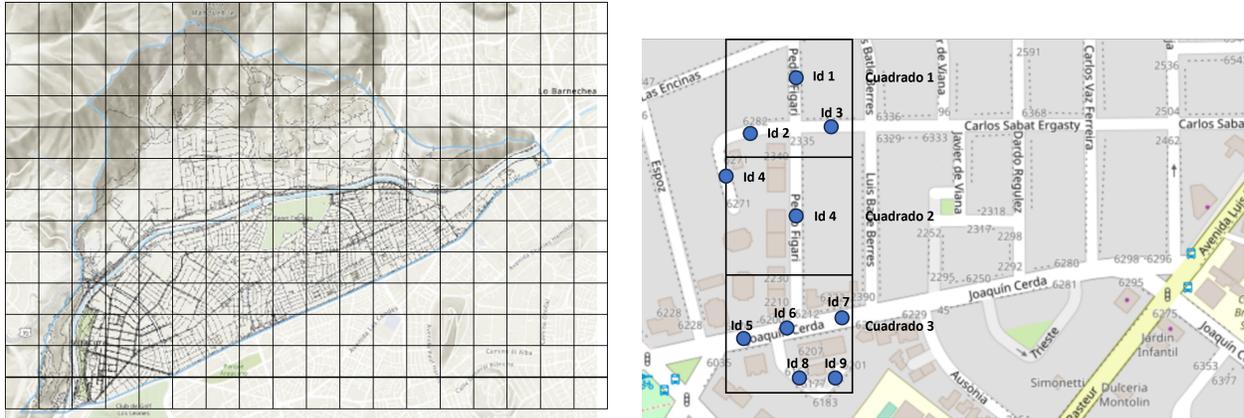
6.3.2.4. Análisis de agrupamientos

La comuna se estructura en una cuadrícula, donde cada celda o cuadrado tiene dimensiones de 100x100 unidades, lo que equivale aproximadamente a un área de 1 metro por lado. Esta división permite una representación detallada y granular de la comuna, facilitando la asignación y cálculo de la carga de reciclaje en áreas específicas.

1. **División en cuadrados:** La comuna se descompone en múltiples cuadrados de 100x100 unidades. Esta estructura granular permite un análisis detallado de cada segmento de la comuna.
2. **Carga por cuadrado:** La carga asignada a cada cuadrado se determina por las calles que se encuentran dentro de su área. Específicamente, se considera la carga de aquellas calles cuyo centroide (o punto central) cae dentro del cuadrado en cuestión.
3. **Centroide de una calle:** El centroide es un punto que representa el centro geométrico de una forma. En el contexto de las calles, el centroide sería un punto que cae en el medio de la longitud de la calle.
4. **Determinación de carga:** Si el centroide de una calle cae dentro de un cuadrado específico, la carga de esa calle se suma al total de carga del cuadrado.

5. **Resultado Final:** Al final del proceso, cada cuadrado tendrá una carga total que representa la suma de la carga de todas las calles cuyo centroide cae dentro de ese cuadrado.

La figura 6.10.a ilustra la segmentación de la comuna en celdas, mientras que la 6.10.b detalla la metodología empleada para calcular la carga por celda. En esta última, la carga asignada a la celda 1 es la suma de las cargas de las calles identificadas con los números 1, 2 y 3. De manera similar, la carga de la celda 2 es la suma de las cargas de las calles 4 y 5.



(a) Representación de la comuna en celdas

(b) Cálculo de carga por celda

Figura 6.10: Segmentación de la comuna usando una retícula y cálculo de carga por celda

Posteriormente, con la carga de cada celda determinada, se llevan a cabo dos procedimientos con el fin de agrupar las celdas en 5 conjuntos (sectores para recolectar reciclaje de lunes a viernes, recordando que el día sábado no se va a modificar), buscando que la carga total de estos sea lo más homogénea posible. Los procedimientos son:

1. Agrupación tomando como referencia individual cada celda.
2. Agrupación basada en unidades vecinales.

Se optó por un algoritmo genético debido a la complejidad de la primera tarea, necesitando flexibilidad y rapidez para hallar agrupaciones óptimas en un tiempo reducido. A diferencia de los modelos de optimización lineal, esta metaheurística es menos restrictiva y halla soluciones eficientes (no necesariamente óptimas) en menos tiempo.

Aunque el primer método de agrupación cumplió con los objetivos matemáticos, al segmentar la comuna en calles particularmente conocidas de la comuna, resultó inviable para la municipalidad comunicar dicha división a los habitantes. A pesar de ajustar manualmente los resultados a calles principales, la municipalidad optó por las unidades vecinales como unidad mínima de agrupación, facilitando aspectos comunicativos y operativos. Los detalles de este análisis se encuentran en los Anexos.

La optimización para agrupar en unidades vecinales es menos desafiante que agrupar celdas individuales. Sin embargo, al ya contar con la metaheurística genética implementada, se decidió mantenerla, evitando invertir tiempo en adaptar otro modelo y aprovechando su rápida convergencia. Los resultados de este análisis se discutirán en el siguiente capítulo.

Capítulo 7

Resultados y Recomendaciones de la Investigación

7.1. Resultados

Los resultados derivados de la estimación de cargas para la operación de retiro de reciclaje en la comuna ofrecen una perspectiva detallada sobre la distribución y concentración de residuos reciclables. A continuación, se detallan y analizan estos hallazgos.

7.1.1. Distribución de cargas por unidad mínima

La Figura 7.1 muestra la distribución espacial de las cargas de reciclaje en la comuna. Los círculos de color negro, que representan estimaciones de carga menores a 10 kg, se concentran principalmente en las calles principales. Esta observación sugiere que estas vías son predominantemente utilizadas para el tránsito de camiones, más que para la recolección de residuos. Por otro lado, los círculos morados indican zonas con una carga estimada mayor o igual a 10 kg, lo que podría señalar áreas con mayor actividad residencial y, por ende, mayor generación de residuos reciclables.

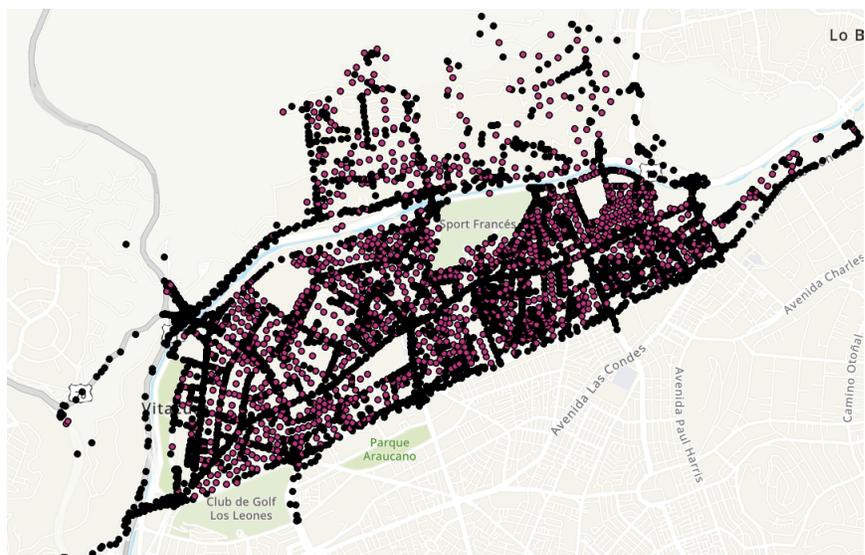


Figura 7.1: Visualización del resultado de la estimación de cargas para la operación de reciclaje

7.1.2. Análisis comparativo entre Calles residenciales

La Figura 7.2 compara la calle Peloponeso con la calle Arquímedes. A pesar de que ambas calles comparten características similares en términos de tipo y cantidad de viviendas, presentan diferencias notables en sus estimaciones de carga de reciclaje. Esta discrepancia podría atribuirse a variaciones en los hábitos de reciclaje de los residentes o a diferencias en la eficiencia de los sistemas de recolección implementados en cada calle.



Figura 7.2: Comparación de estimación de carga de reciclaje en calles similares

7.1.3. Estimación en áreas de alta densidad residencial

La Figura 7.3 muestra la zona que comprende la calle Alonso de Sotomayor. La presencia de varios edificios en esta área justifica la alta estimación de carga de reciclaje de 93 kg. Además, es interesante notar cómo las calles circundantes, que sirven principalmente como vías de tránsito, muestran estimaciones bajas, reafirmando la observación inicial sobre las calles principales.

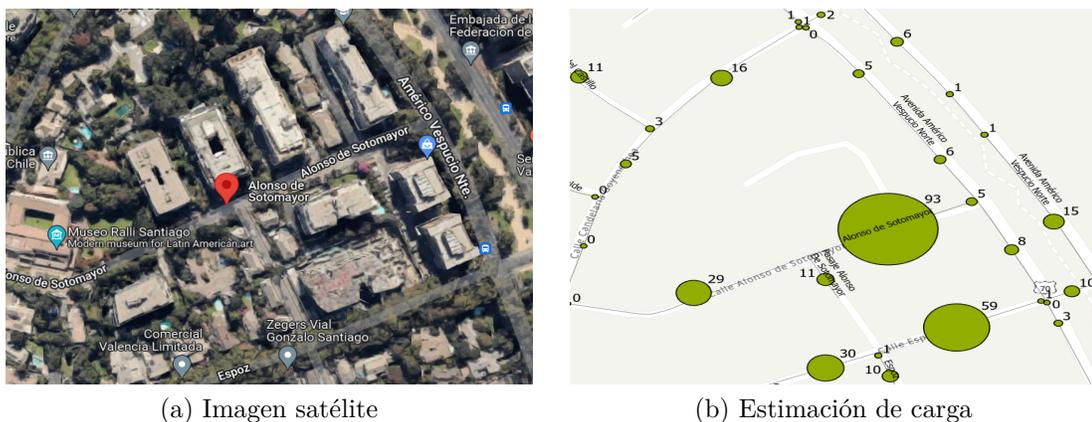


Figura 7.3: Estimación de carga de reciclaje en zona de edificios

7.1.4. Visualización Gráfica de la Distribución de Cargas

La representación gráfica mediante mapas de calor, como se muestra en las Figuras 7.4 y 7.5, es una herramienta valiosa para visualizar la concentración y distribución de cargas en la comuna. La grilla de 100 x 100 cuadrados proporciona una visión detallada, mientras que la grilla de 50 x 50 cuadrados ofrece una perspectiva más general, permitiendo identificar áreas de mayor concentración de carga.

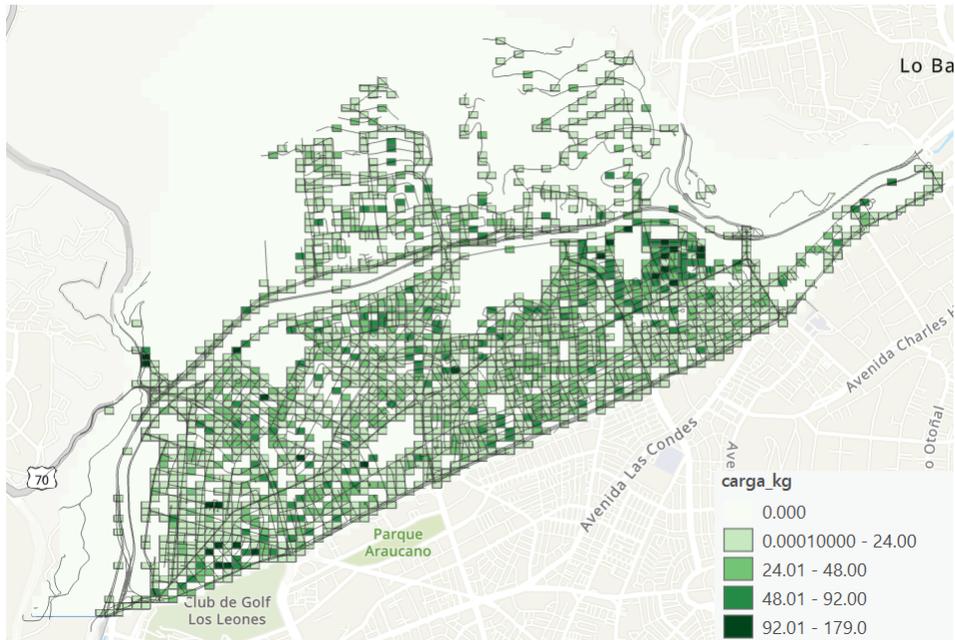


Figura 7.4: Mapa de calor de cargas por cuadrado regular en grilla de tamaño 100x100

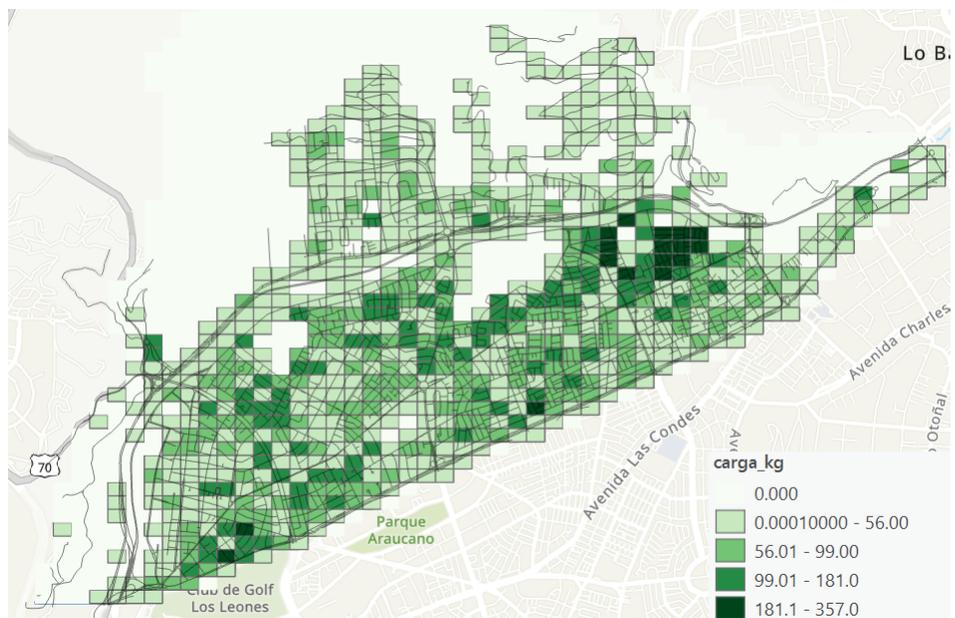


Figura 7.5: Mapa de calor de cargas por cuadrado regular en grilla de tamaño 50x50

7.1.5. Conclusiones Preliminares

Los resultados presentados en esta sección ofrecen una panorámica detallada sobre la generación y distribución de residuos reciclables en la comuna. Estos hallazgos son fundamentales para futuras intervenciones, ya que permiten identificar áreas prioritarias y optimizar las rutas de recolección. Además, el análisis comparativo entre calles similares proporciona insights sobre posibles factores que influyen en la generación de residuos, abriendo la puerta a futuras investigaciones en este ámbito.

7.2. Propuesta de Solución

7.2.1. Análisis de Situación actual

Utilizando la metodología descrita en la sección anterior, se puede medir y evaluar el nivel de cargas para cada una de las 6 sub-áreas actuales de la comuna.

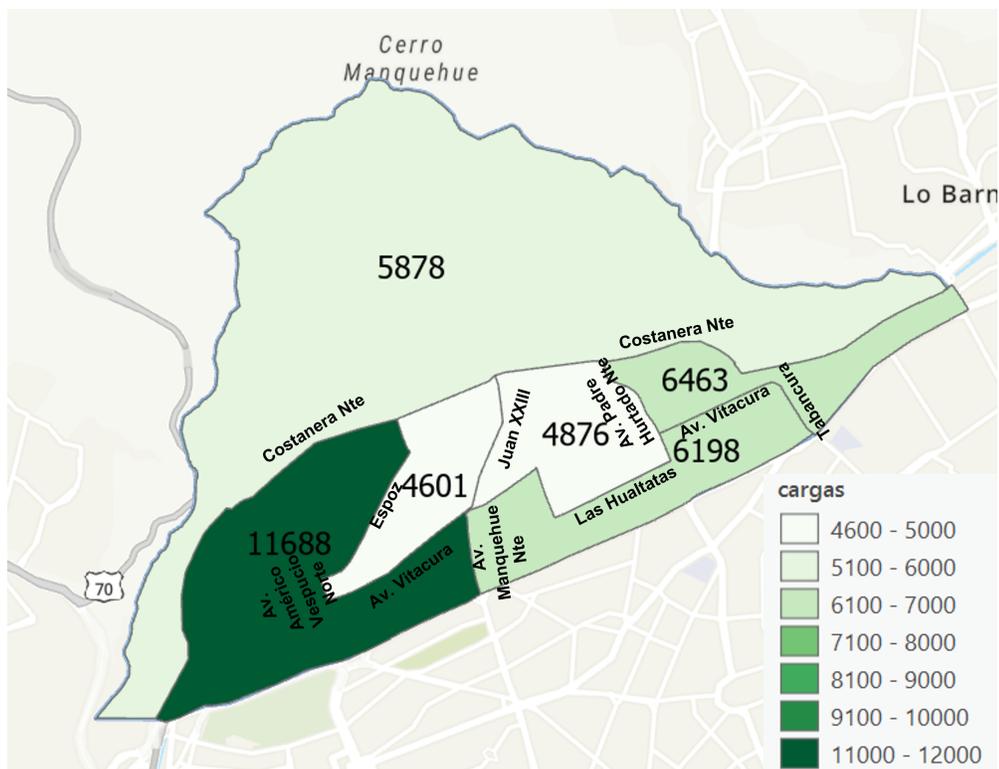


Figura 7.6: Carga en kg por sub-área actual

Como se puede apreciar en la Figura 7.6, la carga entre cada una de las 6 zonas según la zonificación actual se encuentra desbalanceada. Es por esto, que se propone cambiar la zonificación actual por otra que considere una carga balanceada entre cada una de las zonas, equiparando el trabajo que los camiones de reciclaje deberían realizar cada día.

7.2.2. Comparación de la situación actual con datos del municipio vs. estimación realizada

En la siguiente figura se muestra una comparación entre la carga promedio por día calculada utilizando los registros de la municipalidad (del pesaje de los camiones a la hora de descargar en las plantas de reciclaje), lo cual se muestra en azul, y la carga estimada con la metodología descrita sobre la situación actual, en naranja.

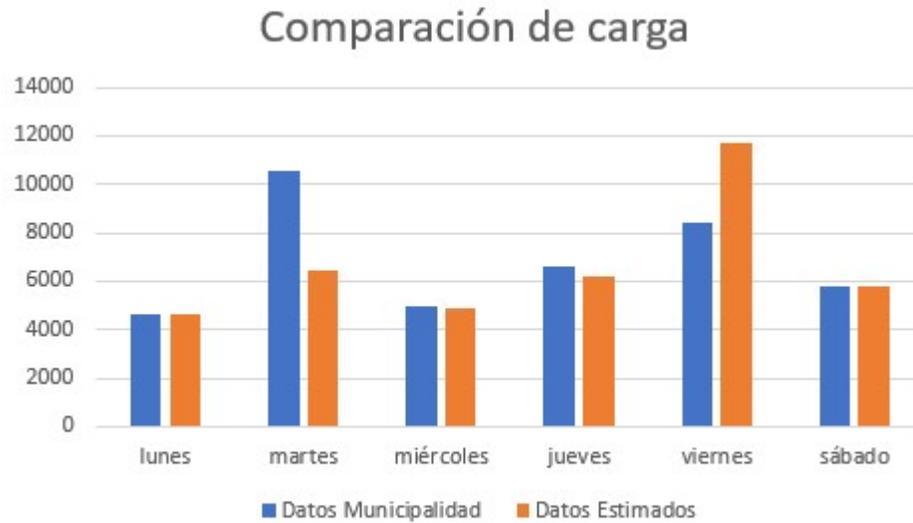


Figura 7.7: Comparación inicial de carga en kg por sub-área actual entre datos de la municipalidad y la estimación realizada

validar la metodología descrita en cuanto a la estimación de cargas por unidad mínima.

7.2.3. Metodología para balancear las cargas

Como metodología para la clusterización del área de la comuna se utiliza el algoritmo genético descrito previamente como primer indicador de propuestas de nuevas zonas. Sin embargo, el algoritmo inicia con 6 focos de carga y se expande de manera iterativa a los sectores colindantes, por lo que no es capaz de identificar limitaciones espaciales propias de la comuna como lo son la presencia de autopistas, zonas de mayor tráfico o factores como la cantidad de ingresos y salidas que tiene una zona en particular. Por lo mismo, se consideran al que la división de subzonas basada en unidades vecinales es un buen enfoque para el modelo ya que facilita el entendimiento de las zonas por parte de vecinos y vecinas permitiéndoles identificar de manera clara la zona a la que pertenecen.

Así, la metodología de clusterización comprende tres etapas: primero se utiliza el algoritmo y su resultado como primer indicador de los focos de carga, luego se asocian los clusters a las unidades vecinales y finalmente, en un proceso iterativo, se calcula la carga de cada cluster y se editan los límites de cada uno de estos con el fin de que se mantengan balanceadas.

7.2.4. División de lógica espacial de la comuna

En el proceso de zonificar la comuna se identifican insights operacionales clave: el sector que actualmente corresponde al día sábado cuenta con baja conexión al resto de la comuna, particularmente la zona correspondiente a Lo Curro. Sin embargo, al ser este un barrio que representa una gran área y debido a que el algoritmo funciona de manera gravitacional y zonifica agregando áreas cercanas al punto de partida, tiende a separar esa zona, como se observa en la Figura 7.10, dado que al tener de un único punto de partida en ese barrio no es capaz de expandirse hasta cubrirla por completo.

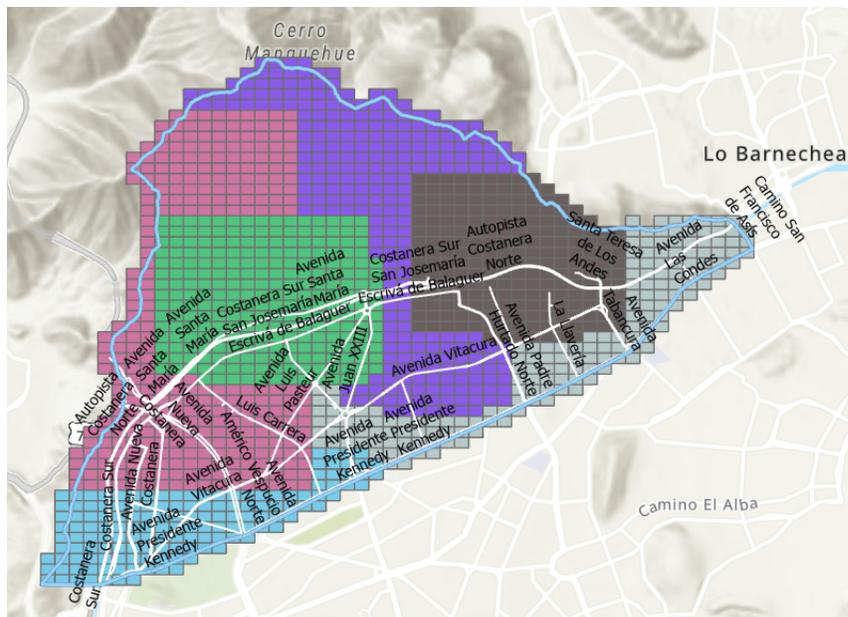


Figura 7.10: Segmentación sin procesar incluyendo zona sábado

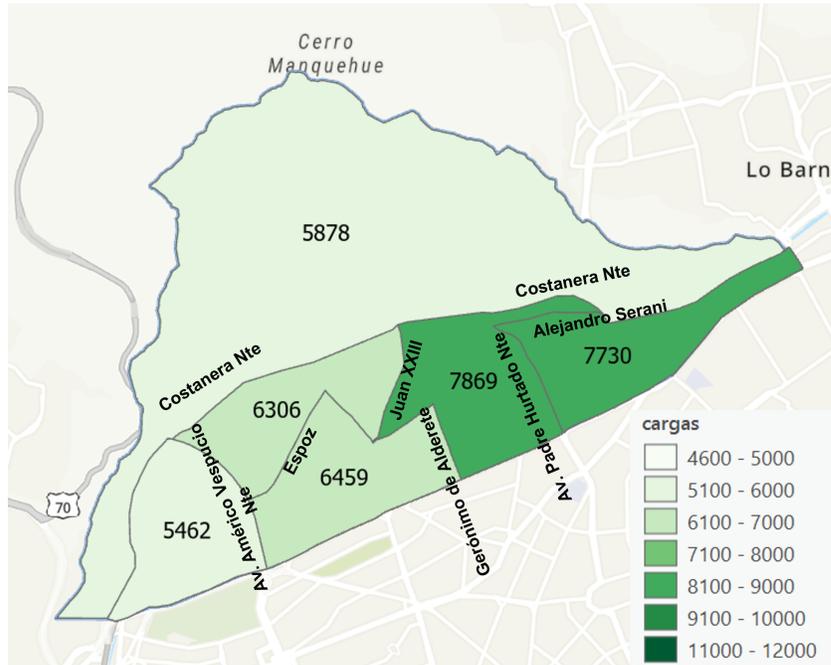
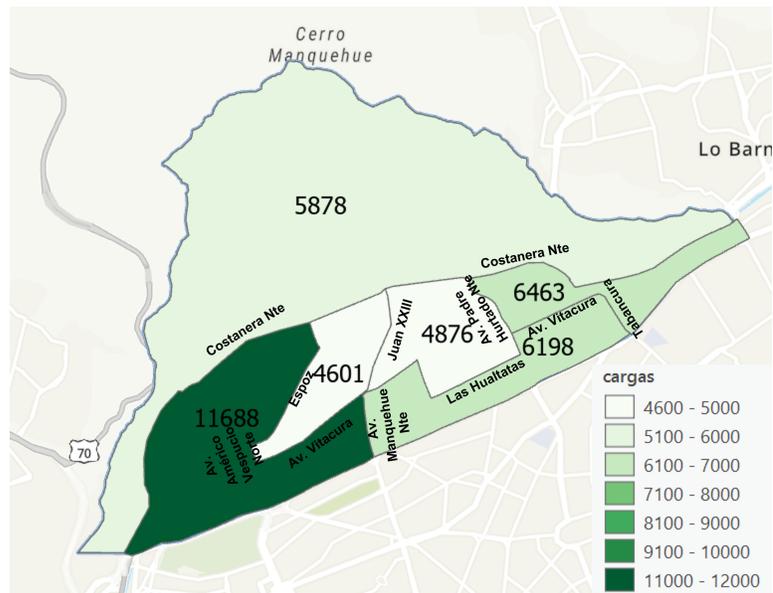


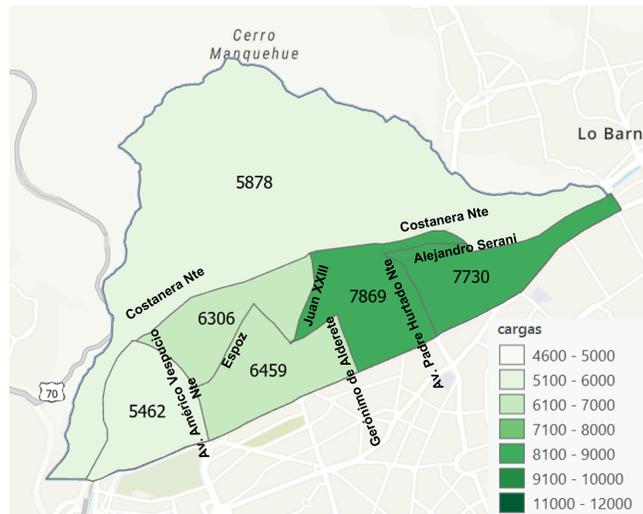
Figura 7.12: Carga en kg por sub-área propuesta

7.2.7. Comparación de situación actual y situación propuesta

En la Figura 7.13.a y la Figura 7.13.b se compara la situación actual con la zonificación propuesta.



(a) Carga en kg por sub-área actual



(b) Carga en kg por sub-área propuesta

Figura 7.13: Comparación de calles zonas actuales y propuestas

En el gráfico de la Figura 7.15 se muestra la distribución de carga para cada uno de los días con la distribución actual (color azul) y la propuesta (color naranja). Éste permite evidenciar el desbalance de cargas existente en la zonificación actual, lo cual se ve disminuido con las nuevas zonas propuestas.

En la siguiente figura se propone que día asignar a cada zona propuesta.

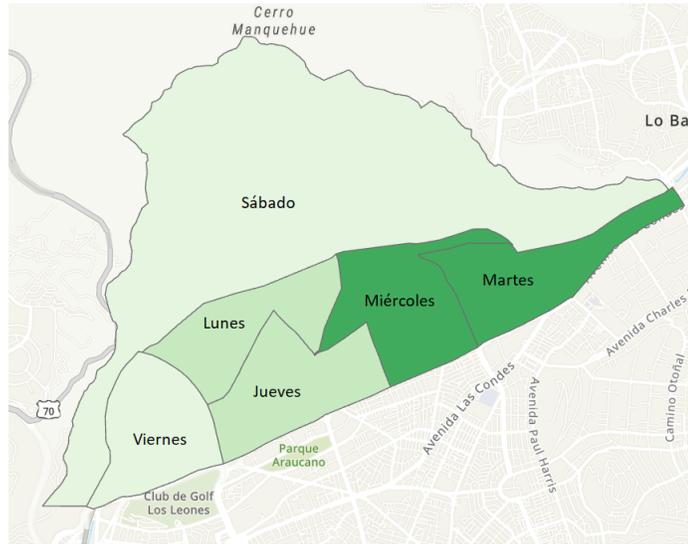


Figura 7.14: Asignación de días para cada cluster propuesto

Las zonas propuestas se componen de las siguientes unidades vecinales:

- Lunes: A4 y A5
- Martes: 10, 11 y 15
- Miércoles: A7, A8, A9 y 14
- Jueves: A2, A3 y A6
- Viernes: A1
- Sábado: 12 y 13

En la siguiente figura se muestra una comparación de la carga promedio por día entre los meses de Julio y Agosto de 2022. Se muestra la carga calculada utilizando los datos del municipio (en azul) vs. la carga estimada utilizando la zonificación propuesta (en naranja).

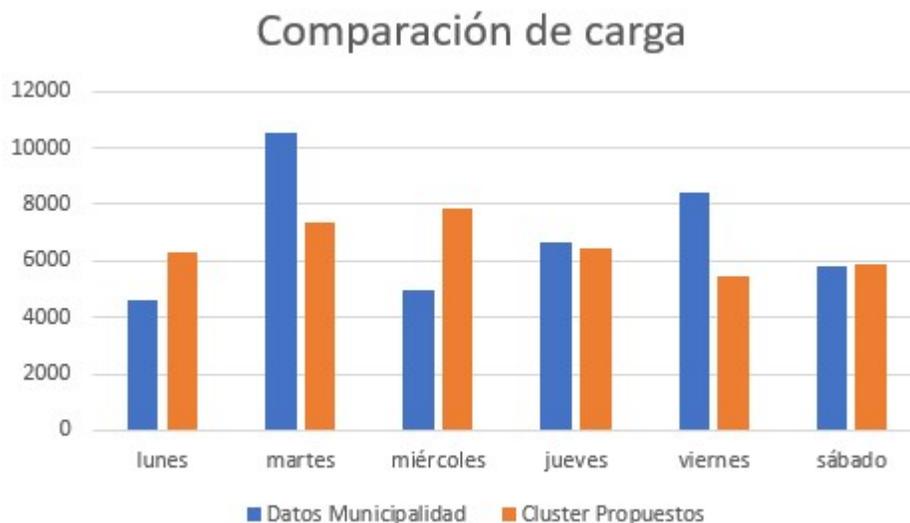


Figura 7.15: Comparación de cargas entre las sub-áreas actuales y las sub-áreas propuestas

Se concluye que la zonificación propuesta equipara la carga de reciclaje que se retira por día, y se ajusta a las unidades vecinales, lo que simplifica su implementación.

7.3. Conclusión

La presente investigación ha permitido identificar mejoras clave en la gestión de residuos mediante el análisis cuantitativo y el estudio gráfico de los kilogramos recolectados diariamente. Este análisis revela que la metodología propuesta mejora sustancialmente la distribución de la recolección, ofreciendo un enfoque más equilibrado que el actual esquema municipal. Con un pico que se reduce de 12.417 kg a 8.667 kg los martes, la metodología equilibra la carga a lo largo de la semana, favoreciendo la uniformidad en el servicio.

Además, se observa una reducción de la variabilidad diaria con una diferencia notablemente menor entre los días de recolección más y menos intensivos, pasando de una brecha de 7.000 kg a una de 2.833 kg. Esto implica una mejora en la eficiencia operativa y una planificación más robusta. Asimismo, la optimización de recursos se ve beneficiada por una asignación de equipo y personal más estable, reduciendo el riesgo de sobrecargas operativas y aumentando la productividad.

Los impactos de la metodología propuesta son significativos en diversas áreas:

- **Operacionalmente:** la previsibilidad y la eficiencia se ven mejoradas, permitiendo una gestión más eficaz de la flota y del personal, con el consecuente incremento en la calidad del servicio de recolección y la calidad de vida de los trabajadores.
- **Económicamente:** la distribución equitativa de la recolección diaria promete costos operacionales más consistentes y predecibles, optimizando la asignación de recursos y evitando ineficiencias.

Es importante destacar que los martes y viernes que anteriormente presentaban una carga de trabajo considerablemente alta, ahora muestran una carga más alineada con la de otros

días de operación. Se anticipa que con esta redistribución se reducirá el trabajo realizado fuera del horario estipulado. Aunque esta situación podría tener implicaciones económicas, no se ha llevado a cabo una valoración debido a la falta de datos de costos necesarios para el análisis correspondiente.

La implementación de esta metodología no solo mejoraría la gestión de residuos sino que también establece un precedente para la adopción de prácticas innovadoras y adaptables en la administración municipal.

7.3.1. Evaluación de la propuesta frente a la situación actual

La propuesta de reestructuración en la zonificación y recolección presenta varias ventajas en términos de eficiencia y adaptabilidad, aunque no exenta de desafíos inherentes a su implementación.

7.3.1.1. Ventajas

La optimización de zonas conlleva a una mayor eficacia en la recolección de residuos. La redistribución y balance de cargas aseguran un servicio equitativo, evitando la sobrecarga en determinadas zonas. Las estimaciones precisas que proporciona la nueva metodología posibilitan una asignación de recursos más acertada, y la claridad en la delimitación de zonas mejora la comunicación con la comunidad. Además, la flexibilidad de la propuesta permite ajustes periódicos frente a variaciones en la generación de residuos o cambios demográficos.

- Optimización de Zonas: Se logra una mayor eficiencia en las zonas de recolección.
- Balance de Cargas: La redistribución y balance de las cargas de reciclaje entre las diferentes zonas evitan la sobrecarga en áreas específicas, garantizando un servicio más equitativo en la comuna.
- Mayor Precisión: La metodología utilizada permite obtener estimaciones más precisas, facilitando una mejor planificación y asignación de recursos.
- Claridad para la Comunidad: Al ajustar las zonas según unidades vecinales, se facilita la identificación por parte de la comunidad, permitiendo una mejor comunicación y comprensión del sistema de reciclaje.
- Flexibilidad: La propuesta puede ser ajustada y recalibrada periódicamente para adaptarse a cambios en la generación de residuos o en las condiciones de la comuna.
- Disminución de horas de trabajo fuera del horario establecido.

7.3.1.2. Desventajas

No obstante, se anticipan desafíos como la confusión inicial durante la implementación de nuevas rutas, costos asociados al rediseño operativo y capacitaciones, así como la resistencia al cambio por parte de operarios y ciudadanos. La necesidad de ajustes constantes y la dependencia de la calidad de los datos recopilados para la precisión de la zonificación también son aspectos a considerar.

- Implementación: Cambiar la zonificación y las rutas de recolección puede generar confusión inicial tanto en los operadores de los camiones de reciclaje como en la comunidad.

- **Costos Iniciales:** La puesta en marcha de la nueva zonificación puede conllevar costos asociados a la reconfiguración de rutas, capacitación de personal, y comunicación a la comunidad.
- **Resistencia al Cambio:** Cualquier cambio en sistemas establecidos puede enfrentar resistencia tanto a nivel operativo como comunitario.
- **Ajustes Periódicos:** La necesidad de recalibrar y ajustar las zonas periódicamente puede generar inestabilidad en la operación.
- **Dependencia de Datos:** La efectividad del sistema propuesto depende de la calidad y precisión de los datos recopilados. Si los datos no son precisos o están desactualizados, las estimaciones y la zonificación podrían no ser óptimas.

La valoración de estos aspectos es crucial para la adopción de la nueva metodología de recolección de residuos. Si bien las ventajas apuntan hacia una gestión más eficiente, es fundamental considerar los posibles obstáculos y costos para asegurar una implementación efectiva y sostenible.

7.3.2. KPIs y Mejoras

La metodología propuesta ha sido evaluada a través de diversos KPIs, mostrando mejoras significativas en la gestión de la recolección de residuos:

1. Variabilidad de Carga Semanal:

- **KPI:** Desviación estándar de las cargas diarias.
- **Datos actuales:** Aproximadamente 2.625 kg.
- **Propuesta:** Aproximadamente 1.192 kg.
- **Mejora:** Una reducción del 55 % en la variabilidad, lo que indica una distribución más uniforme de las cargas a lo largo de la semana con la propuesta.

2. Diferencia entre Carga Máxima y Mínima:

- **KPI:** Diferencia entre el día con la carga más alta y el día con la carga más baja.
- **Datos actuales:** Aproximadamente 7.000 kg.
- **Propuesta:** Aproximadamente 2.833 kg.
- **Mejora:** Una reducción del 60 % en la diferencia entre cargas máximas y mínimas, lo que sugiere un equilibrio más significativo en las cargas diarias con la propuesta.

3. Días por Encima del Promedio:

- **KPI:** Número de días con cargas por encima del promedio.
- **Datos actuales:** 3 días.
- **Propuesta:** 3 días.
- **Mejora:** Aunque el número de días por encima del promedio permanece constante, la propuesta reduce significativamente la magnitud por la que algunos días exceden el promedio.

4. Eficiencia en la Distribución de Cargas:

- KPI: Porcentaje de días que se encuentran dentro del 10 % del promedio diario.
- Datos actuales: 33 % (2 de 6 días).
- Propuesta: 67 % (4 de 6 días).
- Mejora: Un aumento del 34 % en la eficiencia de distribución, lo que indica que más días están cerca del promedio diario con la propuesta.

Estos KPIs demuestran que la metodología propuesta logra una distribución más equilibrada de las cargas diarias en comparación con los datos actuales de la municipalidad. Estos hallazgos son esenciales para comprender las ventajas operativas, económicas y ambientales de la propuesta en comparación con el sistema actual.

En resumen, la evaluación detallada de la solución propuesta a través de indicadores de desempeño clave (KPIs) sugiere una notable mejora en la gestión de residuos. La reducción en la variabilidad de las cargas semanales y la menor diferencia entre las cargas máximas y mínimas son indicativos de una operación más predecible y equilibrada. Esto, a su vez, refleja una optimización en la asignación de recursos y una posible reducción de costos operativos. Aunque se identifican desafíos en la implementación de la nueva metodología, como la resistencia al cambio y la necesidad de inversión inicial, los beneficios proyectados en eficiencia operativa, impacto ambiental y satisfacción social sugieren que los esfuerzos necesarios para superar estos obstáculos son justificables. La propuesta no solo implica una mejora inmediata en la gestión de residuos sino que también promueve la sostenibilidad y la capacidad de adaptación a largo plazo de los servicios municipales, estableciendo un modelo para futuras innovaciones en la administración pública.

Capítulo 8

Discusión

Vitacura, como se destacó en el Capítulo 1, es una comuna de Chile que representa prosperidad y modernidad. Sus programas ligados a la sostenibilidad representan el compromiso de la comuna con un mundo más sustentable. Esta cultura comunal ha influenciado la percepción y la actitud hacia el reciclaje. En este contexto, la gestión adecuada de residuos no es solo una necesidad, sino una expectativa.

El Programa Reciclaje Casa a Casa, analizado detalladamente en el Capítulo 2, ha sido una respuesta a esta expectativa. Si bien ha demostrado ser valioso, la investigación ha identificado áreas de mejora. Estas áreas no solo presentan desafíos sino también oportunidades para innovar, optimizar y reforzar el compromiso con el medio ambiente.

El análisis del programa es apoyado por fundamentos teóricos y una revisión literaria, estableciendo un marco para la propuesta de soluciones adaptativas. Estas soluciones, como se sugiere en el Capítulo 3, deben ser dinámicas. La gestión de residuos, especialmente en una comuna en constante evolución como Vitacura, no es estática. Las soluciones de hoy pueden no ser adecuadas para mañana, lo que subraya la importancia del monitoreo continuo y la adaptación.

Dentro de los fundamentos teóricos presentados en el Capítulo 4, se introdujeron conceptos clave que sirvieron como base para el análisis y las propuestas establecidas. Estos fundamentos junto con las tendencias globales identificadas en el Capítulo 5, resaltan la necesidad de un enfoque holístico. No se trata solo de recolectar y gestionar residuos, sino de hacerlo de manera que se alinee con las mejores prácticas. Además, las tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial y el Internet de las Cosas ofrecen nuevas oportunidades para optimizar la recolección y gestión de residuos.

La metodología detallada en el Capítulo 6 no solo proporcionó una estructura para la investigación, sino que también reforzó la validez de los hallazgos. Estos hallazgos, presentados en el Capítulo 7, forman la base de esta discusión. Es crucial mencionar que, si bien se han identificado áreas de mejora, también se han observado aspectos positivos que pueden servir como pilares para futuras iniciativas.

Más allá de las conclusiones actuales, hay múltiples áreas de interés para futuras investigaciones. El rápido cambio de áreas en desarrollo, impulsado tanto por avances tecnológicos

como por cambios en el comportamiento humano abre una las puertas a soluciones innovadoras. Estudiar más a fondo el comportamiento y las actitudes de los residentes hacia el reciclaje, examinar el impacto potencial de las tecnologías emergentes en la recolección y gestión de residuos, y evaluar cómo el diseño y la planificación urbana pueden influir en la sostenibilidad son algunas de las muchas áreas que quedan abiertas para la exploración.

La colaboración intersectorial también emerge como un aspecto crucial. La gestión de residuos no es solo responsabilidad de las autoridades o de las entidades de gestión, sino que además requiere la cooperación activa de residentes, empresas y otros actores clave.

Finalmente, es esencial reconocer el impacto del Programa Reciclaje Casa a Casa en Vitacura. Sin embargo, para garantizar un futuro sostenible, es fundamental que las partes interesadas continúen evaluando, adaptando y mejorando la gestión eficaz de residuos en Vitacura, lo que representa una oportunidad para demostrar liderazgo en sostenibilidad.

Capítulo 9

Bibliografía

Vergara, S. E., & Tchobanoglous, G. (2012). Municipal solid waste and the environment: A global perspective. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 37, 277–309. doi:10.1146/annurev-environ-050511-122532

Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington, DC: World Bank. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10986/30317> License: CC BY 3.0 IGO.

Gedefaw, M. (2015). Assessing the current status of solid waste management of Gondar town, Ethiopia. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 4(09). ISSN 2277-8616. Disponible en: www.ijstr.org

Ezugwu, L. A., Ozor, P. A., & Nwanya, S. C. (2019). Municipal solid waste collection and disposal approaches: A review. En *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Bangkok, Thailand, March 5-7. IEOM Society International.

Grazhdani, D. (2016). Assessing the variables affecting on the rate of solid waste generation and recycling: An empirical analysis in Prespa Park. *Waste Management*, 48, 3–13. doi:10.1016/j.wasman.2015.09.028

Kontokosta, C. E., Hong, B., Johnson, N. E., & Starobin, D. (2018). Using machine learning and small area estimation to predict building-level municipal solid waste generation in cities. *Computers, Environment and Urban Systems*, 70, 151–162. doi: [10.1016/j.compenvurbsys.2018.03.004](https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2018.03.004)

Burnley, S. J. (2007). A review of municipal solid waste composition in the United Kingdom. *Waste Management*, 27(10), 1274–1285. doi:[10.1016/j.wasman.2006.06.018](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.06.018)

- Zhang, H., Ge, H., Yang, J., & Tong, Y. (2021). Review of Vehicle Routing Problems: Models, Classification and Solving Algorithms. *Archives of Computational Methods in Engineering*.
- Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59(3), 345–358. doi:[10.1016/0377-2217\(92\)90192-C](https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90192-C)
- Akbarpour, N., Salehi-Amiri, A., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Oliva, D. (2021). An innovative waste management system in a smart city under stochastic optimization using vehicle routing problem. *Soft Computing*, 25(8), 6707–6727. doi:[10.1007/s00500-021-05669-6](https://doi.org/10.1007/s00500-021-05669-6)
- Akhtar, M., Hannan, M. A., Begum, R. A., Basri, H., & Scavino, E. (2017). Backtracking search algorithm in CVRP models for efficient solid waste collection and route optimization. *Waste Management*, 61, 117–128. doi:[10.1016/j.wasman.2017.01.022](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.022)
- Purcell, M., & Magette, W. L. (2009). Prediction of household and commercial BMW generation according to socio-economic and other factors for the Dublin region. *Waste Management*, 29(4), 1237–1250. doi:[10.1016/j.wasman.2008.10.011](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.10.011)
- Anagnostopoulos, T., Kolomvatsos, K., Anagnostopoulos, C., Zaslavsky, A., & Hadjiefthymiades, S. (2015). Assessing dynamic models for high priority waste collection in smart cities. *Journal of Systems and Software*, 110, 178–192. doi:[10.1016/j.jss.2015.08.049](https://doi.org/10.1016/j.jss.2015.08.049)
- Das, S., Lee, S.-H., Kumar, P., Kim, K.-H., Lee, S. S., & Bhattacharya, S. S. (2019). Solid waste management: Scope and the challenge of sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 228, 658–678. doi:[10.1016/j.jclepro.2019.04.323](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.323)
- Daskalopoulos, E., Badr, O., & Probert, S. D. (1998). An integrated approach to municipal solid waste management. *Resources, Conservation and Recycling*, 24(1), 33–50. doi:[10.1016/s0921-3449\(98\)00031-7](https://doi.org/10.1016/s0921-3449(98)00031-7)
- Gardiner, R., & Hajek, P. (2020). Municipal waste generation, R&D intensity, and economic growth nexus – A case of EU regions. *Waste Management*, 114, 124–135. doi:[10.1016/j.wasman.2020.06.038](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.038)
- Rosecký, M., Šomplák, R., Slavík, J., Kalina, J., Bulková, G., & Bednář, J. (2021). Predictive modelling as a tool for effective municipal waste management policy at different territorial levels. *Journal of Environmental Management*, 291, 112584. doi:[10.1016/j.jenvman.2021.112584](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112584)
- Grazhdani, D. (2016). Assessing the variables affecting on the rate of solid waste generation and recycling: An empirical analysis in Prespa Park. *Waste Management*, 48, 3–13. doi:[10.1016/j.wasman.2015.09.028](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.028)