



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y SISTEMAS
ICS1113-OPTIMIZACIÓN

Informe 3

Distribución de Centros de Reciclaje Grupo 23

Cristóbal Álvarez Sánchez - 2064440J - sección 3
Sebastián Cárcamo Galdames - 20640676 - sección 2
María Paz Fernández Aburto - 20641389 - sección 1
Lukas Guthrie Facuse - 196261 - sección 1
Fernando Jara Donoso - 21642788 - sección 2

Fecha entrega: Jueves 26 de Octubre de 2023

Índice

1. Descripción del Problema	3
1.1. Contexto y Desafíos	3
1.2. Nivel de Impacto	3
1.3. Objetivos y Decisiones	4
1.4. Supuestos del Modelo	4
2. Modelación del Problema	5
2.1. Conjuntos	5
2.2. Parámetros	5
2.3. Variables de Decisión	5
2.4. Restricciones	5
2.5. Función Objetivo	7
3. Definición de datos	7
3.1. Conjuntos	7
3.2. Parámetros	10
4. Resolución del Problema	11
5. Validación del Resultado	11
6. Referencias Bibliográficas	12

1. Descripción del Problema

1.1. Contexto y Desafíos

Hoy en día, vivimos en una época donde todo el mundo está afectado por el impacto del cambio climático, ya sea por los desastres naturales que causa, o por la escasez de agua disponible para su consumo humano. De tal forma, es de suma importancia la optimización de recursos ya disponibles, la reutilización o reciclaje de basura, y la disminución de la sobreexplotación de los recursos naturales no renovables, como lo son la madera, el agua y los minerales. De los países pertenecientes a la OCDE, el promedio del porcentaje de basura proveniente de hogares que se separa para algún tipo de reciclaje o reutilización es de 30 %, lo que dista de manera significativa con el 1,8 % de Chile (CIPER, 2019).

Específicamente, la comuna de Las Condes proyecta una población de 341.183 habitantes para el año 2023 (BCN, 2023), siendo una de las comunas más habitadas del país, lo que la hace candidata para implementar una distribución óptima y efectiva de puntos de reciclaje, puesto que, según una encuesta realizada por el Centro de Investigación para la Sustentabilidad de la UNAB, el aspecto más criticado, con un índice del 44 %, es la dificultad de reciclar por la lejanía que tienen las personas de los puntos de reciclaje (Alarcón, 2022). Así, esta implementación podría contribuir a la disminución del impacto que tiene el cambio climático en el país y en el mundo, además de poder ser una fuente de inspiración para más comunas, donde el tomador de decisiones correspondería a cada municipalidad respectiva. En particular, según la información entregada por el Ministerio del Medio Ambiente de los puntos de reciclaje (2023), se puede notar que todos los puntos disponibles se encuentran en la zona poniente de la comuna, lo que no tiene mucho sentido, ya que en la zona oriente es donde se encuentra gran parte de la zona residencial de la comuna, y en la práctica es más difícil para las familias poder reciclar si están lejos de estos puntos.

Actualmente, cabe destacar que la comuna ya cuenta con un sistema de reciclaje, el cual dispone de 10 puntos de reciclaje llamados puntos limpios, los cuales incluyen 4 contenedores para reciclar: papeles y cartones, botellas plásticas (PET), envases de vidrio y TetraPak, además de un número de puntos móviles con contenedores similares a su contra-parté estática. A esto, se le incluye un centro de reciclaje llamado punto verde, que además de los residuos reciclables mencionados, cuenta con facilidades para reciclar residuos como electrodomésticos, metales o muebles (Municipalidad Las Condes, 2023). Si bien este sistema existe, no se consideran los gastos que este incurre, lo que puede provocar que otras comunas de menores recursos no tengan el capital necesario para implementar una solución similar manteniendo su presupuesto, entre los costos de instalación de nuevos puntos de reciclaje y los costos necesarios para que los camiones puedan realizar el retiro de residuos. Al optimizar y buscar minimizar costos, se puede presentar un ejemplo que permita homologar esta solución en otras comunas con alta densidad de población que tengan un presupuesto fijo, de forma de no solo ofrecer una fuente para que las personas puedan deshacerse de residuos en sus hogares, sino que también de ayudar a la disminución del impacto que está teniendo el cambio climático y la acumulación de basura.

1.2. Nivel de Impacto

Es valioso resolver este problema debido a que una distribución óptima de los centros de reciclaje permitiría una mayor participación de los residentes en el reciclaje y la sostenibilidad, de forma que, promoviendo una mayor conciencia del medio ambiente y haciendo que el reciclaje sea más accesible, se puede lograr un cambio cultural hacia prácticas de consumo y gestión de residuos responsable. Además, facilitar la separación y el depósito de elementos reciclables, disminuiría la cantidad de desechos destinados a vertederos, de manera que se reduciría la contaminación del suelo y/o el agua, junto con las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción de nuevos materiales, ya que promovería el ahorro de recursos naturales al reducir la necesidad de extraer y procesar materias primas. También, desde una distribución óptima de centros de reciclaje, es posible generar beneficios económicos en términos de reducción de costos operativos y de gestión de residuos. Todos estos beneficios pueden, además, servir de ejemplo para la homologación en otras comunas del país, favoreciendo una mayor conciencia por el medio ambiente en la población.

De este modo, optimizar la distribución de centros de reciclaje en la comuna de Las Condes no solo tendría un impacto cuantitativo en cuanto a reducción de costos y ahorro de recursos, sino que también se generarían beneficios cualitativos en materia de la mejora del medio ambiente y la conciencia ciudadana. De tal forma, la inversión en esta resolución sería capaz de tener un retorno significativo en torno a la sostenibilidad, la calidad de vida y la responsabilidad social.

1.3. Objetivos y Decisiones

La implementación de un sistema de puntos de reciclaje refleja el compromiso de la Municipalidad con la sustentabilidad ambiental. En este proyecto, el tomador de decisiones será la Municipalidad de Las Condes, en donde los objetivos primordiales que persigue son fomentar la participación activa de los ciudadanos en la gestión de residuos, mejorar la imagen de la comuna ante sus residentes y visitantes, y también prosperar en el bienestar de la comunidad. También se busca ahorrar costos, ya que, en muchas ocasiones el reciclaje puede ser más económico que la disposición tradicional de residuos, y al reducir la cantidad de residuos que necesitan ser llevados a vertederos o incinerados, la municipalidad puede reducir los costos asociados con una buena gestión de residuos. En este contexto, es la Municipalidad quien debe decidir, a partir de un presupuesto dado, si se deben agregar puntos de reciclaje extra y cómo destinar los camiones de reciclaje a los puntos para poder cubrir la necesidad de toda la comuna. Todo lo anterior, sujeto a algunas restricciones, tales como que no se debe gastar más del presupuesto dado, se debe satisfacer la demanda de la comuna, los camiones que pasen recogiendo la carga no pueden exceder su capacidad máxima y deben operar tantos camiones según cuánto material exista para retirar, entre otros. Para todo este proceso se espera medir el impacto de nuestro modelo en un plazo de una semana, cuyo valor pueda ser escalado a un periodo mayor.

1.4. Supuestos del Modelo

Se deben considerar ciertos supuestos, como:

1. El material recicitable se encuentra separado correctamente, sin necesidad de requerir tiempo o herramientas extra de separación.
2. La demanda de reciclaje de una zona de la comuna incluye todo tipo de material en ella, sin discriminar por tipo de residuo.
3. Los puntos de reciclaje se distribuyen dentro de las zonas de las comunas de forma que sean óptima su instalación, es decir, que no estén ocupadas por otra infraestructura u obstruyendo la vía pública, en lugares que la gente ocupara.
4. Las personas de la comuna pueden hacer uso de los puntos de reciclaje a cualquier hora del día.
5. El costo por colocar un punto de reciclaje extra es independiente de la cantidad de tipos de materiales reciclables que tenga, es decir, el costo para un nuevo punto de reciclaje siempre es el mismo.
6. Los puntos de reciclaje extras son móviles, dado a que son un modelo de camión con las facilidades de recibir material reciclable. Por lo mismo, estos puntos se llevan directamente a ser desechados, sin ser retirados por camiones de retiro normales, es decir, no se mezclan.
7. Los puntos móviles y los camiones pueden o no utilizarse ciertos días.
8. Los camiones tienen una ruta fija de recorrido, es decir, todos los camiones pasan por la misma ruta hasta que no quede basura por retirar.

2. Modelación del Problema

2.1. Conjuntos

- $d \in \{0, \dots, D\}$: Días de la semana.
- $p \in \{1, \dots, P\}$: Puntos de reciclaje disponibles.
- $t \in \{1, \dots, T\}$: Puntos de reciclaje móviles extra disponibles.
- $z \in \{1, \dots, Z\}$: Zonas comunales.
- $a \in \{1, \dots, A\}$: Camiones disponibles.

2.2. Parámetros

- VCB : Volumen de reciclaje máximo aceptado por un punto de reciclaje.
- VCE : Volumen de reciclaje máximo aceptado por un punto de reciclaje extra.
- $De_{z,d}$: Demanda diaria en volumen de reciclaje de la zona comunal.
- CO : Costo de utilización de un camión de retiro de reciclagres.
- Q : Capacidad máxima de un camión de reciclaje.
- CN : Costo asociado por utilizar un punto de reciclaje móvil extra.
- Pm : Presupuesto de la municipalidad para costear el uso de puntos de reciclaje móviles extra.

2.3. Variables de Decisión

- $cv_{p,z,d}$: Volumen de residuos recibidos en el punto de reciclaje p de la zona z el día d .
- $rv_{a,d}$: Volumen de residuos extraídos del camión a el día d .
- $ev_{t,z,d}$: Volumen de residuos recibidos en el punto de reciclaje extra t de la zona z el día d .
- $e_{z,d}$: Cantidad de puntos de reciclaje extra utilizados en la zona comunal z el día d .
- rnd : Cantidad de camiones utilizados el día d .

2.4. Restricciones

R1) Volumen máximo que recibe el punto de reciclaje según los requerimientos del área que abarca el punto de reciclaje debe de ser respetado.

$$cv_{p,z,d} \leq VCB \quad \forall p \in P, \forall z \in Z, \forall d \in D$$

R2) Restricción de inventario de los puntos de reciclaje.

$$cv_{p,z,0} = 0 \quad \forall p \in P, \forall z \in Z$$

$$\sum_{z=1}^Z cv_{p,z,d} = \sum_{z=1}^Z cv_{p,z,d-1} + \sum_{z=1}^Z De_{z,d} - \sum_{z=1}^Z ev_{t,z,d} - \sum_{a=1}^A rv_{a,d} \quad \forall d \in D - \{0\}, \forall p \in P, \forall t \in T$$

R3) Se satisface la demanda de requerimiento de reciclaje por zona.

$$De_{z,d} \geq \sum_{p=1}^P cv_{p,z,d} + \sum_{t=1}^T ev_{t,z,d} \quad \forall z \in Z, \forall d \in D$$

R4) Los puntos de reciclaje extra añadidos siguen los requerimientos de que el área que abarca el punto de reciclaje debe ser respetado.

$$ev_{t,z,d} \leq VCE \quad \forall t \in T, \forall z \in Z, \forall d \in D$$

R5) La cantidad de puntos de reciclaje extra se realiza según la cantidad de material necesario extra recibido.

$$\sum_{t=1}^T ev_{t,z,d} \leq VCE \cdot e_{z,d} \quad \forall z \in Z, \forall d \in D$$

R6) La selección del número de camiones se realiza según la cantidad de material necesario para retirar.

$$\sum_{a=1}^A rv_{a,d} \leq Q \cdot rn_d \quad \forall d \in D$$

R7) Los camiones no pueden superar su capacidad máxima de reciclaje.

$$rv_{a,d} \leq Q \quad \forall a \in A, \forall d \in D$$

R8) Los camiones no pueden superar el número de camiones disponibles.

$$rn_d \leq A \quad \forall d \in D$$

R9) Los puntos de reciclaje extra no pueden superar el número de puntos extra disponibles para el despliegue.

$$\sum_{z=1}^Z e_{z,d} \leq T \quad \forall d \in D$$

R10) No se debe sobrepassar el presupuesto asignado por la municipalidad para los puntos de reciclaje extra.

$$\begin{aligned} \sum_{d=1}^D CO \cdot rn_d + \sum_{z=1}^Z \sum_{d=1}^D CN \cdot e_{z,d} &\leq Pm \\ \sum_{d=1}^D CO \cdot rn_d + \sum_{z=1}^Z \sum_{d=1}^D CN \cdot e_{z,d} &\geq 0 \end{aligned}$$

R11) Naturaleza de las variables:

- $cv_{p,z,d} \geq 0, \quad \forall p \in \{1, \dots, P\}, \forall r \in \{1, \dots, Z\}, \forall d \in \{0, \dots, D\}$
- $rv_{a,d} \geq 0, \quad \forall A \in \{1, \dots, A\}, \forall d \in \{0, \dots, D\}$
- $ev_{t,z,d} \geq 0, \quad \forall p \in \{1, \dots, T\}, \forall r \in \{1, \dots, Z\}, \forall d \in \{0, \dots, D\}$
- $e_{z,d} \geq 0, \quad \forall z \in \{1, \dots, Z\}, \forall d \in \{0, \dots, D\}$
- $rn_d \geq 0, \quad \forall d \in \{0, \dots, D\}$

2.5. Función Objetivo

Minimización de costos operativos y de implementación de puntos de reciclaje.

$$\min \sum_{d=1}^D CO \cdot r_{nd} + \sum_{z=1}^Z \sum_{d=1}^D CN \cdot e_{z,d}$$

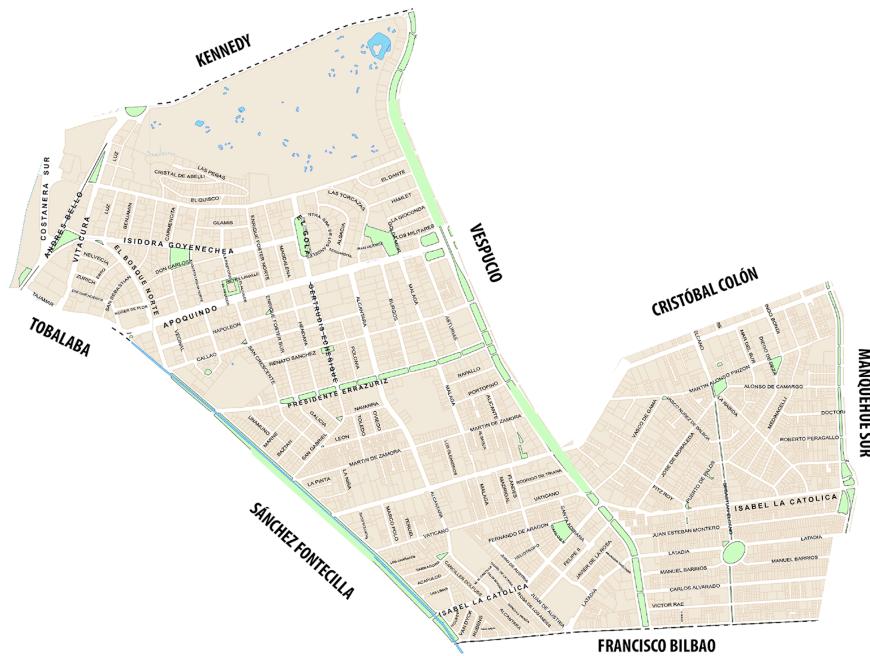
3. Definición de datos

3.1. Conjuntos

Los días de la semana están definidos como un conjunto numérico de 1 al 7, donde el lunes corresponde al número 1, el martes al número 2, y así hasta el domingo que corresponde al día número 7.

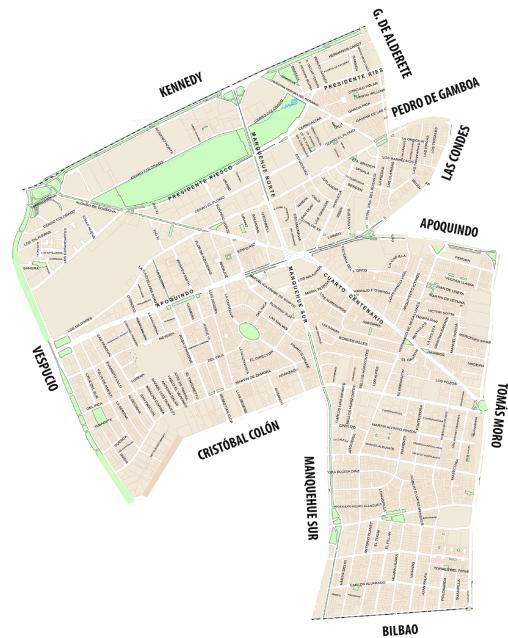
Actualmente, En la comuna de Las Condes se cuenta con 1 punto verde y 10 puntos limpios. Entendiendo el conjunto p como la suma de el punto verde con los puntos limpios, se tienen un total de 11 puntos de reciclaje distribuidos en 6 zonas comunales, que corresponden al conjunto z (Municipalidad de las Condes, 2023).

Imagen 1: Zona 1 ($z = 1$)



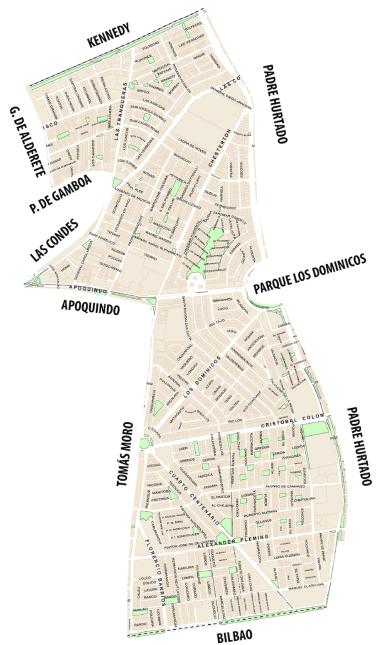
Fuente: Municipalidad de Las Condes, 2023

Imagen 2: Zona 2 ($z = 2$)



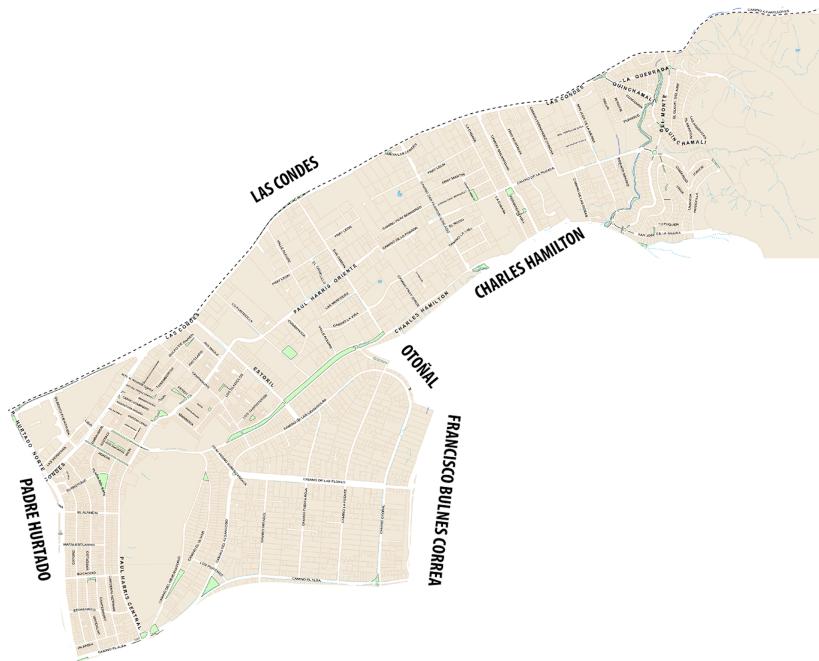
Fuente: Municipalidad de Las Condes, 2023

Imagen 3: Zona 3 ($z = 3$)



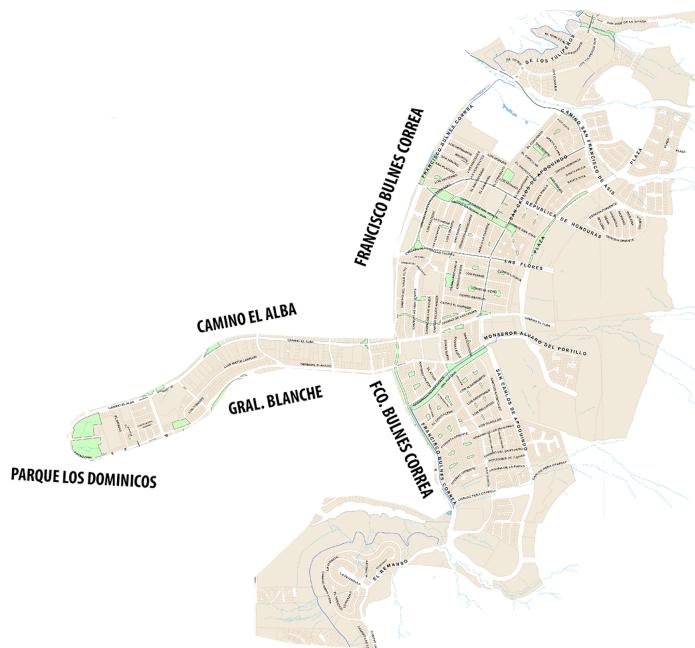
Fuente: Municipalidad de Las Condes, 2023

Imagen 4: Zona 4 ($z = 4$)



Fuente: Municipalidad de Las Condes, 2023

Imagen 5: Zona 5 ($z = 5$)



Fuente: Municipalidad de Las Condes, 2023

Imagen 6: Zona 6 ($z = 6$)



Fuente: Municipalidad de Las Condes, 2023

Además, existen 5 puntos de reciclaje móviles, correspondientes al conjunto t (Municipalidad de las Condes, 2023). Y para el conjunto a , si bien, solo existe información sobre los camiones de puntos móviles, se puede estimar un número entre 5 y 8, puesto que son 6 zonas comunales y existen por lo menos 5 camiones que se usan como puntos móviles.

3.2. Parámetros

- VCB y VCE : Volumen de reciclaje máximo aceptado por un punto de reciclaje y Volumen de reciclaje máximo aceptado por un punto de reciclaje extra Según las especificaciones en el “Plan de Desarrollo Comunal 2022 - 2025”, cada contenedor tiene un volumen máximo entre 3 y 5 m^3 , por lo que, para efectos de estudio, los parámetros VCB y VCE corresponden a un valor promedio de 4 m^3 .
- Q : Capacidad máxima de un camión de reciclaje. La municipalidad trabaja en conjunto con la empresa privada Dimensión S.A. para el proceso de retiro de reciclaje, según los informes de transparencia de la municipalidad de las Condes (2023). Se debe considerar que la capacidad máxima del camión en peso fluctúa entre 12 a 26 toneladas dependiendo de la marca y del modelo de la tolva (Superintendencia de Seguridad Social, 2020). La marca de los camiones recolectores ofrecidos por la empresa es Ford, incluyendo los diferentes modelos Ford Cargo. Para efectos de estudio, dado a que se tiene un camión Tolva de alta capacidad, entre los modelos ofrecidos tanto para industrias como servicios domiciliarios y de reciclaje por parte de la empresa se encuentran los camiones Ampliroll, con los contenedores de 20 toneladas que cumplen con los requisitos de la Superintendencia mencionados previamente (Dimensión S.A., 2023), que representara el parámetro Q .
- $De_{z,d}$: Demanda diaria en volumen de reciclaje de la zona comunal. Para el parámetro que representa la demanda por reciclaje de la comuna ($De_{z,d}$) se tiene que, en la cuenta Pública 2020-2021, durante el año 2020 se recolectó entre todos los puntos y servicios destinados al reciclaje la cantidad de 3.216,46 toneladas de residuos reciclables promedio por zona. Con este

valor, tenemos que existe una demanda promedio diaria de 8,81 toneladas de residuos reciclables, que dicho valor puede ser ajustado según la cantidad de habitantes de cada zona.

- P_m : Presupuesto de la municipalidad para costear el uso de puntos de reciclaje móviles En términos de costos y presupuestos, donde observando los gastos mensuales en los informes de transparencia de la municipalidad de Las Condes (2023) para Dimensión S.A., se realiza un pago mensual de \$1.619.910,792 pesos. Si tenemos en cuenta que el estudio realizado es durante una semana, quedamos con un total de \$404.977,698 pesos a la semana como el máximo presupuesto disponible (P_m).
- CO y CN : Costo de utilización de un camión de retiro de reciclajes y Costo asociado por utilizar un punto de reciclaje móvil extra. En cuanto al costo de utilización de un camión de retiro de reciclajes (CO), se puede estimar según la cantidad de combustible utilizado por los camiones, que para los modelos Ford Cargo ofrecidos por Dimensión S.A, usando un motor Cummins de 6 cilindros, se tiene un gasto de 0,62 litros por kilómetro de diesel (AgroConsultaOnline, 2007), que durante Octubre de 2023, tiene un costo promedio de \$1.050 pesos por litro (GlobalPetrolPrices, 2023). Por lo tanto, para un recorrido promedio de 50 kilómetros por viaje es de \$32.550 pesos por el uso del camión, representando CO . Sobre el uso de los camiones como punto de reciclaje extra (CN), consideraremos una sexta parte del valor usado previamente, dado a que cada camión solo se dirige a una de las seis zonas, a diferencia de los camiones recolectores, obteniendo un valor de \$5.425 pesos, representado por CN . Estos valores solo consideran gastos por el uso del vehículo, donde no se incluyen los sueldos de los trabajadores de turno, debido a que se considera costo hundido para efectos del estudio.

4. Resolución del Problema

Utilizamos la interfaz Python-Gurobi, que nos permite programar las restricciones y variables, y a partir de los datos ya definidos, encontrar una solución óptima. En la búsqueda, se obtuvieron resultados interesantes. En resumidas palabras, se busca la minimización de costos utilizados para el proceso de reciclaje en la comuna de Las Condes. Finalmente, obtuvimos que, en el período de tiempo estudiado, es decir, en una semana, un resultado que presenta un costo total de \$222.425 pesos chilenos a la semana, lo que, si observamos el presupuesto asignado de \$404.977,698 pesos semanales, significa un cambio de un 45,1% cumpliendo con la meta de optimización.

5. Validación del Resultado

Para poder validar los resultados entregados por el programa hay que analizar su factibilidad y su optimalidad, por lo que hay que ver, para el caso de la factibilidad, que el problema cumpla con todas las restricciones planteadas anteriormente, y para caso de la optimalidad hay que demostrar que se encontró la mejor solución dentro del dominio de soluciones factibles.

Se analizará la factibilidad del problema, primero se ve que cumple con la restricción 1

Al implementar la solución óptima obtenida la municipalidad se vería beneficiada al reducir sus costos de operación en un 45,1%.

6. Referencias Bibliográficas

- Alarcón, P. (2022). *Estudio Nacional en torno al Reciclaje: Más de la mitad de los chilenos dice reciclar de forma frecuente, aunque 44 % critica la lejanía de los puntos de acopio*
- Biblioteca del Congreso nacional de Chile (BCN) (2023). *Reporte Comunal — 2023*. Recuperado de:https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas_v.html?anno=2023&idcom=13114
- Ministerio del Medio Ambiente (2023). *Puntos de Reciclaje*. Recuperado de: <https://santiagorecicla.mma.gob.cl/mapa/>
- Municipalidad de Las Condes (2023). *Reciclaje*. Recuperado de:<https://www.lascondes.cl/las-condes-verde/reciclaje/reciclaje.html>
- Noticias UNAB. Recuperado de:<https://noticias.unab.cl/estudio-nacional-en-torno-al-reciclaje-mas-de-la-mitad-de-los-chilenos-dice-reciclar-de-forma-frecuente-aunque-44-critica-la-lejania-de-los-puntos-de-acopio/>
- Valenzuela Levi, N. Zuñiga, D. (2019). *Reciclaje domiciliario en Chile: queremos, pero no nos dejan*. CIPER Chile. Recuperado de:<https://www.ciperchile.cl/2021/04/09/reciclaje-domiciliario-en-chile-queremos-pero-no-nos-dejan/>
- Transparencia Municipal Las Condes (2021). *Cuenta Pública 2020-2021 Las Condes*. Municipalidad de las Condes. Recuperado de:https://archivos.lascondes.cl/descargas/municipalidad/cuenta_publica/CUENTA-2020-2021.pdf
- Superintendencia de Seguridad Social (2020). *INCORPORA LA GUÍA PARA LA APLICACIÓN DEL ESTUDIO DE PUESTO DE TRABAJO (EPT) EN TRABAJADORES RECOLECTORES DE RESIDUOS DOMICILIARIOS CON PATOLOGÍAS MUSCULO-ESQUELÉTICAS DE EXTREMIDAD SUPERIOR, ENTRE OTROS ASPECTOS*. Superintendencia de Seguridad Social. Recuperado de:https://www.suseso.cl/612/articles-609334_archivo_01.pdf
- Dimensión S.A. (2023). *CATÁLOGO FLOTA Y EQUIPOS*. Dimensión S.A. Recuperado de:<https://www.dimensionsa.cl/div-industrias.html#div-industrias1>
- AgroConsultaOnline (2007). *Datos reales de consumo de combustibles en motores*. AgroConsultaOnline.com.ar. Recuperado de:https://aws.agroconsultasonline.com.ar/ticket.html/Datos%20reales%20de%20consumo%20de%20combustibles%20en%20motores.pdf?op=d&ticket_id=7957&evento_id=16340
- GlobalPetrolPrices (2023). *Chile Precios del diesel, 23-oct-2023*. GlobalPetrolPrices.com. Recuperado de:https://es.globalpetrolprices.com/Chile/diesel_prices/1