

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - CHILE
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**Diseño de una cadena de suministro
para el reciclaje en Concepción**

por
Sergio Antonio Aliaga Villagrán

Profesora Guía:
Ph.D. Lorena Pradenas Rojas

Abril de 2018
Concepción, Chile

Tesis presentada a la

**DIRECCIÓN DE POSTGRADO
UNIVERSIDAD DE CONCEPCION**



Para optar al grado de

MAGISTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

RESUMEN

DISEÑO DE UNA CADENA DE SUMINISTRO PARA EL RECICLAJE EN CONCEPCIÓN, CHILE

Sergio Antonio Aliaga Villagrán

Abril de 2018

PROFESORA GUÍA: **Ph.D. Lorena Pradenas R.**

PROGRAMA: **Magister en Ingeniería Industrial**

Actualmente en Chile, se implementan leyes con mayor estándar ambiental. Asimismo, el reciclaje ha tomado mayor relevancia a nivel nacional. Este estudio propone que se puede abarcar este tema a través de un modelo de programación matemática que asigna puntos de reciclaje para un conjunto de usuarios y realiza un ruteo de vehículos hacia centros de mayor capacidad.

Primero, se minimiza la distancia que recorre cada usuario y los costos asociados a instalar centros recolectores menores. Posteriormente, se resuelve el problema de planificación de rutas desde los centros de recolección de mayor capacidad, para retirar lo depositado en los centros menores, con el objetivo de minimizar el recorrido, considerando el problema del vendedor viajero.

Se concluye que es posible caracterizar y diseñar un sistema optimizado de recolección del material reciclable a nivel domiciliario, específicamente en la comuna de Concepción. Se han identificado diferentes escenarios y se ha analizado cómo se podrían abarcar, y se ha probado que la metodología propuesta entrega resultados acordes a la lógica de la situación.

Palabras clave: Reciclaje, Cadena de Suministro, Cadena de Suministro Inversa, Optimización de Rutas.

ABSTRACT

DESIGN OF A SUPPLY CHAIN FOR RECYCLING IN THE CITY OF CONCEPCIÓN, CHILE

Sergio Antonio Aliaga Villagrán

April 2018

THESIS SUPERVISOR: Ph.D. Lorena Pradenas R.

PROGRAM: Master in Industrial Engineering

Currently in Chile, laws with a higher environmental standard are implemented. Also, recycling has become more relevant at the national level. This study proposes that this topic can be covered through a mathematical programming model that assigns recycling points for a group of users, and makes a routing of vehicles to centers of greater capacity.

First, the distance traveled by each user and the costs associated with installing smaller collection centers are minimized. Subsequently, the problem of route planning from the collection centers of greater capacity is solved, to withdraw the deposits at the smaller centers, with the objective of minimizing the route, considering the traveling salesman problem.

It is concluded that it is possible to characterize and design an optimized system for the collection of recyclable material at the household level, specifically in the municipality of Concepción. Different scenarios have been identified and analyzed, it has been proved that the proposed methodology delivers results according to the logic of the situation.

Keywords: Recycling, Supply Chain, Reverse Supply Chain, Route Optimization.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	ii
ABSTRACT.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS	vii
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Hipótesis de investigación.....	1
1.2. Objetivo general.....	1
1.2. Objetivos específicos	1
CAPITULO 2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	2
2.1. Términos y definiciones: Cadena de Suministro (SC), Gestión de una Cadena de Suministro (SCM) y Reciclaje	2
2.2. Contexto local	5
CAPITULO 3. ESTADO DEL ARTE.....	8
3.1. Problemas existentes en cadenas de suministro complejas	8
3.2. Sistemas complejos de reciclaje y sus principales retos.....	10
3.3. Criterios de decisión para reciclar diferentes materiales.....	12
3.4. Modelos de optimización integrada a casos reales.....	13
3.5. Modelamiento de producción y distribución híbrida	15
3.6. Factores que detienen a la gente al momento de reciclar	17
CAPITULO 4. SITUACIÓN ACTUAL Y MODELO PROPUESTO	20
4.1. Reciclaje en Concepción: situación actual.....	20
4.2. Descripción del problema tratado	23
4.3. Modelo de programación matemática.....	25
CAPITULO 5. RESULTADOS.....	30
5.1. Método de solución.....	30
5.2. Parámetros y muestra base del análisis	30
5.3. Instancias, resultados y análisis.....	34
5.3.1. Instancia 1 – Instancia base.....	34
5.3.2. Instancia 2 – Modificación de la instancia base	36
5.3.3. Instancia 3 - Usuarios que empiezan a reciclar en mayor cantidad.....	39
5.3.4. Instancia 4 - Variación en los costos de instalar un centro de reciclaje inicial	42
5.3.5. Instancia 5 – Centros de reciclaje inicial sin ubicaciones limitadas.....	44

CAPITULO 6. DISCUSIÓN	47
CAPITULO 7. CONCLUSIONES	49
CAPITULO 8. REFERENCIAS:.....	50



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema básico de una cadena de suministro.....	4
Figura 2: Cadena de suministro extendida.....	4
Figura 3: Algunos de los centros de recolección para reciclaje ubicados en la comuna de concepción.	21
Figura 4: Usuarios tienen un centro de recolección primaria asignado al cual deben acudir.	23
Figura 5: La basura ya acumulada en los centros iniciales es recolectada para ser trasladada a los centros de recolección de mayor capacidad	24
Figura 6 : Problema completo, incluyendo nodos de usuarios, nodos de centros de recolección inicial y nodos de centros mayores de recepción.	24
Figura 7: Espacio de análisis.	31
Figura 8: Ubicación de los posibles puntos de reciclaje inicial.	33
Figura 9: Ubicación del centro de reciclaje centralizado mayor en el modelo.....	33
Figura 10: Centro de recolección inicial determinado en la resolución de la instancia base.	35
Figura 11: Centros de recolección abiertos en la instancia dos.	37
Figura 12: Ruta optima de recolección hacia el centro mayor en la instancia dos.	38
Figura 13: Centros de recolección abiertos en la instancia tres.	40
Figura 14: Ruta optima de recolección hacia el centro mayor en la instancia tres.....	41
Figura 15: Centros de recolección abiertos en la instancia cuatro.....	43
Figura 16: Ruta optima de recolección hacia el centro mayor en la instancia cuatro.....	43
Figura 17: Centros de recolección abiertos en la instancia cinco.	45
Figura 18: Ruta optima de recolección hacia el centro mayor en la instancia cinco.	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Generación de residuos electrónicos en Chile.....	6
Tabla 2: Estimación de Envases y embalajes puestos en el mercado en Chile.	6
Tabla 3: Problemas en la logística de gestión de la cadena de suministro.	9
Tabla 4: Tendencias de aumento en población mundial, producción de plásticos y cantidades estimadas de basura electrónica generadas.	11
Tabla 5: Conjuntos de datos.....	26
Tabla 6: Subíndices utilizados.	26
Tabla 7: Variables definidas para cada etapa del problema.....	26
Tabla 8: Parámetros de decisión del problema	27
Tabla 9: Datos utilizados para determinar el flujo de material.....	32
Tabla 10: Datos utilizados para determinar la capacidad de los puntos de reciclaje inicial.	32
Tabla 11: Centros de recolección abiertos.....	34
Tabla 12: Cantidad de usuarios asignados a cada centro.....	34
Tabla 13. Cantidad de material recolectado en cada centro.	34
Tabla 14: Estadística de la resolución del software.....	34
Tabla 15: Centros de recolección abiertos.....	36
Tabla 16: Cantidad de usuarios asignados a cada centro.....	36
Tabla 17: Cantidad de material recolectado en cada centro.	37
Tabla 18: Estadística de la resolución del software.....	37
Tabla 19: Resolución del software.....	39
Tabla 20: Centros de recolección abiertos.....	39
Tabla 21: Cantidad de usuarios asignados a cada centro.....	40
Tabla 22: Cantidad de material recolectado en cada centro.	40
Tabla 23: Estadística de la resolución del software.....	40
Tabla 24: Resolución del software.....	41
Tabla 25: Centros de recolección abiertos.....	42
Tabla 26: Cantidad de usuarios asignados a cada centro.....	42
Tabla 27: Cantidad de material recolectado en cada centro.	42

Tabla 28: Estadística de la resolución del software.....	42
Tabla 29: Resolución del software.....	44
Tabla 30: Centros de recolección abiertos.....	44
Tabla 31: Cantidad de usuarios asignados a cada centro.....	44
Tabla 32: Cantidad de material recolectado en cada centro.....	45
Tabla 33: Estadística de la resolución del software.....	45
Tabla 34: Resolución del software.....	46



CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente en Chile, se implementan leyes con mayor estándar ambiental. Asimismo, el reciclaje ha tomado mayor relevancia a nivel nacional. Este estudio propone que se puede abarcar este tema a través de un modelo de programación matemática que asigna puntos de reciclaje para un conjunto de usuarios y realiza un ruteo de vehículos hacia centros de mayor capacidad.

En el capítulo dos se hace una descripción del problema desde lo más general hasta una descripción más específica de lo que se investiga en este documento. En este caso, se definen conceptos como Cadena de Suministro (SC), Gestión de una Cadena de Suministro (SCM) y Reciclaje, los cuales son importantes porque se relacionan directamente con el tema tratado.

Los capítulos siguientes describen el estado del arte en la materia, la situación actual del reciclaje en Concepción, el modelo propuesto y los parámetros utilizados, instancias de prueba y sus resultados, y finalmente conclusiones.

La hipótesis y objetivos son los siguientes:

1.1. Hipótesis de investigación

Es posible caracterizar la cadena de suministro para el reciclaje en la comuna de Concepción.

1.2. Objetivo general

Proponer una cadena de suministro que optimice el proceso de reciclaje de ciertos productos en Concepción.

1.2. Objetivos específicos

1. Revisar literatura especializada sobre el reciclaje y modelos de optimización
2. Conocer la legislación y realidad nacional del reciclaje.
3. Describir la cadena de suministro de reciclaje en la comuna de Concepción.
4. Proponer un modelo de optimización para la cadena de suministro del reciclaje en Concepción.
5. Establecer el software y hardware para implementar el modelo propuesto.
6. Generar un conjunto de instancias de prueba para probar el modelo.
7. Obtener resultados, analizarlos y concluir.

CAPITULO 2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En el presente capítulo se hace una presentación del problema a estudiar y los conceptos relacionados con el reciclaje.

2.1. Términos y definiciones: Cadena de Suministro (SC), Gestión de una Cadena de Suministro (SCM) y Reciclaje

Hoy en día, en un mundo donde la facilidad de comunicaciones y la alta competencia entre las empresas son protagonistas, el rendimiento de las cadenas de suministros es indispensable para agregar valor a las propuestas y competir en el mercado. Los factores que han impulsado esto se relacionan con las tendencias en el abastecimiento global, el énfasis en los tiempos de respuesta y la competencia basada en la calidad, lo que se ha traducido en una mayor incertidumbre ambiental.

Las empresas han recurrido cada vez más a fuentes mundiales para sus suministros y esta globalización de la oferta ha obligado a las empresas a buscar formas más eficaces de coordinar el flujo de materiales, productos, información, suministros y actividades, dentro y fuera de la empresa. Además, las empresas en particular y las cadenas de suministro en general compiten cada vez más sobre la base del tiempo y la calidad. Conseguir un producto libre de defectos al cliente, más rápido y más fiable que la competencia ya no es una ventaja competitiva, sino simplemente un requisito para permanecer en el mercado; los clientes exigen que los productos sean entregados de forma más rápida, exactamente a tiempo y sin daños. Cada uno de estos, requiere una coordinación más estrecha con los proveedores y distribuidores. Esta orientación global y una mayor competencia basada en el desempeño, combinada con la rápida evolución de la tecnología y las condiciones económicas, contribuyen a la incertidumbre del mercado, que requiere de una mayor flexibilidad por parte de las empresas individuales y las cadenas de suministro, que a su vez exige más flexibilidad en las relaciones de la cadena de suministro

La tarea de conseguir productos y servicios para los clientes (cuándo, dónde, cómo, en la cantidad requerida, y de manera rentable) constituye un gran desafío, lo cual impulsa un conjunto de estudios, tecnologías de información y redes de logística para ser competitivos. Por esto, se han definido los términos “Cadena de Suministro”, “Gestión de Cadena de Suministro” y “Modelación numérica de Cadenas de Suministro”.

El *Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP)* define Cadena de Suministro como aquello que se encarga de conectar a muchas compañías, iniciando con materias primas

no procesadas y terminando con el consumidor final utilizando los productos terminados (Council of Supply Chain Management Professionals & Vitasek, 2013).

Por otro lado, Mentzer et al. (2001) definen la cadena de suministro como un conjunto de tres o más entidades (organizaciones o individuales) directamente involucradas en los flujos río arriba y río abajo de productos, servicios, finanzas, y/o información desde una fuente a un usuario final (Mentzer, Keebler, Nix, Smith, & Zacharia, 2001).

Otra definición, es la descrita por Monczka et al. (2001), donde establece que la cadena de suministros, o de abastecimientos, es aquella que abarca todas las actividades asociadas con el flujo y transformación de mercaderías desde las etapas de materias primas (extracción) hasta el usuario final, como también, las asociadas con flujos de información desde el tope al fondo de la cadena de abastecimiento. La cadena incluye sistemas de gestión, operación y ensamble, compras, programación de la producción, orden en procesos, gestión de inventarios, transporte, almacenamiento, y servicios al cliente. Además, las cadenas de abastecimiento son esencialmente una serie de uniones de clientes y oferentes; todo cliente se torna un oferente para la siguiente organización hasta que un último producto llega a un usuario final (Monczka, Trent, & Handfield, 2001).

La Gestión de la Cadena de Suministro (SCM) también es referida como la coordinación sistémica y estratégica de las funciones empresariales tradicionales y sus tácticas, dentro de una empresa en particular y entre las empresas dentro de la cadena de suministro, con el fin de mejorar el rendimiento a largo plazo de las empresas involucradas y cadena de suministro en su conjunto como una gran unidad (Mentzer et al., 2001).

En palabras simples, la gestión de cadenas de abastecimiento es la integración de las actividades en la cadena de suministro, con el objetivo de que la mejora en las relaciones entre los involucrados sea eficiente y por lo tanto competitiva.

Una cadena de suministro, en términos muy generales, se puede sub dividir en tres etapas principales, como se muestra en la Figura 1. En primera instancia (a la izquierda en la imagen) se tiene al grupo de la “red de suministros”, de donde proviene desde la materia prima hasta elementos más trabajados a la empresa. En segundo lugar (al medio en la imagen) se ubica el grupo de la “empresa”, en donde se gestiona toda esta cadena y es la principal interesada de coordinar los esfuerzos para que se logre satisfacer a su cliente y usuario. En tercer lugar (a la

derecha), se encuentra el grupo de la “red de distribución” en donde ocurre el traslado del producto o servicio al cliente y al usuario.

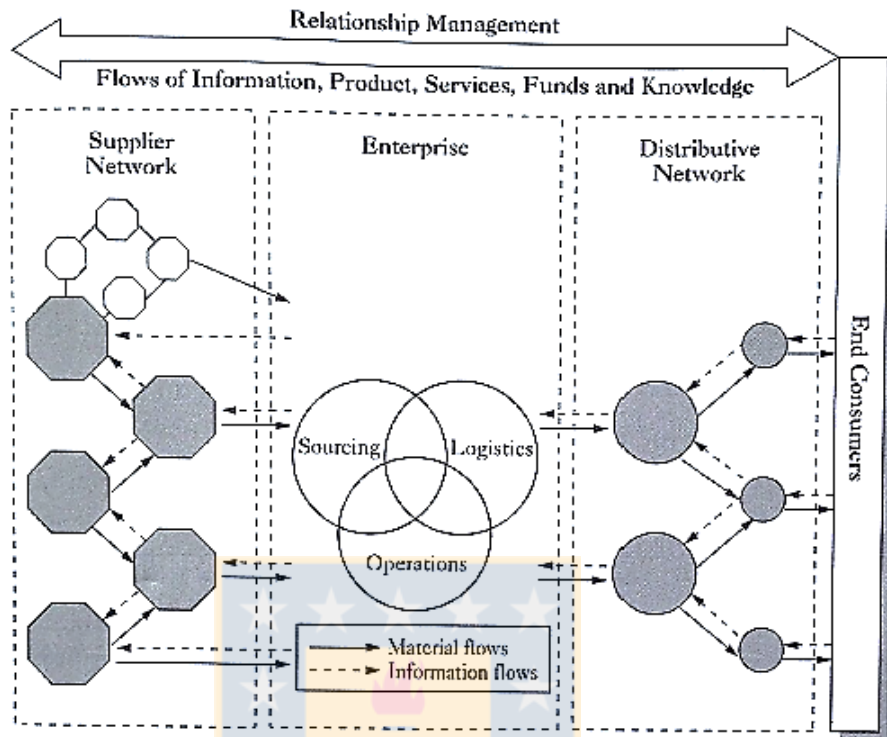


Figura 1: Esquema básico de una cadena de suministro (Monczka et al., 2001).

Otros autores consideran parte de la cadena, además de lo mencionado, lo que pasa luego de que posteriormente el usuario deja de usar el producto, cuando el producto llega a la basura y finalmente, a un relleno sanitario, como se muestra en la Figura 2. Se ha identificado un problema creciente en las sociedades actuales, cada día se consumen y desechan más productos de manera acelerada (Johnsen, Howard, & Miemczyk, 2014).

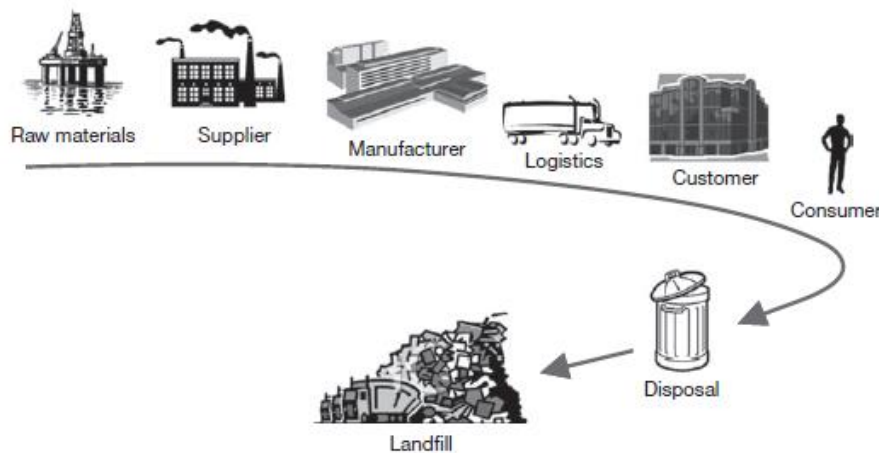


Figura 2: Cadena de suministro extendida (Johnsen et al., 2014).

El reciclaje se basa en la obtención de una materia prima o producto a partir de un desecho: se recupera el material usado. El tratamiento de reciclaje puede realizarse de manera total o parcial, según sea cada caso. Con algunos materiales es posible obtener una materia prima para ser utilizada de diversas formas, mientras que otros permiten generar un nuevo producto en forma directa. Un bien ya utilizado, como por ejemplo una botella de plástico, puede destinarse a la basura o reciclarse y adquirir un nuevo ciclo de vida. De esta forma, el reciclaje contribuye a disminuir el excesivo uso de recursos naturales y, también, a eliminar los desechos de forma eficaz. Al separar los residuos según sus características, es posible aprovechar algunos para el re-uso y eliminar el resto de manera adecuada según sea el contexto.

Frecuentemente lo descartado no ha sido diseñado para el desmontaje o la reutilización por el fabricante, o bien los sistemas necesarios para permitir el reciclaje no se encuentran cercanos o son de difícil gestión. A medida que el comercio global se expande para conectar todas las partes del mundo, los conceptos de cadenas de suministro y gestión de la cadena de suministro son vitales para el crecimiento económico futuro. Sin embargo, los efectos secundarios nocivos de las cadenas de suministro extendidas, como por ejemplo las emisiones de CO₂, el agotamiento de los recursos, la contaminación de las aguas subterráneas e incluso la violación de la legislación laboral, a veces son considerados como una consecuencia casi inevitable de la expansión continua de la actividad humana. Entonces año a año se aumentan los esfuerzos por reciclar y reutilizar los desechos.

Los principales desechos aprovechables para reciclar son los papeles y cartones, los plásticos en sus múltiples variedades y artículos eléctricos/electrónicos, cada uno con sus propias complejidades de manejo y tratamiento. En forma general, en el reciclaje participan plantas de clasificación, que separan los residuos valorizables de los demás, y plantas recicladoras, donde los residuos finalmente se reciclan y/o se almacenan (Gold & Seuring, 2011; Sheriff, Subramanian, Rahman, & Jayaram, 2015; Tansel, 2017).

2.2. Contexto local

Chile no se queda atrás con el problema de la basura y el reciclaje. En el año 2015, por habitante se generaban 6,94 kg en promedio de basura electrónica al año, llegando a un total de aproximadamente 112.984 toneladas, como se muestra en la Tabla 1. Solo el 1,4% se recupera y/o gestiona para su reciclaje de manera formal (Ministerio del Medio Ambiente & Amphos 21 Consulting Chile, 2015). Sumándose a lo anterior, el 62% de la generación de residuos de

grandes y pequeños electrodomésticos se concentra en tres regiones: Región Metropolitana 45%, Región del Biobío 12% y Región de Valparaíso 10% (Ministerio del Medio Ambiente & Amphos 21 Consulting Chile, 2015).

Tabla 1: Generación de residuos electrónicos en Chile (Ministerio del Medio Ambiente & Amphos 21 Consulting Chile, 2015).

Grupo de aparatos	t/año	Kg/hab.
Aire acondicionado	3155	0,19
Cocinas	23709	1,43
Estufas	1953	0,12
Grandes equipos refrigerantes	41316	2,54
Hornos Microondas	8299	0,51
Lavadoras, secadoras y lavavajillas	19360	1,19
Ventiladores	2535	0,15
Grandes electrodomésticos	100327	6,16
Aspiradores, limpia tapices, entre otros	0,596	0,16
Aparatos para coser	3766	0,23
Planchas tostadores y otros pequeños electrodomésticos	2118	0,13
Aparatos de cuidado personal	851	0,05
Balanza	1926	0,12
Relojes	1400	0,08
Total pequeño electrodoméstico	12658	0,78
Total	112984	6,94

Respecto a los plásticos y otros materiales, usados para envases y embalajes (EyE), en Chile para el año 2010 se consumieron 1.223.264 toneladas, significando en 71,5 kg por habitante al año (Ministerio del medio Ambiente & Eco-Ingeniería Ltda, 2012), como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Estimación de Envases y embalajes puestos en el mercado en Chile (Ministerio del medio Ambiente & Eco-Ingeniería Ltda, 2012).

Segmento	Cantidad EyE disponibles (ton)	Participación (%)	Consumo per Cápita (Kg/hab-año)
EyE papel y cartón	474651	39%	27,8
EyE vidrio	292014	24%	17,0
EyE metal	100665	8%	5,9
EyE plásticos	355934	29%	20,8
Total	1223264	100%	71,5

A nivel nacional, la entrada en vigencia de la nueva ley de reciclaje, promulgada el primero de Junio de 2016, hace que la recolección de desechos y su separación tengan una gran oportunidad de poder implementarse y obtener resultados efectivos, con especial énfasis en las grandes urbes, que es donde más desechos se producen. Dicha ley tiene por objetivo incorporar la valorización de los residuos como un elemento importante en la gestión de los residuos sólidos e introducir en la regulación existente un instrumento económico que busca generar mecanismos para aumentar los niveles de reciclaje de los residuos, que actualmente se disponen en rellenos sanitarios o son depositados en vertederos ilegales (Ministerio del Medio Ambiente, 2016). Se establecen algunos instrumentos de gestión ambiental en materia de residuos, destacando entre ellos la Responsabilidad Extendida del Productor (REP), donde el fabricante o importador debe hacerse cargo del producto una vez terminada su vida útil, debiendo cumplir metas de reciclaje establecidas por el Ministerio del Medio Ambiente. La REP, implica que los productores de productos prioritarios mencionados en la ley (plásticos y desechos electrónicos entre otros) deben cumplir con obligaciones tales como: registrarse, organizar y financiar la gestión de residuo, cumplir metas de recolección y valorización a través de alguno de los sistemas de gestión y asegurar que el tratamiento de los residuos recolectados se realice por gestores autorizados (Ministerio del Medio Ambiente, 2016).

En Concepción y sus comunas aledañas, existen escasos medios para realizar el reciclaje de productos y puntos donde se reciban residuos de algún tipo (papeles, cartones y plásticos principalmente) y además, son parte de iniciativas privadas apuntando a generar más cultura que un gran impacto (Ministerio del medio Ambiente & Eco-Ingeniería Ltda, 2012).

En definitiva, existe falta de canales de distribución y manejo de los desechos, y se ha avanzado en este tema gracias a nuevas legislaciones ambientales. En este contexto, este estudio cobra una mayor importancia dado que contribuye, en primera instancia, a organizaciones interesadas en hacer de este proceso una actividad eficiente y a futuras investigaciones a optimizar la cadena de suministro del reciclaje.

CAPITULO 3. ESTADO DEL ARTE

A continuación, se describen y detallan algunas publicaciones disponibles que son de interés para este estudio.

3.1. Problemas existentes en cadenas de suministro complejas: *Supply chain and logistics issues of bio-energy production (Gold & Seuring, 2011)*

Se define cadena de suministro (SC) y la gestión de la cadena de suministro (SCM), según Mentzer et al. (Mentzer et al., 2001), como “un conjunto de 3 o más entidades (organizaciones o personas individuales) directamente relacionadas con el flujo de productos, servicios, finanzas y/o información desde una fuente hasta un consumidor”; mientras que la gestión de una cadena de suministro es definida como “La coordinación sistémica y estratégica de las funciones comerciales tradicionales y las tácticas de estas funciones empresariales en una empresa en particular y entre las empresas de la cadena de suministro, con el fin de mejorar el rendimiento a largo plazo de las empresas individuales y la cadena de suministro como todo”.

Lograr que un sistema sea sustentable económica, medio ambiental y socialmente, requiere de una optimización de la estructura y funcionamiento de la cadena, o red, de abastecimiento. Para esto, se debe considerar distintos factores tanto del lugar (ej. Clima, materia prima disponible, tecnologías al alcance, distancias, etc.) como del proceso que requiere el tipo de material a utilizar. Dichos factores se deben ajustar a cada condición a analizar. Estas consideraciones hacen más complejo el diseño de las redes de suministro y por lo tanto, se vuelve más importante diseñar una buena cadena y conocer en profundidad las etapas de la cadena, identificar actividades, retos y dificultades.

La biomasa pasa a través de varias actividades clave a lo largo de la cadena de suministro, para asegurar un abastecimiento constante de materia prima y que a la vez, sea competitivo en términos de costos. Este es un buen ejemplo de la diversidad de actividades que puede contemplar una cadena de suministro. En la Tabla Tabla 3, se muestran estas distintas categorías donde se presentan los principales retos y problemas para la administración de la cadena de suministro de la producción de bioenergía, según tres categorías principales: recolección de materias y transporte, técnicas de pre-tratamiento y diseño general de la cadena de suministro; considerando las distintas etapas de la cadena de suministro.

Tabla 3: Problemas en la logística de gestión de la cadena de suministro (Gold & Seuring, 2011).

Categoría	Descripción
Recolección/cosecha, almacenamiento, transporte	Recolección/cosecha, almacenamiento y transporte de la biomasa representan los procedimientos básicos en el contexto de la producción de bio-energía
Técnicas de pre-tratamiento	El pre-tratamiento de la biomasa impacta drásticamente en los rasgos económico, ambiental y social de otros procedimientos de bio-energía como recolección/cosecha, almacenamiento y transporte
Diseño general del sistema de suministro	Diseño del sistema refiere al cambio a un diseño más efectivo, eficiente y operativo en la producción de bio-energía.

Opciones para la recolección: en muchos casos, para recolectar materias, estas se deben tratar para ser transportadas, como por ejemplo: secar, empacar, compactar, limpiar, etc.

Características de la materia prima que impacten su obtención, recolección y manejo: Estos factores son relevantes por la dispersión y difícil acceso a los lugares de obtención de los materiales, la disponibilidad de tecnología para recolectar eficientemente las materias en caso de ser necesario, la limitación de recolección debido a factores externos provocando subutilización de maquinarias y recursos. La frecuencia de recolección de material tiene un impacto significativo en esta categoría también.

Razones para almacenar: Una razón importante para almacenar es la necesidad de cubrir la demanda de material en forma constante para no interrumpir la producción de energía, o cualquier proceso en general que requiera de material para funcionar continuamente y no tener una subutilización de los recursos.

Costos y riesgos del almacenamiento: Los costos de almacenamiento principalmente dependen de la ubicación y del tipo de almacenamiento necesario. Además, el tiempo de almacenamiento y el volumen de material son factores clave en los costos. En algunos casos puede existir degradación de material biodegradable o pérdidas de calidad por factores de humedad.

Opciones de almacenamiento: lugar y tipo de almacenamiento. Respecto del tipo de almacenamiento depende principalmente del clima del lugar y la etapa de proceso de la biomasa. Para otros tipos de materiales se considera, por ejemplo, la oxidación del material.

Transporte: Las principales variables que impactan las operaciones de transporte son la distancia y tiempo. Con respecto a esta categoría, se consideran asuntos legales, infraestructura de transporte dependiendo del lugar en donde se opere y los impactos sociales que pueda tener el aumento de flujo vehicular y/o maquinaria en la zona.

Técnicas y requisitos de pre-tratamiento: Las técnicas, propósito y desventajas del pre-tratamiento se deben analizar en detalle para cada material a manejar. Este punto define en gran parte los requisitos para gestionar el material a tratar: Tiempos, espacios, flujos y cantidad de material.

Diseño del sistema de tratamiento del material: arquitectura de la cadena de suministro y herramientas para alcanzar el diseño y que funcione.

Lograr considerar todos los factores mencionados en forma conjunta resulta en una arquitectura eficiente para todo tipo de cadena de suministro. En razón a lo mencionado, la gestión y la logística son claves para un buen resultado.

Si bien el artículo descrito se centra en los problemas que existen en las cadenas de suministros para la generación de bioenergía, el análisis es relevante para cadenas de suministro en general, y específicamente para el análisis del reciclaje, ya que es un buen resumen de los problemas que existen en redes de suministro complejas y que apuntan a tener un funcionamiento competitivo y sea una actividad sustentable en el tiempo.

3.2. Sistemas complejos de reciclaje y sus principales retos: *From electronic consumer products to e-wastes: Global outlook, waste quantities, recycling challenges (Tansel, 2017)*

La creciente cantidad de productos de consumo es un reto mayor para los esfuerzos de reciclaje, especialmente en el caso de los productos electrónicos descartados. Los rápidos avances en ciencia de materiales, procesos de fabricación y electrónica en general, han creado un mercado global donde la difusión de la tecnología es cada vez más rápida. En este contexto han aparecido nuevos retos para gestionar los residuos sólidos domiciliarios.

En términos generales, los desechos electrónicos (electro-residuos, o también llamados *e-waste* en inglés) incluyen artículos como por ejemplo lo son: computadores, pantallas de LCD/CRT, teléfonos, refrigeradores, lavadoras, baterías, entre otros.

A pesar de que el desarrollo y difusión de nuevas tecnologías ocurren a ritmos acelerados, esto no se refleja en el desarrollo de tecnologías apropiadas, ni políticas, que se encarguen de toda esta basura electrónica generada. Esto ha derivado en problemas de manejo de materiales y contaminación. Una muestra de la importancia del tema es el gran aumento de este tipo de desechos a lo largo de las últimas décadas, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Tendencias de aumento en población mundial, producción de plásticos y cantidades estimadas de basura electrónica generadas (Tansel, 2017).

Año	Población mundial (billones)	Producción mundial de plásticos (millón de ton/año)	Computadores obsoletos en regiones en desarrollo (millón de unidades)	Generación de residuos sólidos domésticos (millón de ton/día)	Basura electrónica generada (millón de ton/año)
1960	3,03	15	0	1,5	na
1970	3,69	35	0	2,0	na
1980	4,44	69	0	2,5	na
1990	5,28	104	3	3,0	na
2000	6,10	185	50	3,2	na
2010	6,88	270	120	3,6	33,8
2015	7,21	300	200	4,0	43,8

Las mejoras en diseño también crean retos importantes para el reciclaje. Por ejemplo, las placas de circuitos impresas y sistemas incrustados aumentan la durabilidad y disminuyen el tamaño pero, por otro lado, hacen difícil el trabajo de separación de los diferentes tipos de materiales existentes en un mismo componente o parte del equipo a reciclar. Sumándose a lo anterior, los recubrimientos y sellantes aplicados para mejorar las texturas y durabilidad de las superficies de muchos artefactos necesitan ser removidos con el uso de soluciones ácidas o aplicación de calor. Independiente del material, la recuperación de los desechos electrónicos implica pasos y labores intensivas, separación manual, desmontaje y trituración, seguida por procesos de recuperación específicos de material. Las etapas de procesamiento para la recuperación de metales implican gastos energéticos y químicos para disolución, lixiviación y recuperación (Pradhan & Kumar, 2014; W. H. Zhang, Wu, & Simonnot, 2012). Cada etapa de separación de procesado también produce una segunda corriente que requiere una gestión adicional.

Los principales componentes con ventajas económicas que se pueden rescatar de la basura electrónica son los metales, plásticos y, en menor medida, vidrio.

Los principales retos para administrar la basura son, la gran generación de basura, la variedad de productos y materiales existentes, falta de mecanismos y redes efectivas de recolección, presencia de materiales tóxicos y la dificultad de separación de los distintos materiales. Es por esto que un manejo sustentable de la basura electrónica requiere de un acercamiento holístico del tema, más que mejorar la tasa de reciclaje de algunos materiales. Esto quiere decir que este tipo de reciclaje empieza mucho antes de que el producto deje de ser usado: se debe pensar desde su diseño las facilidades de cómo va a ser reciclado, cómo podría facilitar su categorización para su recolección y finalmente el proceso de reciclaje.

3.3. Criterios de decisión para reciclar diferentes materiales: *What should be recycled: An integrated model for product recycling desirability (Mohamed Sultan, Lou, & Mativenga, 2017)*

Usualmente los productos, fabricados con más de un tipo de material, requieren de procesos de desarme y separación antes de ser reciclados. Por ejemplo un celular puede estar compuesto por más de una docena de materiales y una botella de agua principalmente por plástico tipo PET y una pequeña porción de papel plástico.

Mientras más materiales hay en un producto, más complejo se vuelve descomponerlo. En el caso de productos que son de un solo tipo de material no se requiere de separación y se procede directamente al proceso de reciclaje. Este tipo de productos es más fácil de reciclar y por lo tanto un buen elemento al momento de decidir qué reciclar.

Diversos estudios se han dedicado a establecer métodos de decisión para establecer prioridades a los distintos tipos de productos a reciclar, considerando diferentes factores para evaluar distintos productos, algunos de estos son: el valor del material reciclado en el mercado, complejidad de mezcla de materiales (índice de complejidad) (Gutowski & Dahmus, 2005), disponibilidad tecnológica para reciclar (Straub, 2015) o el índice de seguridad (Eco-Innovation observatory, 2015).

El índice de complejidad se basa en la cantidad de pasos requeridos para separar los distintos materiales de un producto. No considera el tipo de proceso de desmantelamiento, por ejemplo no es lo mismo separar dos materiales desatornillándolos que a través de un proceso químico.

Además, este indicador no considera la escasez de un material, los riesgos que pueda implicar el proceso de separación, ni la disponibilidad de tecnología para realizar la separación.

El índice de disponibilidad tecnológica es un enfoque de evaluación de madurez tecnológica. Examina los conceptos del programa, los requisitos tecnológicos y las capacidades tecnológicas demostradas.

El índice de seguridad se enfoca en la disponibilidad y el acceso a los recursos materiales de los que dependen las economías, así como la capacidad para hacer frente a la volatilidad, el aumento de la escasez y el aumento de los precios.

Los índices mencionados sirven como una buena referencia cuando no se dispone de prioridades claras al momento de decidir reciclar ciertos tipos de elementos.

3.4. Modelos de optimización integrada a casos reales: *Integrated Optimization model and methodology for plastics recycling: Indian empirical evidence (Sheriff et al., 2015)*

En términos generales, los plásticos han llamado la atención debido al volumen de basura que genera. Mucho de estos plásticos no se recolecta ni se recicla y, por lo tanto, se encuentran en desagües, tierras abiertas, ríos, vías férreas y costas, entre otros. El plástico utilizado en las botellas y en otros productos para almacenar, tiene un gran potencial de ser reusado como materia prima para otros productos. El reciclaje de este material reduce el costo de materia prima, limita el uso de recursos naturales y disminuye la cantidad de basura generada y por lo tanto, los costos de disposición en vertederos (Accorsi, Cascini, Cholette, Manzini, & Mora, 2014).

Existen muchos países donde se reciclan botellas de plástico, entre un 10% al 15% de estas (Waste Plastic Recycling, 2014). Los mayores obstáculos para lograr un reciclaje efectivo y que abarque un mayor porcentaje de la basura generada, son la falta de organizaciones interesadas (*stakeholders*) en la gestión de esta basura, manejo ineficiente del incremento de este tipo de basura y manejo no regulado por parte de unidades informales de recolección (Bing, Bloemhof-Ruwaard, Chaabane, & Van Der Vorst, 2015). Considerando estas dificultades, es importante el estudio de la interdinámica de las decisiones de localización de centros de acopio, asignación y enrutamiento del reciclaje de plástico, y así hacer el proceso una operación eficiente.

Actualmente, en países en vías de desarrollo como India, existen más de doscientas marcas de agua embotellada, con un 80% producción local. Es uno de los diez países que más agua

embotellada consume en el mundo (Waste Plastic Recycling, 2014). El estudio realizado en dicho país usó un modelo que optimiza los costos y beneficios en la recolección de plásticos. En la cadena logística reversa de los productos (desde el consumidor a la empresa u organización interesada) la recolección es uno de los puntos más costosos de la cadena. En este contexto, se busca reducir las ineficiencias, maximizar el porcentaje de utilización y asegurar la coordinación entre todas las etapas de recolección de material a reciclar.

Una red de recolección de plásticos común, considera: Usuarios – Punto inicial de recolección (*ICP*) – Centro de devolución centralizado (*CRC*) – y Centro de Procesamiento (*PC*). Donde cada etapa tiene su propia forma de recolectar material: los usuarios compran los productos y al ser desechados los agentes colectores los captan y clasifican; los centros iniciales compran el material a los agentes recolectores, los centros centralizados mayores colectan el material de los centros iniciales a través de camiones, para que finalmente el material sea transportado a los centros de procesamiento.

En el modelo realizado en el estudio analizado, los volúmenes de plástico a reciclar, así como la cantidad y capacidad de los centros de recolección son conocidos. Los pagos a los agentes son en función de la cantidad de material recolectado y calidad según su categoría. Cada centro inicial está asignado a un centro mayor. Un vehículo diferente deja los residuos del centro mayor en centro de procesamiento y retorna.

El modelo matemático integra la asignación equilibrada de centros iniciales de recolección para los sectores habitados, de forma tal que la ruta del camión sea óptima al salir de su centro mayor centralizado y recolecte material por todos sus centros iniciales designados para luego volver (problema del vendedor viajero), y balancear la carga de trabajo de cada *CRC*.

El problema objetivo que propone el estudio analizado es una combinación del problema de agrupamiento capacitado (*CCP*), el problema de asignación de ubicación equilibrada (*LBAP*) y el problema del vendedor viajero (*TSP*), y son resueltos de manera integrada de un único problema.

1.- En el problema de agrupamiento capacitado, se consideran los costos variables relacionados con la distancia entre los usuarios y su centro inicial designado, los costos fijos de establecer cada centro inicial y los incentivos para los agentes recolectores.

2.- En el problema de asignación de ubicación equilibrada, se consideran los costos variables relacionados con el transporte de material desde todas las *ICP* asignadas a cada *CRC* y desde todos los *CRC* al *PC* asignado, los costos fijos de establecer el *CRC* y los costos totales de procesamiento en el *PC*.

3.- En el problema del vendedor viajero, se considera el costo de viaje, asociado directamente a la distancia a recorrer en cada viaje entre los *ICP*.

Así, el costo total es la suma de los tres problemas, donde el objetivo es minimizar el costo. La solución entrega la localización de los centros iniciales y de los centros mayores centralizados de forma optimizada.

El problema fue probado en un contexto de India, considerando una empresa recicladora, ocho centros de recolección inicial *ICP* y dos centros de recolección centralizados *CRC*, con capacidades y costos fijos dados, cincuenta usuarios generadores de residuos plásticos que generan distintas cantidades y ubicados en lugares diferentes, considerando tres niveles de calidad para los productos retornados, con costos de proceso e incentivos conocidos. Además, se hicieron variaciones del sistema original cambiando algunos de los parámetros mencionados para analizar la sensibilidad de los resultados.

Los resultados demostraron que se pueden obtener buenas aproximaciones para el diseño de un sistema optimizado, se logra reducir los costos de operaciones de recolección de residuos para ser procesados en una planta central.

3.5. Modelamiento de producción y distribución híbrida: *Integrated production scheduling and distribution planning in dairy supply chain by hybrid modelling (Bilgen & Çelebi, 2013)*

La planificación y programación de la producción a corto plazo, se puede representar como un problema modelado como un *MILP* (Problema de programación lineal entera mixta). Se presenta una metodología de solución híbrida eficiente basada en una formulación *MILP* y un enfoque de simulación heurística, para obtener horarios de producción óptimos y plan de distribución a través de modelos matemáticos, incorporando al mismo tiempo incertidumbres en la ejecución.

La producción coordina principalmente tres etapas: 1.- la transformación de las materias primas en productos intermedios, 2.- operaciones para generar productos finales, 3.- y la entrega de los productos terminados a centros de distribución. El caso de la producción de yogurt considera

que se generan productos que varían según composición, cantidad de grasa, tamaños de presentación, y que debe cumplir plazos de entrega a centros de distribución.

Este tipo de planteamiento considera varios aspectos importantes: 1.- Una red de suministro con varias plantas de fabricación que envían productos a varios centros de distribución. 2.- Las plantas no tienen los mismos equipos de producción, ni las mismas capacidades. Cada una la capacidad para generar cierto grupo de productos. 3.- Los tiempos de cambio y costos involucrados al pasar de la producción de un producto “A” a uno “B” son considerados en cada máquina de producción, siempre y cuando la maquina pueda producir distintos productos. 4.- Se considera un tiempo para control de calidad de productos dentro del proceso. 5.- El costo de producción de dos productos difiere aunque hayan sido fabricados en una misma línea de producción. 6.- El tiempo regular en que trabajan las maquinas es el mismo de los turnos de trabajo de los operarios. Se permite trabajar fuera de tiempo regular, considerando sobretiempos y pagos de horas extras. Además, se consideran tiempos para limpieza de las maquinas semanalmente. 7.- La velocidad de producción en cada línea puede ser variable. Este es un factor importante para la programación de las máquinas. 8.- En el modelo, se consideran los tiempos de atraso. La demanda no satisfecha a tiempo considera costos por cada día de retraso.

Las variables de decisión más importantes son:

- i. La cantidad producida para cada producto, en cada línea y en cada período.
- ii. La asignación óptima de productos a cada línea de producción, y en cada período de producción.
- iii. La cantidad óptima de cada producto transportado de cada línea a cada centro de distribución en cada período de demanda.
- iv. La secuenciación entre los productos de cada línea de producción en cada período.
- v. El tiempo de inicio y de finalización de cada producto en cada línea.
- vi. El nivel de inventario de cada producto al final del día.
- vii. La demanda insatisfecha de cada producto en el horizonte de planificación.

En el estudio, la función objetivo busca maximizar el beneficio económico de las operaciones, donde los precios de venta dependen de la vida útil del producto, y considerando diversos componentes de costos. Las restricciones de vida útil se diseñan en el modelo *MILP* para mejorar la frescura del producto. Los componentes de fijación de precios que dependen de vida útil se determinan en base a los datos reales. Además, se incluyen en la formulación del modelo *MILP*

el tiempo de preparación dependiente de la secuencia, las fechas de vencimiento de la demanda, la velocidad de la máquina no es igual para todos los productos, la planificación de horas extraordinarias, la demanda no satisfecha y la entrega a los centros de distribución.

El enfoque híbrido combina las ventajas del modelo *MILP* y el modelo de simulación. Como resultado, el modelo *MILP* proporciona un programa de producción optimizando los recursos. Para aplicar el programa de programación en la práctica, los factores estocásticos que se ignoran en el modelo *MILP* se añaden al problema mediante el modelo de simulación. Por lo tanto, un enfoque de este tipo puede ser más realista incluso en comparación a enfoques tradicionales de planificación, donde se tiende a buscar soluciones siempre exactas.

3.6. Factores que detienen a la gente al momento de reciclar: *What keeps Chinese from recycling: Accessibility of recycling facilities and behavior* (S. Zhang, Zhang, Yu, & Ren, 2016)

La falta de instalaciones efectivas y convenientes de reciclaje constituye uno de los principales obstáculos para que las personas reciclen. Además, existe una gran diferencia entre la intención que éstas tengan de llevar a cabo el reciclaje, y hacerlo.

La actitud o comportamiento que tienen las personas respecto al reciclaje se ve influenciada por las costumbres que éstas tengan, sus intenciones o ganas de reciclar, y se ve limitada por factores ambientales, como la posibilidad de implementarla física o institucionalmente. Por lo mismo es que si se facilita el acceso al reciclaje, se traduciría en una actitud a favor del mismo, ya que el cómo las personas procesan sus desechos domiciliarios depende de qué tan fácil o difícil les parece reciclar.

En cuanto a factores ambientales que influyen en la decisión de reciclar, un fácil acceso garantizaría un aumento de la población que adopta ésta medida cuando de eliminar sus desechos domésticos se trata. Para medir la facilidad de acceso, se analizan tres aspectos principales: distancia, accesibilidad y autoeficacia.

La distancia, se refiere a la proximidad desde una instalación de reciclaje a la casa del individuo. Evaluar esta medida es el método más directo para evaluar la accesibilidad a la instalación de reciclaje. Por lo general, a menor distancia, mayor es la accesibilidad a reciclar y más fácil es que el individuo lo haga. Por lo tanto, la posibilidad de reciclar aumenta a la vez que el tiempo para alcanzar el punto de reciclaje disminuye.

Este aspecto es el que más influencia tiene cuando de cambiar hábitos en la población se trata. El problema que este aspecto tiene es la percepción subjetiva de distancia que cada individuo tiene, y que puede significar en una facilidad o dificultad a la hora de decidir si reciclar o no.

La accesibilidad hace referencia a la facilidad de realizar la acción de reciclar, o de depositar materias reciclables a un punto destinado para aquello. Por ejemplo, si un usuario llega a un punto de reciclaje y la separación en diferentes categorías es muy compleja, el individuo probablemente pierda su motivación inicial para reciclar.

La autoeficacia se refiere creencia del propio individuo sobre su capacidad de adoptar completamente un comportamiento o actitud. Este aspecto es importante, ya que las elecciones racionales que se hacen comienzan al adoptar una actitud concordante con las mismas, según el control que crean poder ejercer sobre la elección o las dificultades que ésta traerá.

Respecto al reciclaje, la intención de reciclar se ve mayormente influenciada por las dificultades que podrían existir al querer hacerlo. Cuando hay tachos de reciclaje presentes, incluso las personas que no tienen la costumbre de reciclar, lo hacen.

En conclusión, la costumbre o “comportamiento previo” no se ve afectado por pocas veces de la mejora al acceso de instalaciones de reciclaje. Para generar una acción en el tiempo, se requieren políticas educativas que se hagan en el tiempo.

La intención a reciclar es determinada por actitudes “favorecedoras” de reciclaje, influencia de normas sociales sobre el reciclaje y la percepción de control que se tenga sobre la situación.

El acceso a puntos de reciclaje influencia significativamente sobre el individuo en pos del reciclaje, o su rechazo hacia el mismo. Además, no existe una correlación lineal entre tendencia al reciclaje y facilidad de acceso al mismo. La estrategia de promover el reciclaje mediante la mejora en el acceso a punto de reciclaje sólo si éste “encaja” en los hábitos originales de los residentes en ámbitos como recolección, orden y desecho de los residuos.

Si el ambiente facilita o promueve el hecho de reciclar, la decisión del individuo se puede ver influenciada en pro de ésta acción. Sin embargo, difícilmente influenciará en las actitudes generales que tiene respecto al medio ambiente, reciclaje o en las normas sociales percibidas. Es decir, existe una diferencia de tomar la acción en el momento, pero este cambio no se traduce en un hecho permanente en la conducta del individuo. Si se desea realizar un cambio permanente

en la mentalidad de la población, es necesaria la persistencia de estrategias de intervención que promuevan un cambio de actitud permanente en las personas.



CAPITULO 4. SITUACIÓN ACTUAL Y MODELO PROPUESTO

Actualmente, en la ciudad de Concepción, se dispone de escasos lugares en donde se puede reciclar material domiciliario en relación a la cantidad de población y extensión de viviendas. En el presente capítulo se describe la situación actual del reciclaje en Concepción, detallando las iniciativas que se han ejecutado y los actuales puntos de reciclaje existentes, y a continuación se detalla el modelo que se ha formulado para el problema propuesto.

4.1. Reciclaje en Concepción: situación actual

Se realizó una investigación para contextualizar la existencia, ubicación y funcionamiento de puntos de reciclaje de distintos residuos aprovechables. Esta búsqueda se basó en información que menciona reciclaje de basura en la zona y en entrevistas a funcionarios de la Dirección de Medio Ambiente de la Municipalidad de Concepción. Los resultados de esta búsqueda son los siguientes:

Campaña de 100 pequeños puntos de recolección de artículos eléctricos y electrónicos que forman parte de la categoría de e-waste. Se identificó qué tipos de basura reciben estos 100 puntos de reciclaje y dónde se ubican. La mayoría de estos puntos de recolección están ubicados en edificios de oficinas gubernamentales y municipales, escuelas, liceos y centros de atención médica. El modo actual de funcionamiento de los estos puntos de reciclaje es que su contenido se retira cada 4 meses con vehículos de carga pequeños sin un orden concreto, ni cantidad de puntos a visitar establecidos. El recorrido se decide en función de la cantidad recolectada en cada punto hasta que la capacidad máxima del vehículo es alcanzada. Una vez recopilada una cierta cantidad de material, este es enviado a través de la empresa “Chile Express” a un centro de reciclaje en Santiago de Chile.

Feria anual de recolección de basura electrónica de todo tamaño. Desde el año 2011 hasta el año 2014 se realizó la feria de reciclaje electrónico, la cual consistía en un llamado a la comunidad a acercarse a un punto de recopilación de basura electrónica en el Parque Ecuador (Concepción, Chile). En este caso, se recibían equipos electrónicos grandes y pequeños, desde cables y luces hasta refrigeradores y lavadoras, para que fueran destinadas a centros de recuperación de materiales en Santiago (Ilustre Municipalidad de Concepción, 2017) transportados en contenedores por camiones.

Dicha feria dejó de ser realizada ya que, debido al éxito de participación ciudadana, se gestionó implementar un centro de recolección permanente en la ciudad, el cual se describe a continuación.

Centro de recopilación de residuos electrónicos y sustancias peligrosas generados en el hogar. A partir de la iniciativa mencionada en el punto anterior, se realizaron gestiones para implementar un punto de recolección de residuos en forma permanente. Tales gestiones se materializaron en 2015 con la apertura del centro de acopio de residuos electrónicos y sustancias peligrosas ubicado en el sector de Laguna Redonda en Concepción. Este centro de acopio recibe: Impresoras, monitores, teclados, cables, cargadores, video-reproductores, televisores, equipos de audio, celulares, aceites lubricantes, entre otros artículos de menor tamaño y funciona durante todo el año (Ilustre Municipalidad de Concepción, 2017). En la Figura 3, se encuentra en el punto 5.

Otros centros de recolección de material reciclable. En la comuna de Concepción se encuentran diversos puntos de reciclaje, los cuales en su mayoría reciben plásticos de distintos tipos, papeles, cartones y vidrio. En la Figura 3 se observa dónde se encuentran 13 puntos de reciclaje, marcados en el mapa de la ciudad de Concepción y se describen a continuación.

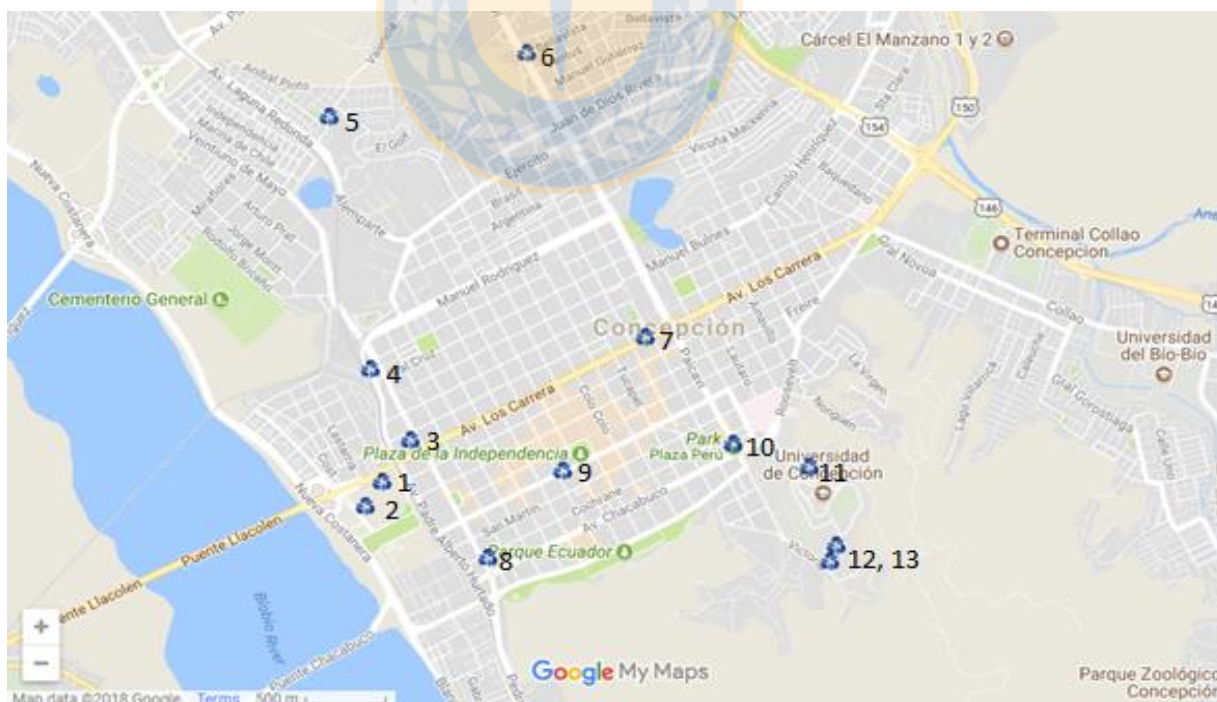
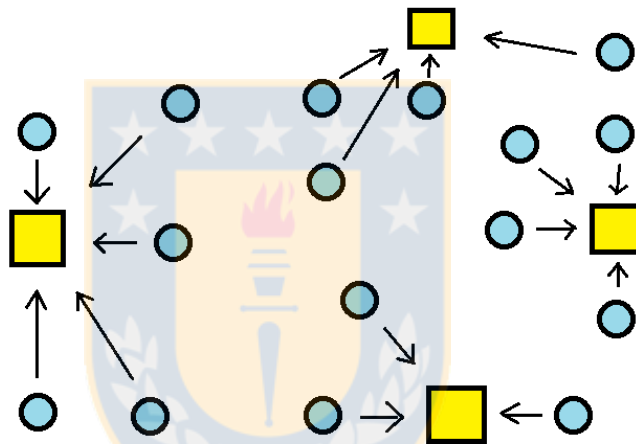


Figura 3: Algunos de los centros de recolección para reciclaje ubicados en la comuna de concepción. (Fundación el Arbol, 2017)

1. Punto Limpio Tottus Biobío: Se encuentra en el “Mall Mirador Biobío”. Recolectan papeles, cartones, botellas PET, latas de aluminio y envases tipo Tetrapak.
2. Punto Limpio Homecenter Sodimac Mirador Biobío: Ubicado en el centro comercial “Mall Plaza Mirador Bio Bio”. En este punto se recolectan papeles, cartones, latas, botellas PET, distintos tipos de plásticos y envases tipo Tetrapak.
3. Punto Limpio Universidad Santo Tomás: Ubicado en el estacionamiento de la sede Concepción de dicha universidad. En este centro de recolección se reúnen papeles, cartones, latas, envases tipo Tetrapak y botellas PET.
4. Centro de Acopio Sindicato de Recicladores Biobío: Ubicado en la calle Prat #1245. En este punto se recolectan papeles, cartones, latas, chatarra de metal, envases tipo Tetrapak, nylon y botellas PET.
5. Centro de Acopio de Residuos Peligrosos: Ubicado en la Ex Escuela Luis David Ocampo en el sector Laguna Redonda. Se recolectan en este centro artículos electrónicos, lubricantes, baterías y elementos eléctricos/electrónicos en general.
6. Punto Limpio Bellavista: Ubicado en la calle Bellavista en Concepción. Se recolectan botellas PET, pilas, papel, envases tipo Tetrapak, latas y cartones.
7. Punto Limpio Homecenter Sodimac Carrera: Ubicado en estacionamientos del local. En este punto se recolectan botellas PET, latas, envases tipo Tetrapak, papel y distintos tipos de plásticos.
8. Punto Limpio Instituto Virginio Gómez: Ubicado en la calle Arturo Prat, en este punto se recolectan papeles, cartones, latas, botellas PET y envases tipo Tetrapak y pilas.
9. Punto Limpio Municipalidad de Concepción: Se encuentra al interior de la Ilustre Municipalidad de Concepción. Se recolectan pilas en desuso.
10. Punto Limpio Plaza Perú: Contenedor de vidrios ubicado en la Plaza Perú.
11. Punto Limpio Departamento de Geofísica UdeC: Ubicado frente a Laguna Los Patos, dentro de edificio de Geofísica. En este punto se recolectan botellas PET, papeles, envases tipo TetraPak, latas, toners y pilas.
12. Punto Limpio Facultad de Ciencias Sociales Udec: Ubicado al costado de la Facultad Ciencias Sociales. En este punto se recolectan papeles, envases tipo Tetrapak y botelas PET.
13. Punto Limpio Facultad de Ciencias Veterinarias UdeC: Ubicado al costado de la Facultad Ciencias Veterinarias. En este punto se recolectan papeles, envases tipo Tetrapak y botelas PET.

4.2. Descripción del problema tratado

El problema tratado en esta tesis plantea que la recolección de basura para reciclaje comienza desde el usuario, hacia los centros de recolección iniciales, y finalmente es trasladada a centros de recolección mayores y centralizados. El usuario colecta su propia basura reciclable, cuando tiene un producto cuya vida útil ha llegado a su fin, para depositarla en un punto de recolección inicial designado, esto se representa gráficamente en la Figura 4. El punto de recolección inicial recibe basura de distintos usuarios y posteriormente la basura recolectada es retirada por un vehículo recolector para trasladar a un centro de recolección centralizado de mayor capacidad, como se representa en el esquema de la Figura 5. El problema completo se presenta gráficamente en la Figura 6.



*Figura 4: Usuarios tienen un centro de recolección primaria asignado al cual deben acudir.
Fuente: Elaboración propia.*

Como se muestra en la Figura 5, se dispone de nodos iniciales (círculos azules) que representan a personas, o usuarios, generadoras de material reciclable. Cada nodo está separado el uno del otro con una distancia diferente a cero, por lo tanto no existen usuarios ubicados en el mismo lugar. Todos los usuarios se encuentran en un espacio limitado, en el cual existen diferentes nodos secundarios (cuadrados amarillos) donde está la posibilidad de instalar un centro de recolección inicial de basura para reciclaje.

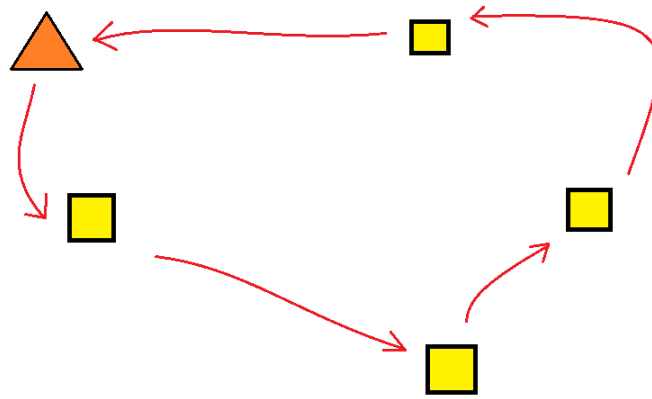


Figura 5: La basura ya acumulada en los centros iniciales (cuadrados amarillos) es recolectada para ser trasladada a los centros de recolección de mayor capacidad (triángulo naranja). Fuente: Elaboración propia.

Una vez que la basura ha sido depositada por los usuarios, un vehículo de recolección retira el contenido desde los nodos cuadrados de reciclaje y lo traslada a un centro de recolección mayor (nodo triangular naranja), donde el material obtenido puede ser destinado a algún tipo de tratamiento según corresponda por el tipo de desecho.

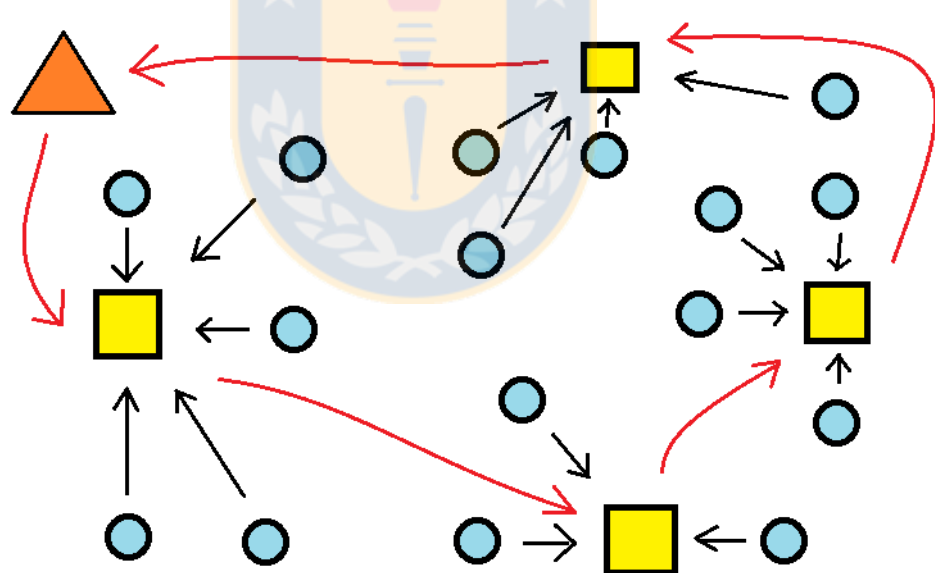


Figura 6 : Problema completo, incluyendo nodos de usuarios, nodos de centros de recolección inicial y nodos de centros mayores de recepción. Fuente: Elaboración propia.

Los puntos de recolección tienen capacidad limitada para almacenar material reciclable, costo de instalación asociado y están ubicados en diferentes localizaciones del área de análisis, con una distancia mayor que cero entre cada uno de estos.

4.3. Modelo de programación matemática

El problema propuesto contempla dos etapas. Primero, se resuelve el problema de asignación de puntos de reciclaje inicial a cada usuario, aquí se busca minimizar tanto la distancia que recorre cada usuario como los costos asociados a instalar puntos de recolección inicial. En segundo lugar, se resuelve el problema de planificación de rutas desde los centros de recolección mayores para retirar lo depositado en los centros iniciales de menor tamaño, con el objetivo de minimizar el recorrido, tal como se hace en el problema del vendedor viajero.

En esta tesis se propone analizar una muestra que representa el centro de la ciudad de Concepción. Se dispone de 182 usuarios, o nodos de generación de material reciclable, 11 nodos correspondientes a posibles ubicaciones de los centros de reciclaje inicial y un centro mayor de recolección, que recolectará el material acumulado en los centros iniciales.

Primera etapa del problema: asignación de usuarios a los centros de reciclaje inicial. El objetivo de esta primera etapa es minimizar la distancia entre cada usuario a su punto de reciclaje asignado y minimizar los costos relacionados a disponer de un punto de reciclaje instalado, cumpliendo la condición que la capacidad de puntos de recolección no sea superada y que todos los usuarios sean asignados a solo un punto de reciclaje.

Se consideran los siguientes supuestos en esta etapa:

- Cada usuario se dirige al centro de recolección inicial para depositar la basura reciclable.
- Cada usuario se dirige a su centro de recolección asignado y no a otro.
- Los costos de transporte son directamente proporcionales a la distancia recorrida (Sheriff et al., 2015).
- Cada usuario tiene una producción mensual de basura constante (determinada según datos existentes en esta materia).

En base a la información recopilada, de modelos matemáticos de optimización, para este tipo de problema, se describen a continuación los componentes del modelo de programación matemática desarrollado.

Segunda etapa del problema: Problema del vendedor viajero. El objetivo de la segunda etapa es minimizar la distancia a recorrer por el vehículo recolector, que sale desde un centro de recolección centralizado mayor a recoger lo recopilado por los centros de recolección inicial.

Los parámetros usados en el modelo planteado se definen a continuación

Tabla 5: Conjuntos de datos. Fuente: Elaboración propia.

Conjunto	Descripción
I	Conjunto de usuarios.
J	Conjunto de centros de recolección inicial.
K	Conjunto de centros de recolección iniciales abiertos y centros de reciclaje mayor centralizado.

Los subíndices usados en los conjuntos descritos son los que se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Subíndices utilizados. Fuente: Elaboración propia.

Subíndice	Descripción
i	Usuario i dentro del conjunto I .
j	Punto de recolección inicial j dentro del conjunto J .
k	Centro de recolección k dentro del conjunto K .
k'	Punto de recolección k' diferente de k dentro del conjunto K .

Tabla 7: Variables definidas para cada etapa del problema. Fuente: Elaboración propia.

Variable	Descripción
Y_{ij}	Variable binaria. Indica si el usuario i es asignado al centro de recolección inicial j .
N_j	Variable binaria. Indica si el centro de recolección inicial j se encuentra abierto, en caso contrario su valor es igual a 0.
n_j	Variable entera y positiva. Indica la cantidad de usuarios asignados a un centro de recolección inicial j .
V_j	Valor entero y positivo. Indica la cantidad de unidades de basura depositadas en un centro de recolección inicial j .
$Z_{kk'}$	Variable binaria. Indica si se efectúa el recorrido desde un nodo j hacia el nodo j' .
u_k	Variable auxiliar intermediaria para el problema del vendedor viajero relacionada a un centro de recolección k .

Tabla 8: Parámetros de decisión del problema. Fuente: Elaboración propia.

Parámetros	Descripción
q_i	Unidades de material reciclable retornadas por el usuario i .
Q_j	Capacidad de un centro de recolección inicial j .
FC_j	Costo de tener un centro de recolección inicial j instalado.
D_{ij}	Distancias entre los usuarios i respecto de un centro inicial j .
$D_{kk'}$	Distancias entre los centros de recolección j respecto a otro centro de recolección j' . Se incluye en este parámetro tanto centros de recolección inicial como centros de recolección mayor centralizados.
t	Cantidad de posibles locaciones para los centros de reciclaje inicial.
t'	Cantidad de centros de reciclaje inicial abiertos, más la cantidad de centros de reciclaje mayor centralizado.

Formulación del modelo

El problema propuesto es una combinación de dos sub problemas: en primer lugar se resuelve el problema de asignación de puntos de reciclaje iniciales a los diferentes usuarios según su ubicación respecto de los centros de reciclaje y el costo de estos; en segundo lugar, se propone un problema de vendedor viajero para que desde un centro de recolección mayor se recolecte todo el material reciclable desde los distintos centros de recolección inicial.

Los resultados obtenidos en el primer sub problema se utilizan como input del segundo sub problema, ya que es necesario definir qué puntos de reciclaje inicial serán los que están activos y así definir los nodos que debe recorrer el vendedor viajero.

Modelo 1:

La función objetivo definida y sus restricciones, para la primera parte del problema, son las siguientes:

$$\text{Min } TC1 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} D_{ij} Y_{ij} + \sum_{j=1}^t FC_j N_j \quad (1)$$

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} = 1 \quad , \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} Y_{ij} = n_j \quad , \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} q_i Y_{ij} \leq Q_j N_j \quad , \forall j \in J \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} q_i Y_{ij} = V_j \quad , \forall j \in J \quad (5)$$

En la función objetivo (1) minimiza la sumatoria de costos del problema. La primera componente de esta expresión representa la sumatoria de distancias recorridas por cada usuario para llegar a su centro de recolección asignado, mientras que la segunda componente representa la sumatoria de costos de instalar los centros de recolección a instalar.

La restricción (2) define que cada usuario estará conectado a un único punto de recolección inicial, es decir, cada generador de basura con potencial de reciclaje tendrá exactamente un punto de recolección inicial asignado.

La restricción (3) relaciona la cantidad de usuarios asignados a cada punto de recolección en un vector n de j componentes, el cual sería un dato de salida del programa. Por ejemplo, si tenemos $n_3 = 5$ quiere decir que el centro de recolección inicial “3” está asignado a 5 usuarios diferentes.

La restricción (4) limita la capacidad de recibir unidades de basura con potencial de reciclaje de cada punto de recolección, por lo tanto se restringe que un punto de recolección inicial pueda aceptar un número de unidades mayor a su capacidad de almacenaje.

La restricción (5) relaciona la cantidad de unidades recolectadas en cada punto de recolección en un vector V de j componentes. Utilizado para recopilar resultados y permitir análisis.

Modelo 2:

La función objetivo definida y sus restricciones, para la segunda parte del problema, son las siguientes:

$$\text{Min } TC2 = \sum_{k=1}^{t'} \sum_{k'=1}^{t'} D_{kk'} Z_{kk'} \quad (6)$$

$$\sum_{k=2}^{t'} Z_{1k} = 1 \quad , \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{k=2}^{t'} Z_{k1} = 1 \quad , \forall k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{k=2}^{t'} Z_{kk'} = 1 \quad , \forall k, k' \in K \quad (9)$$

$$\sum_{k=2}^{t'} Z_{k'k} = 1 \quad , \forall k, k' \in K \quad (10)$$

$$u_k[k] - u_k[k'] + (t' - 1) Z_{kk'} \leq t' - 2 \quad , \forall k, k' \in K \quad (11)$$

$$\sum_k Z_{kk} = 0 \quad , \forall k \in K \quad (12)$$

En la función objetivo (6) minimiza la sumatoria de distancias recorridas para lograr recorrer todos los nodos de centros de recolección iniciales en el problema del vendedor viajero, iniciando y terminando en el centro mayor de reciclaje.

La restricción (7) limita a que sólo se haga un viaje desde el primer nodo. La restricción (8) limita a que solo se haga un solo viaje hacia el primer nodo. La restricción (9) limita a que el vehículo de recolección visite cada nodo solo una vez. La restricción (10) limita a que el vehículo de recolección abandona cada nodo solo una vez. La restricción (11) evita que el vehículo se devuelva por un mismo arco de trayectoria a un nodo, evitando así ciclos. La restricción (12) evita que se haga un viaje desde un nodo a sí mismo.

CAPITULO 5. RESULTADOS

Con el objetivo de probar el método propuesto, se han definido instancias de prueba para analizar el comportamiento de los modelos, restricciones y, en definitiva, la solución al problema.

En este capítulo, se describe tiene los resultados para cada instancia de análisis y su análisis.

5.1. Método de solución

A partir de la recopilación de información y de la formulación del problema, se optó por resolver el problema como un problema de programación lineal entera mixto (*MILP: Mixed Integer Lineal Programing*).

Para este tipo de programación se ha utilizado el *software IBM ILOG CPLEX Studio IDE*, utilizando la característica *CPLEX Studio OPL* en su versión 12.7.1.0, el cual está especializado para este tipo de problemas.

La implementación del modelo fue hecha en un computador marca *HP*, modelo *PROBOOK P440 G5*, procesador *INTEL Core i7* de 8^{va} generación, 8 *GB* de memoria *RAM* y operando con *Windows 10 Pro*.

En la resolución de las diferentes instancias, se ha buscado la solución óptima entre las soluciones factibles.

5.2. Parámetros y muestra base del análisis

Como base de análisis, se consideró un conjunto de muestra que contempla un grupo de usuarios, donde un usuario es igual a una cuadra, o “manzana”. Los usuarios son productores de material reciclable y están ubicados en un espacio limitado. Los posibles puntos que permiten la instalación de puntos de recolección inicial se definieron en diferentes lugares de la zona de análisis.

Se trata de generar un caso cercano a la realidad y se acotó el espacio de análisis al centro de la comuna de Concepción, a la zona que se encuentra dentro del perímetro conformado por las calles Manuel Rodríguez, Paicaví, Víctor Lamas y Arturo Prat, como se muestra en la Figura 7 a continuación.



Figura 7: Espacio de análisis. Fuente: Elaboración propia.

Se definen los costos y capacidades de los centros de reciclaje inicial a partir del caso real de los contenedores de reciclaje de la Universidad de Concepción (MATPEL, 2017). Además, se consideran que las características de los posibles centros de recolección inicial son definidas iguales para todos los casos en capacidad y costo, ubicadas en distintos puntos del espacio de prueba de la instancia (Yang, Wang, & Li, 2009), tal como se muestra en la Figura 8.

La cantidad de material reciclable se ha estimado de acuerdo a la estadística nacional (Ministerio del Medio Ambiente & Amphos 21 Consulting Chile, 2015; Ministerio del medio Ambiente & Eco-Ingeniería Ltda, 2012) y considerando el número de habitantes en el área analizada. Para esto, se utilizó la densidad de la población en la zona urbana de Concepción (Libertun & Guerrero, 2017).

Los datos utilizados para la instancia base se muestran a continuación en la Tabla 9 y Tabla 10.

Tabla 9: Datos utilizados para determinar el flujo de material.

Fuente: Elaboración propia.

Ítem	Valor	Unidad de medida
Promedio generación de basura con potencial de ser reciclable (1)	72,28	kg/año/persona
Porcentaje de basura que es reciclada actualmente (1)	1,4	%
Promedio de reciclaje por persona al año	1,01	kg/año/persona
Promedio de reciclaje por persona al mes	0,084	kg/mes/persona
Densidad de Población URBANA en Concepción (2)	4871	personas/km2
Cantidad aproximada de personas por cuadra en la zona de análisis	79	Personas
Material reciclaje por cuadra (usuario) en la zona de muestra	7	kg/mes

(1): (Ministerio del Medio Ambiente & Amphos 21 Consulting Chile, 2015)

(2): (Libertun & Guerrero, 2017)

Tabla 10: Datos utilizados para determinar la capacidad de los puntos de reciclaje inicial.

Fuente: Elaboración propia.

Ítem	Valor	Unidad de medida
Costo punto reciclaje inicial (1)	5.000.000	Pesos Chilenos
Volumen Contenedor de 20 pies	33,2	m3
Porcentaje del volumen que se utiliza (1)	50	%
Densidad Basura Domiciliaria Reciclable (2)	111,67	kg/m3
Capacidad de un punto de reciclaje inicial (container)	1854	kg

(1): (MATPEL, 2017)

(2): (Ambientum.com - Enciclopedia Medioambiental, n.d.)

Sobre la ubicación de los distintos puntos de reciclaje inicial, se identificaron posibles localizaciones para instalar los centros, con mayor disponibilidad de espacios para el tránsito libre de las personas y vehículos, sin generar obstrucciones en la circulación de las calles. Así, los lugares considerados para los posibles puntos de recolección inicial son los mostrados a continuación, en la Figura 8.

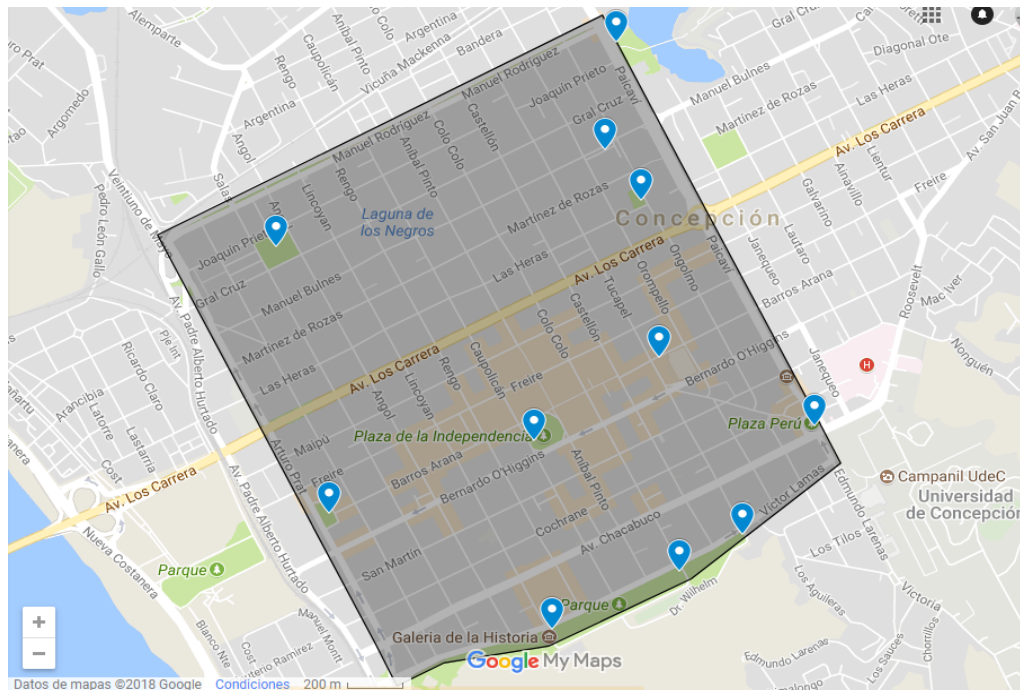


Figura 8: Ubicación de los posibles puntos de reciclaje inicial.
Fuente: Elaboración propia.

Respecto al centro de reciclaje mayor centralizado, se determinó el galpón de acopio existente, mencionado en el punto 4.1 del presente capítulo en donde se hace referencia específicamente al Centro de Acopio de Residuos Peligrosos: Ubicado en la Ex Escuela Luis David Ocampo en el sector Laguna Redonda, el cual se muestra en la Figura 9.

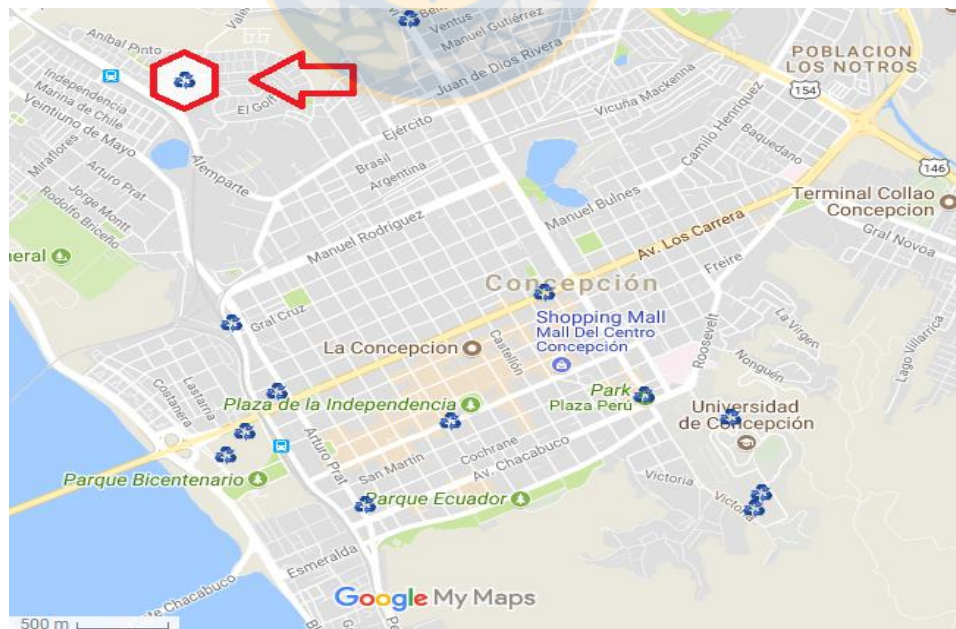


Figura 9: Ubicación del centro de reciclaje centralizado mayor en el modelo.

Fuente: Elaboración propia.

Se determinó definir este punto de reciclaje como centro mayor en el modelo porque cumple con condiciones de capacidad de almacenaje que permiten que pueda recibir grandes cantidades de material proveniente de distintos centros pequeños de reciclaje, a diferencia del resto de los otros puntos de reciclaje identificados en la comuna que son pequeños y no tienen suficiente capacidad.

5.3. Instancias, resultados y análisis.

En esta sección, se presentan diferentes instancias de prueba y se analizan los resultados obtenidos al resolverlas. Primero, se analizó la instancia base descrita en la sección anterior y, luego, se continuó analizando variaciones de esta.

5.3.1. Instancia 1 – Instancia base

A partir de los datos para la instancia base descritos en el título anterior, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación en las Tabla 11, Tabla 12 y Tabla 13. En la Tabla 14 se presenta un resumen de los cómputos del *software* utilizado para resolver la instancia.

Tabla 11: Centros de recolección abiertos.

Fuente: Elaboración propia.

Centros de recolección inicial abiertos											
Centro n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Abierto	No	No	No	No	No	No	Si	No	No	No	No

Tabla 12: Cantidad de usuarios asignados a cada centro.

Fuente: Elaboración propia.

Cantidad de usuarios asignados a cada centro de recolección inicial											
Centro n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Usuarios asignados	0	0	0	0	0	0	182	0	0	0	0

Tabla 13. Cantidad de material recolectado en cada centro.

Fuente: Elaboración propia.

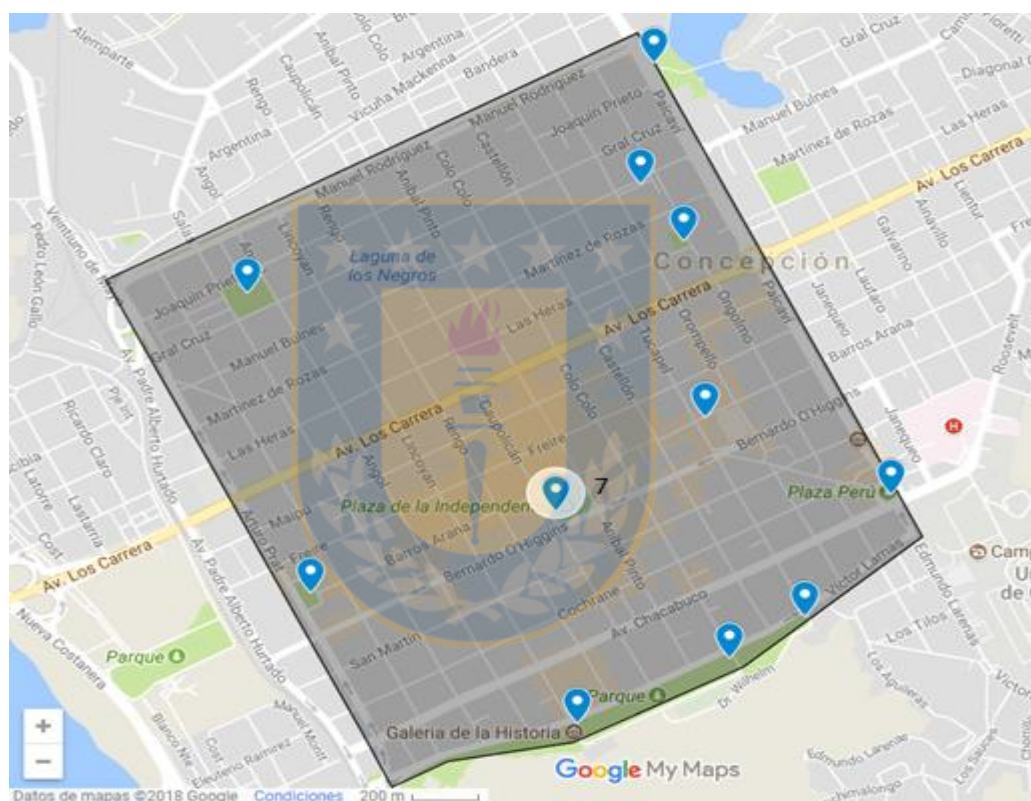
Material recolectado por centro de recolección inicial											
Centro n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Kg/mes	0	0	0	0	0	0	1274	0	0	0	0

Tabla 14: Estadística de la resolución del software. Fuente: Elaboración propia.

Estadísticas de la 1ra parte del problema resuelto por IBM ILOG CPLEX								
Nodos usuarios	Nodos centros de reciclaje inicial	Variables Binarias	Variables Enteras	Restricciones	Iteraciones	Tiempo de ejecución (s)	Solución Optima	Objetivo (Pesos Chilenos)
182	11	2013	22	215	764	0,41	Si	\$ 5.165.380

De los resultados de este caso, se observa que sólo un centro de recolección inicial ha sido asignado a todos los usuarios. De acuerdo a la programación y al planteamiento del problema base, el resultado es correcto y se explica porque la cantidad total de material a reciclar proveniente de los usuarios es inferior a la capacidad de almacenamiento de un centro de recolección inicial.

El único centro de recolección activo es el que se muestra en la Figura 10, ubicado en el centro de toda el área de prueba y corresponde al sitio en donde se reduce la sumatoria de las distancias de viaje de todos los usuarios.



*Figura 10: Centro de recolección inicial determinado en la resolución de la instancia base.
Fuente: Elaboración propia.*

Los resultados de la segunda parte del problema (Vendedor Viajero) no se muestran gráficamente para esta instancia dado que hay solo un punto de reciclaje inicial donde se debe retirar el material recolectado para luego volver al punto de reciclaje mayor centralizado, por lo tanto el problema no es aplicable.

Con referencia al resultado descrito: según estudios previos, los usuarios no reciclarán si no tienen facilidad de acceso a un punto de reciclaje (S. Zhang et al., 2016). En el caso analizado, que exista sólo un centro de recolección inicial, significa que para algunos usuarios el acceso a

este punto no es fácil debido a la mayor distancia a recorrer y, por lo tanto, en un caso real probablemente no reciclarían.

5.3.2. Instancia 2 – Modificación de la instancia base

Considerando el resultado anterior, se optó por agregar una nueva restricción y un nuevo parámetro para que el resultado sea factible de aplicar a la realidad y que los usuarios acudan al centro de recolección inicial asignado y reciclen. Esta restricción se refiere a lo expresado en la ecuación (13):

$$D_{ij} Y_{ij} \leq Dist_{max} \quad , \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J \quad (13)$$

Donde Distmax representa la distancia máxima que recorre un usuario i cualquiera hacia su centro de recolección inicial j designado.

Así, (13) restringe directamente la distancia máxima que puede haber entre un usuario y un centro de recolección inicial abierto.

De esta forma, se generó la segunda instancia de prueba, se consideró la nueva restricción de distancia máxima a recorrer por cada usuario, y también para el resto de instancias siguientes, dada la importancia que tiene.

A partir de la nueva restricción, se define la segunda instancia y se conservan los mismos parámetros de la instancia base. Así, se obtuvo los resultados que se muestran a continuación en las Tabla 15, Tabla 16 y Tabla

Tabla 17, para la primera parte del problema. En la Tabla 18 se presenta un resumen de los cómputos del software utilizado para resolver la instancia y el resultado del objetivo.

Tabla 15: Centros de recolección abiertos.

Fuente: Elaboración propia.

Centros de recolección inicial abiertos											
Centro n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Abierto	Si	Si	No	No	Si	No	Si	No	No	Si	No

Tabla 16: Cantidad de usuarios asignados a cada centro.

Fuente: Elaboración propia.

Cantidad de usuarios asignados a cada centro de recolección inicial											
Centro n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Usuarios asignados	33	37	0	0	25	0	44	0	0	43	0

Tabla 17: Cantidad de material recolectado en cada centro.

Fuente: Elaboración propia.

Material recolectado por centro de recolección inicial											
Centro n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Kg/mes	231	259	0	0	175	0	308	0	0	301	0

Tabla 18: Estadística de la resolución del software.

Fuente: Elaboración propia.

Estadísticas de la 1ra parte del problema resuelto por IBM ILOG CPLEX								
Nodos usuarios	Nodos centros de reciclaje inicial	Variables Binarias	Variables Enteras	Restricciones	Iteraciones	Tiempo de ejecución (s)	Solución Optima	Objetivo (Pesos Chilenos)
182	11	2013	22	2217	50	1,36	Si	\$ 25.076.835

En la Figura 11 se muestran los centros de recolección inicial abiertos en esta instancia de prueba.

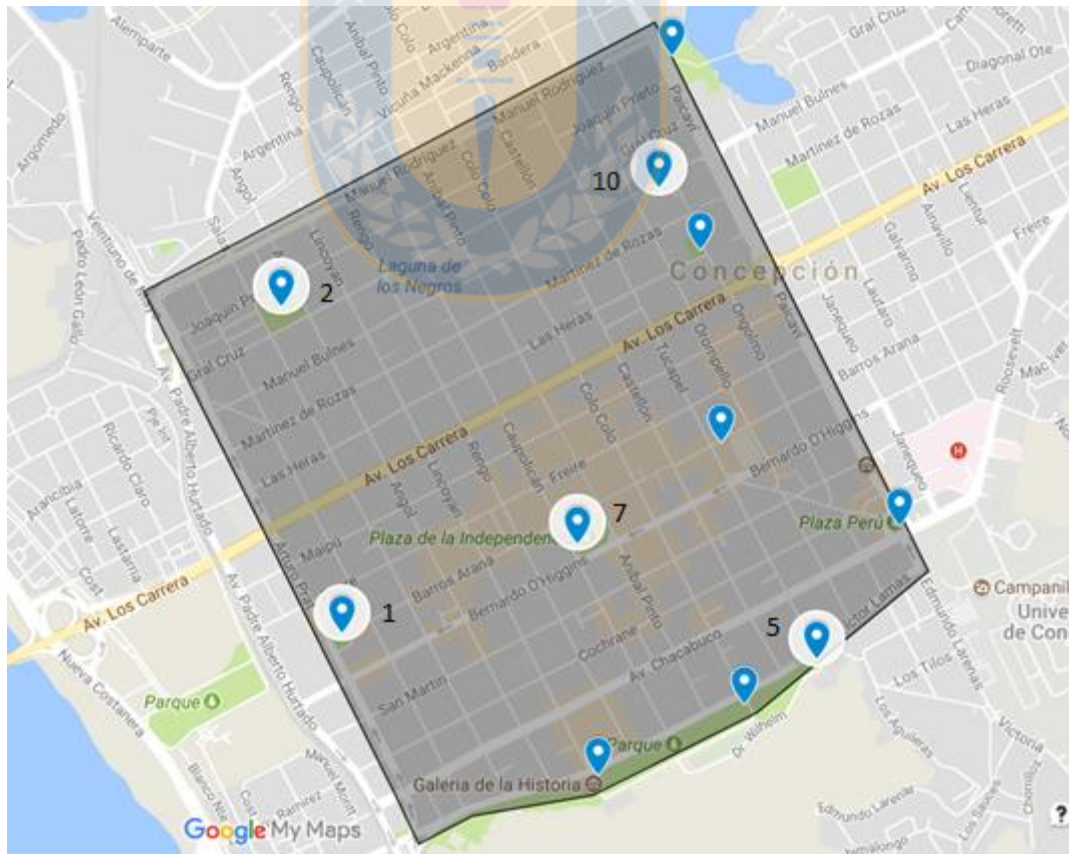


Figura 11: Centros de recolección abiertos en la instancia dos.

Fuente: Elaboración propia.

Para la instancia dos, se observa que son cinco los centros de recolección abiertos. Además, se observa que de estos cinco centros abiertos, se repite el centro abierto en la instancia base (instancia uno).

Respecto a la segunda parte del problema, el resultado obtenido para la ruta más corta desde el centro de reciclaje mayor, pasando por los centros de reciclaje inicial y volver al punto de inicio, es el que se grafica en la Figura 12.

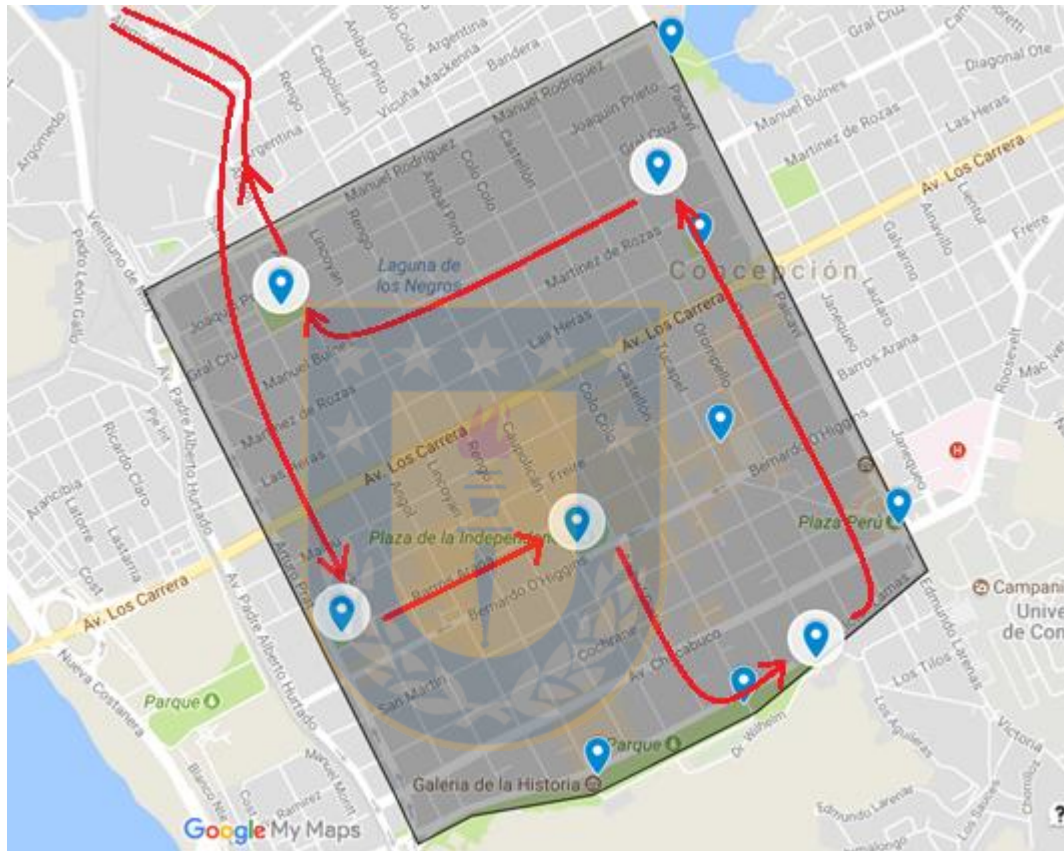


Figura 12: Ruta óptima de recolección hacia el centro mayor en la instancia dos.

Fuente: Elaboración propia.

La representación gráfica mostrada en la Figura 12 obedece a una solución esperada y, al analizarla visualmente gracias a la simplicidad de la ruta, se confirma que es correcta. En la Tabla 19 se presenta un resumen de los cálculos del software utilizado para resolver la instancia y el resultado del objetivo.

Tabla 19: Resolución del software.

Fuente: Elaboración propia.

Estadísticas de la 2da parte del problema resuelto por IBM ILOG CPLEX							
Nodos centro de reciclaje mayor	Nodos centros de reciclaje inicial	Variables	Restricciones	Iteraciones	Tiempo de ejecución (s)	Solución Optima	Objetivo
1	5	41	78	17	0,12	Si	\$ 6.096

5.3.3. Instancia 3 - Usuarios que empiezan a reciclar en mayor cantidad

En esta tercera instancia, se optó por variar la cantidad de material reciclable que lleva cada usuario al centro de reciclaje. Para este fin, el porcentaje de reciclaje ha sido tomado del caso europeo del año 2001, donde se registró un porcentaje de basura reciclada de 23% (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2013). Con esto, se tiene que cada nodo usuario pasa de generar 7 kg/mes de material reciclable a 110 kg/mes.

Al resolver el problema, con esta variable modificada, no existe resultado factible dado que la capacidad de los puntos de reciclaje se ve superada al también considerar la restricción de que los usuarios tienen una distancia máxima de recorrido hacia el punto de reciclaje asignado.

Para resolver el problema, se hizo una nueva suposición indicando que la recolección del material reunido en los puntos de reciclaje es dos veces al mes para ser trasladado al centro de reciclaje mayor centralizado. Esto último se refleja en los parámetros, indicando que cada nodo usuario genera 55 kg/medio mes.

A partir de esto, se obtuvieron los resultados mostrados en las Tabla 20, Tabla 21 y Tabla 22. En la Tabla 23 se presenta un resumen de los cálculos del *software* utilizado para resolver la instancia y el resultado del objetivo.

Tabla 20: Centros de recolección abiertos.

Fuente: Elaboración propia.

Centros de recolección inicial abiertos											
Centro n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Abierto	Si	Si	No	Si	No	No	Si	Si	No	Si	No

Tabla 21: Cantidad de usuarios asignados a cada centro.

Fuente: Elaboración propia.

Cantidad de usuarios asignados a cada centro de recolección inicial											
Centro n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Usuarios asignados	33	33	0	20	0	0	33	30	0	33	0

Tabla 22: Cantidad de material recolectado en cada centro.

Fuente: Elaboración propia.

Material recolectado por centro de recolección inicial											
Centro n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Kg/mes	1815	1815	0	1100	0	0	1815	1650	0	1815	0

Tabla 23: Estadística de la resolución del software.

Fuente: Elaboración propia.

Estadísticas de la 1ra parte del problema resuelto por IBM ILOG CPLEX								
Nodos usuarios	Nodos centros de reciclaje inicial	Variables Binarias	Variables Enteras	Restricciones	Iteraciones	Tiempo de ejecución (s)	Solución Óptima	Objetivo (Pesos Chilenos)
182	11	2013	22	2217	25714	1,58	Si, con tolerancia	\$ 30.071.120

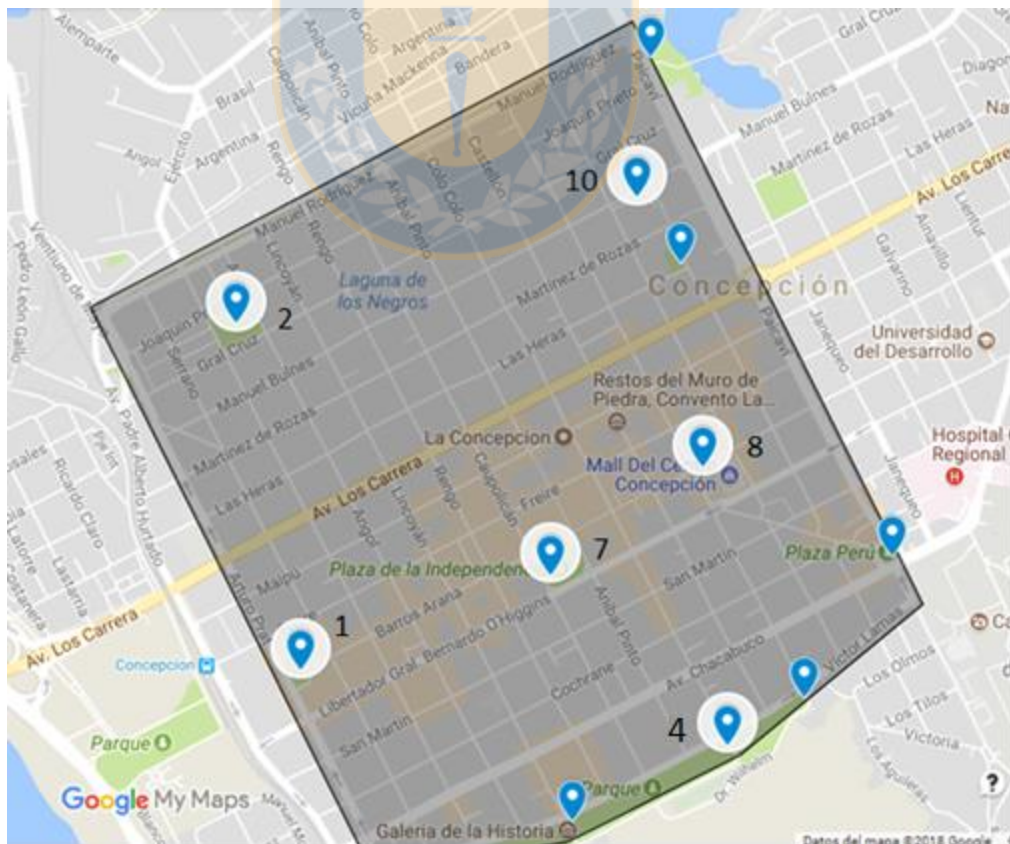
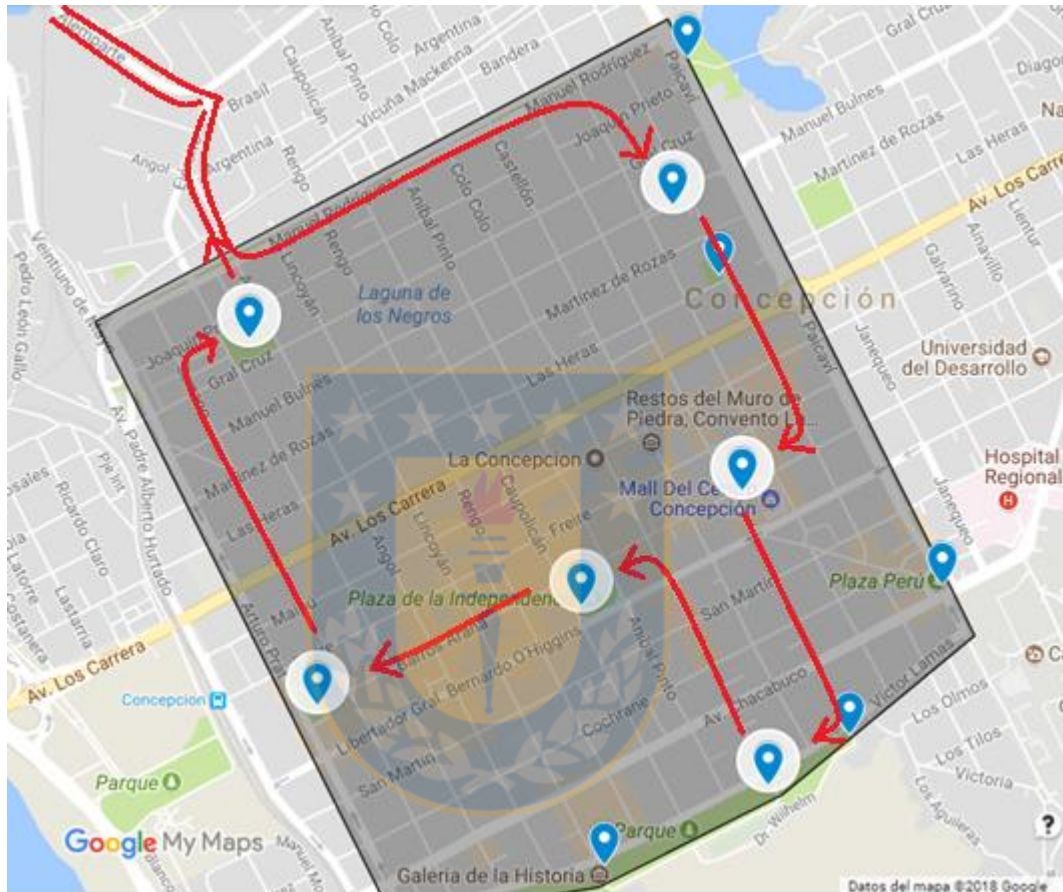


Figura 13: Centros de recolección abiertos en la instancia tres.

Fuente: Elaboración propia.

El resultado de la Tabla 20 se refleja en la Figura 13, donde se observa que para la instancia tres se abren 6 centros de reciclaje inicial.

Respecto a la segunda parte del problema, el resultado obtenido para la ruta más corta desde el centro de reciclaje mayor, pasando por los centros de reciclaje inicial y volver al punto de inicio, es el que se grafica en la Figura 14.



*Figura 14: Ruta optima de recolección hacia el centro mayor en la instancia tres.
Fuente: Elaboración propia.*

En la Tabla 24 se presenta un resumen de los cálculos del *software* utilizado para resolver la instancia y el resultado del objetivo.

*Tabla 24: Resolución del software.
Fuente: Elaboración propia.*

Estadísticas de la 2da parte del problema resuelto por IBM ILOG CPLEX							
Nodos centro de reciclaje mayor	Nodos centros de reciclaje inicial	Variables	Restricciones	Iteraciones	Tiempo de ejecución (s)	Solución Optima	Objetivo
1	6	55	105	34	0,17	Si	\$ 6.096

5.3.4. Instancia 4 - Variación en los costos de instalar un centro de reciclaje inicial

Para la cuarta instancia, se trabajó con el supuesto de que el costo de instalación de un centro de reciclaje inicial ha bajado a la mitad, pasando de cinco millones de pesos a un total de dos millones y medio de pesos cada instalación.

Los resultados de lo planteado en esta instancia son los que se muestran en las Tabla 25, Tabla 26 y Tabla 27. En la Tabla 28 se presenta un resumen de los cómputos del *software* utilizado para resolver la instancia y el resultado del objetivo.

*Tabla 25: Centros de recolección abiertos.
Fuente: Elaboración propia.*

Centros de recolección inicial abiertos											
Centro n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Abierto	Si	Si	No	No	Si	No	Si	No	No	Si	No

*Tabla 26: Cantidad de usuarios asignados a cada centro.
Fuente: Elaboración propia.*

Cantidad de usuarios asignados a cada centro de recolección inicial											
Centro n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Usuarios asignados	33	37	0	0	25	0	44	0	0	43	0

*Tabla 27: Cantidad de material recolectado en cada centro.
Fuente: Elaboración propia.*

Material recolectado por centro de recolección inicial											
Centro n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Kg/mes	231	259	0	0	175	0	308	0	0	301	0

*Tabla 28: Estadística de la resolución del software.
Fuente: Elaboración propia.*

Estadísticas de la 1ra parte del problema resuelto por IBM ILOG CPLEX								
Nodos usuarios	Nodos centros de reciclaje inicial	Variables Binarias	Variables Enteras	Restricciones	Iteraciones	Tiempo de ejecución (s)	Solución Óptima	Objetivo (Pesos Chilenos)
182	11	2013	22	2217	50	0,36	Si	\$ 12.576.835

En la Figura 15, se observa que el resultado es el mismo que en la instancia dos. Con esto se demuestra que el factor costo de cada centro inicial de reciclaje tiene mayor peso, que la distancia recorrida por los usuarios, al momento de llegar a la solución del problema planteado.

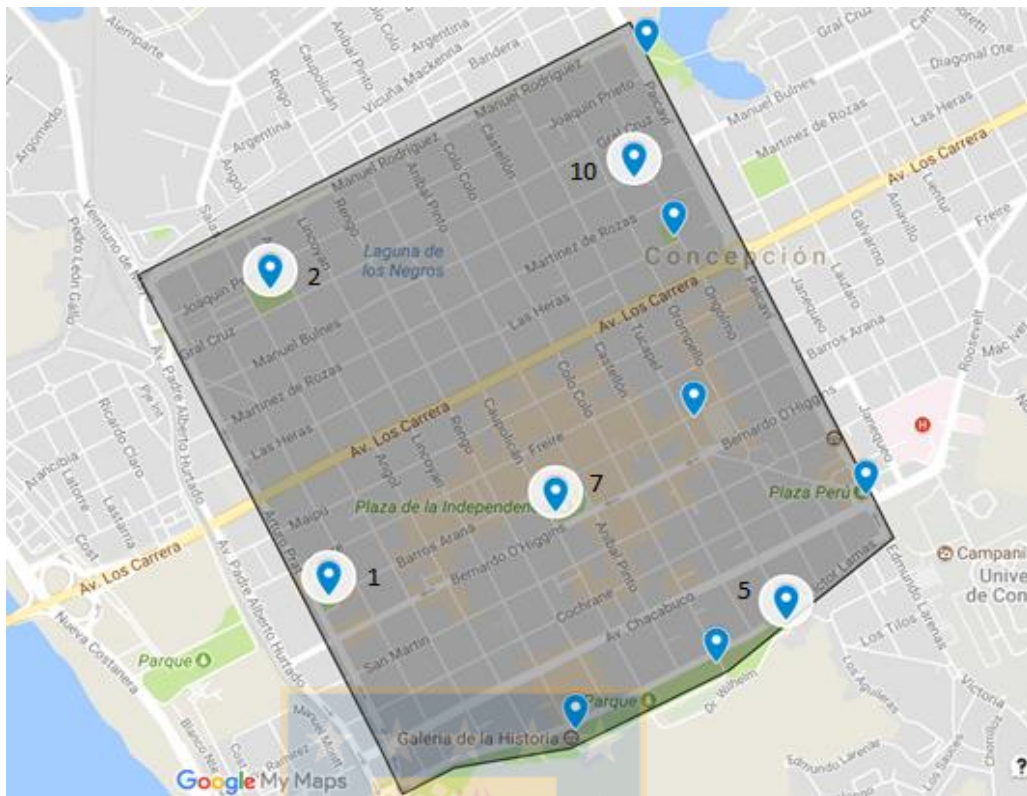


Figura 15: Centros de recolección abiertos en la instancia cuatro.
Fuente: Elaboración propia.

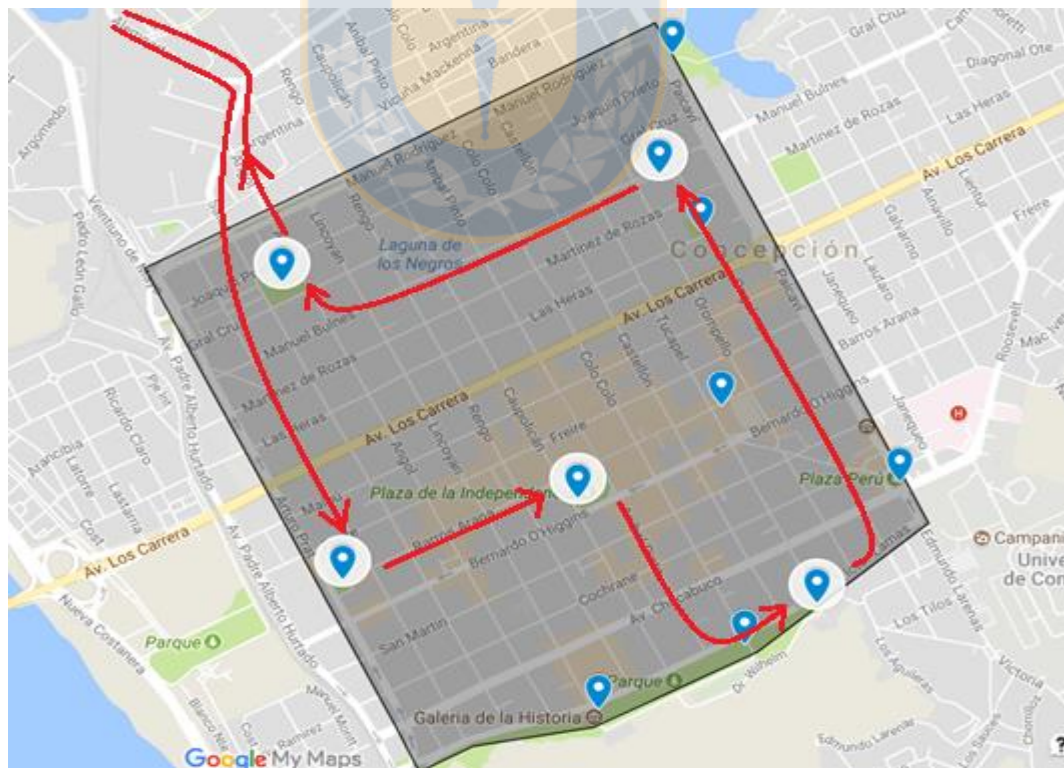


Figura 16: Ruta óptima de recolección hacia el centro mayor en la instancia cuatro.
Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la segunda parte del problema, el resultado obtenido para la ruta más corta desde el centro de reciclaje mayor, pasando por los centros de reciclaje inicial y volver al punto de inicio, es el que se grafica en la Figura 16.

En la Tabla 29 se presenta un resumen de los cálculos del *software* utilizado para resolver la instancia y el resultado del objetivo.

*Tabla 29: Resolución del software.
Fuente: Elaboración propia.*

Estadísticas de la 2da parte del problema resuelto por IBM ILOG CPLEX							
Nodos centro de reciclaje mayor	Nodos centros de reciclaje inicial	Variables	Restricciones	Iteraciones	Tiempo de ejecución (s)	Solución Optima	Objetivo
1	5	41	78	17	0,12	Si	\$ 6.096

5.3.5. Instancia 5 – Centros de reciclaje inicial sin ubicaciones limitadas

En esta instancia de prueba, los centros de reciclaje pueden estar ubicados en cualquier lugar del área del espacio de prueba considerado, es decir que los nodos de usuarios también son posibles lugares para instalar un centro de reciclaje inicial. Así, en esta instancia hay 182 nodos de posibles ubicaciones para los centros iniciales.

Los resultados de esta instancia son los que se muestran en las Tabla 30, Tabla 31 y Tabla

Tabla 32. En la Tabla 33 se presenta un resumen de los cálculos del *software* utilizado para resolver la instancia y el resultado del objetivo.

*Tabla 30: Centros de recolección abiertos.
Fuente: Elaboración propia.*

Centros de recolección inicial abiertos				
Centro n°	49	140	134	43
Abierto	Si	Si	Si	Si

*Tabla 31: Cantidad de usuarios asignados a cada centro.
Fuente: Elaboración propia.*

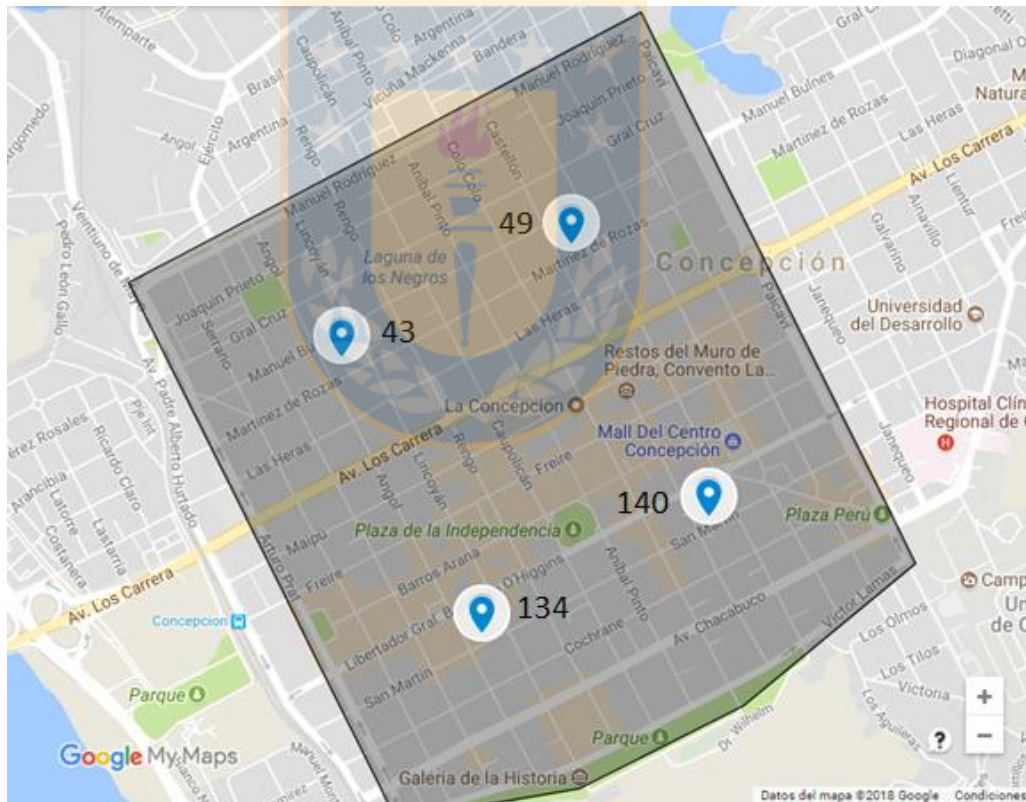
Cantidad de usuarios asignados a cada centro de recolección inicial				
Centro n°	49	140	134	43
Usuarios asignados	47	46	45	44

*Tabla 32: Cantidad de material recolectado en cada centro.
Fuente: Elaboración propia.*

Material recolectado por centro de recolección inicial				
Centro n°	49	140	134	43
Kg/mes	329	322	315	308

*Tabla 33: Estadística de la resolución del software.
Fuente: Elaboración propia.*

Estadísticas de la 1ra parte del problema resuelto por IBM ILOG CPLEX								
Nodos usuarios	Nodos centros de reciclaje inicial	Variables Binarias	Variables Enteras	Restricciones	Iteraciones	Tiempo de ejecución (s)	Solución Óptima	Objetivo (Pesos Chilenos)
182	182	33306	364	33852	839267	93,39	Si, con tolerancia	\$ 20.076.962



*Figura 17: Centros de recolección abiertos en la instancia cinco.
Fuente: Elaboración propia.*

Se observa, en la Figura 17, que los puntos de reciclaje inicial quedaron equidistantes. Este es un resultado que responde a la lógica del planteamiento matemático, donde se busca equilibrar la cantidad de usuarios en cada centro de reciclaje inicial, en busca de la disminución de costos.

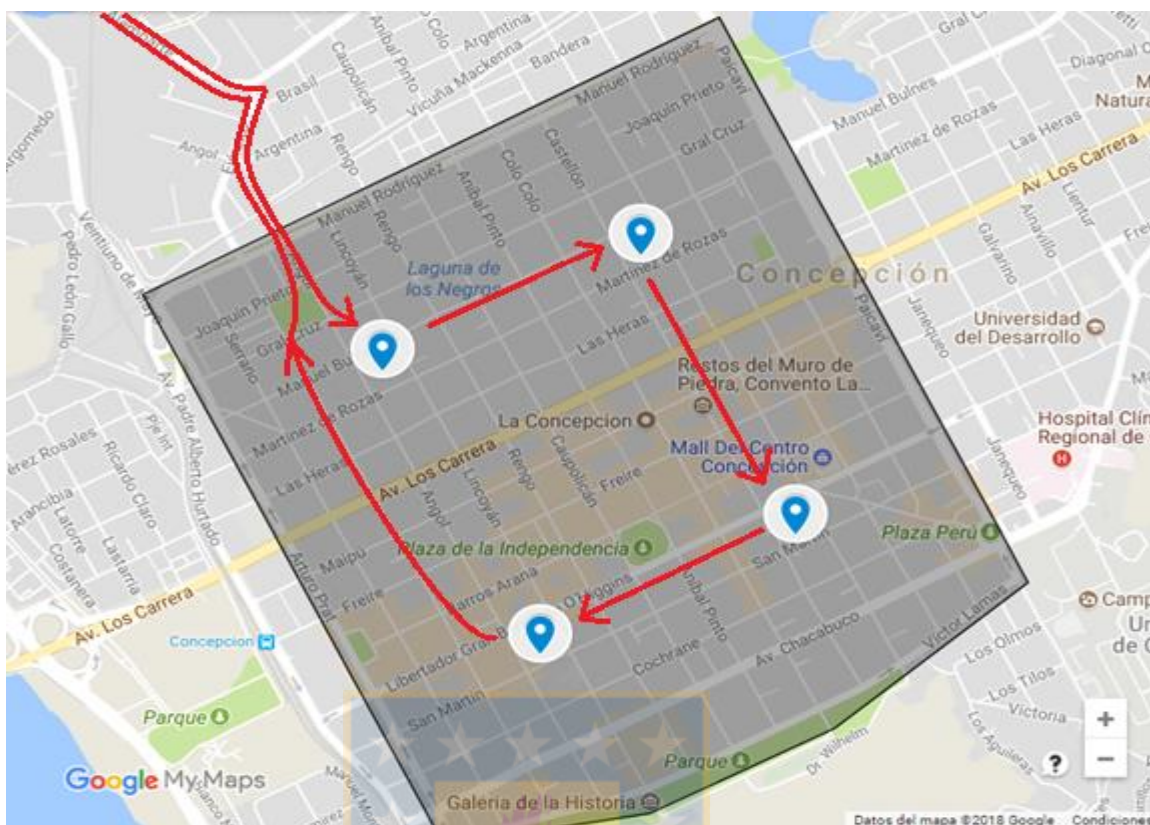


Figura 18: Ruta óptima de recolección hacia el centro mayor en la instancia cinco.
Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la segunda parte del problema, el resultado obtenido para la ruta más corta desde el centro de reciclaje mayor, pasando por los centros de reciclaje inicial y volver al punto de inicio, es el que se muestra en la Figura 18. Se observa que el resultado responde a la lógica del problema del vendedor viajero.

En la Tabla 34 se presenta un resumen de los cálculos del *software* utilizado para resolver la instancia y el resultado del objetivo.

Tabla 34: Resolución del software. Fuente: Elaboración propia.

Estadísticas de la 2da parte del problema resuelto por IBM ILOG CPLEX

Nodos centro de reciclaje mayor	Nodos centros de reciclaje inicial	Variables	Restricciones	Iteraciones	Tiempo de ejecución (s)	Solución Óptima	Objetivo
1	4	29	55	13	0,14	Si	\$ 4.572

CAPITULO 6. DISCUSIÓN

Se han identificado diferentes escenarios y se ha analizado cómo se podrían abarcar, a través de la resolución de diferentes instancias. Gracias a esto se ha probado que la metodología propuesta para resolver el problema entrega resultados que responden a la lógica de la situación, con soluciones que eventualmente podrían ser aplicadas a un caso real.

A partir del análisis de la instancia base, se determinó que se debe considerar restricciones extra respecto a la distancia que recorre cada usuario hasta un punto de reciclaje inicial asignado, como lo fue la restricción de distancia máxima a recorrer por usuario. Gracias a esta adición en las restricciones se llega a resultados que se acercan más a la realidad, esto considerando que según estudios previos, los usuarios no reciclarán si no tienen facilidad de acceso a un punto de reciclaje (S. Zhang et al., 2016).

La segunda instancia de prueba, refleja un escenario más realista gracias a la restricción de distancia máxima a recorrer por los usuarios. También se determina que esta restricción debe ser usada en el resto de las instancias de prueba dada su importancia.

En la tercera instancia se consideró que los usuarios empiezan a reciclar 16 veces más de lo que actualmente se recicla (según los registros existentes). Este es un aumento bastante considerable y es poco probable que ocurra en el corto plazo. Analizando los resultados de esta instancia, se observa que solo si ocurre un aumento bastante significativo como el descrito, la recolección de material acumulado en los centros iniciales debería ser recolectada más de una vez al mes (dos veces en este caso).

A partir de los resultados de la cuarta instancia, en donde el costo de cada centro de recolección inicial baja a la mitad, se reafirma que para la resolución matemática del modelo, los costos de instalación tienen mayor peso de decisión que la distancia recorrida por los usuarios.

De los resultados de la quinta instancia, en donde el espacio para ubicar un centro de recolección inicial es libre dentro del área de análisis, se observa que los centros se distribuyen uniformemente en el mapa, y cada centro trabaja a capacidades muy similares. Esto es una confirmación de que el planteamiento del problema matemático ha sido correcto y se disminuye la distancia para los usuarios lo máximo posible.

Al resolver las diferentes instancias de prueba se identifica que la distancia de un usuario respecto a un centro de reciclaje inicial, en la solución del problema matemático de

minimización planteado, no es un factor con tanta importancia como lo es el costo de instalación de uno de estos centros y se deben considerar restricciones que afecten directamente esta variable, como por ejemplo lo fue la restricción de distancia máxima a recorrer.

Sumándose a lo anterior, deberían considerarse nuevas restricciones que tengan que ver con cómo hacer que la población pueda participar más del reciclaje. Este es un punto en el cual se debe investigar más.

A partir de los resultados, la instancia dos refleja la mejor aproximación a la realidad debido a que se consideran datos obtenidos de la estadística nacional y además se consideró el factor distancia máxima que recorre cada usuario.



CAPITULO 7. CONCLUSIONES

Si bien la contaminación es un problema de múltiples causas, en el ámbito del reciclaje hay muchas oportunidades de mejora, tanto a nivel individual como colectivo. En este trabajo se investigó con un enfoque dirigido a la cadena de suministro de recolección del material reciclable, donde se hizo una caracterización de la situación para la recolección de material en la comuna de Concepción.

Como resultado de la investigación, se concluye que es posible caracterizar y diseñar un sistema optimizado para la recolección del material reciclable a nivel domiciliario, específicamente en la comuna de Concepción.

Se identificaron diferentes escenarios y se analizó cómo abarcarlos, gracias a esto se ha probado que la metodología propuesta para resolver el problema entrega resultados que responden a la lógica de la situación, con soluciones que eventualmente podrían ser aplicadas a un caso real.

También, se concluye que la distancia de un usuario respecto a un centro de reciclaje inicial, en la solución del problema matemático de minimización planteado, no es un factor con tanta importancia como lo es el costo de instalación de uno de estos centros. Por lo tanto, se debe considerar restricciones extra respecto a la distancia que recorre cada usuario.

A partir de los resultados obtenidos en esta tesis, surgen nuevas áreas de interés respecto a trabajos futuros que permitan abarcar de manera más exacta el problema analizado. En este caso se ha analizado el material reciclable como reciclaje en general sin diferenciar por categorías, una caracterización en mayor detalle del material reciclable que genera la gente sería un avance, para así poder dar prioridad de espacios a los centros de reciclaje mayores para que estos estén acondicionados correctamente.

Otra alternativa de estudio podría enfocarse a cómo hacer que la población participe efectivamente del reciclaje, detectando posibles mejoras, no solo decidiendo dónde ubicar puntos de reciclaje, sino que también buscando otras acciones que motiven a participar del reciclaje en forma constante.

Finalmente, con este estudio se ha dado un punto de partida para futuros análisis más detallados, que pueden ser aplicados no solo a la comuna de Concepción sino que a otras comunas del país. Esto es un área importante para desarrollar dado el contexto que se vive en la actualidad respecto al reciclaje y las nuevas legislaciones que empiezan a regir al respecto.

CAPITULO 8. REFERENCIAS:

- Accorsi, R., Cascini, A., Cholette, S., Manzini, R., & Mora, C. (2014). Economic and environmental assessment of reusable plastic containers: A food catering supply chain case study. *International Journal of Production Economics*, 152, 88–101.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.014>
- Agencia Europea de Medio Ambiente. (2013). Las mayores tasas de reciclado se registran en Austria y Alemania, pero el Reino Unido e Irlanda muestran un aumento más rápido. Retrieved January 18, 2018, from
<https://www.eea.europa.eu/es/pressroom/newsreleases/las-mayores-tasas-de-reciclado>
- Ambientum.com - Enciclopedia Medioambiental. (n.d.). Suelos y Residuos - Recogida selectiva de residuos. Retrieved January 17, 2018, from
http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/suelos/recogida_selectiva_de_residuos.asp
- Bilgen, B., & Çelebi, Y. (2013). Integrated production scheduling and distribution planning in dairy supply chain by hybrid modelling. *Annals of Operations Research*, 211(1), 55–82.
<https://doi.org/10.1007/s10479-013-1415-3>
- Bing, X., Bloemhof-Ruwaard, J., Chaabane, A., & Van Der Vorst, J. (2015). Global reverse supply chain redesign for household plastic waste under the emission trading scheme. *Journal of Cleaner Production*, 103, 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.019>
- Council of Supply Chain Management Professionals, & Vitasek, K. (2013). Council of Supply Chain Management Professionals: Terms and Glossary.
<https://doi.org/10.1201/9781420025705.ch2>
- Eco-Innovation observatory. (2015). Glossary of Terms Used in the Eco Innovation Observatory. Retrieved June 26, 2017, from http://www.eco-innovation.eu/index.php?option=com_glossary&letter=M&id=18&Itemid=126
- Fundación el Arbol. (2017). ¿Dónde reciclar en Concepción? | Fundación El Árbol. Retrieved January 22, 2018, from <http://fundacionelarbol.cl/donde-reciclar/>
- Gold, S., & Seuring, S. (2011). Supply chain and logistics issues of bio-energy production. *Journal of Cleaner Production*, 19(1), 32–42.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.08.009>

Gutowski, T. G., & Dahmus, J. B. (2005). Mixing entropy and product recycling. *Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2005.*, 72–76. <https://doi.org/10.1109/ISEE.2005.1436997>

Ilustre Municipalidad de Concepción. (2017). Entrevista a funcionarios de la municipalidad de Concepción.

Johnsen, T., Howard, M., & Miemczyk, J. (2014). *Purchasing and Supply Chain: A sustainability perspective*. Roulledge.

Libertun, N., & Guerrero, R. (2017). ¿ Cuánto cuesta la densificación ? La relación entre la densidad y el costo de proveer servicios urbanos básicos en. *EURE (Santiago)*, 43(130), 235–267.

MATPEL. (2017). Entrevista realizada a funcionarios que administran puntos de reciclaje en la Universidad de Concepción.

Mentzer, J. T., Keebler, J. S., Nix, N. W., Smith, C. D., & Zacharia, Z. G. (2001). Defining Supply Chain Management. *Journal of Business Logistics*, 22(2), 1–25. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2001.tb00001.x>

Ministerio del Medio Ambiente, C. (2016, June 1). Marco para la gestión de residuos: La responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje. *Diario Oficial de La Republica de Chile*. Chile: Ministerio del Interior. Retrieved from <http://portal.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2015/06/do-20160601-web.pdf>

Ministerio del Medio Ambiente, & Amphos 21 Consulting Chile. (2015). *Evaluación de los impactos ambientales, sociales y económicos de la implementación de la responsabilidad extendida del productor en Chile aplicada a los aparatos eléctricos*.

Ministerio del medio Ambiente, & Eco-Ingeniería Ltda. (2012). *Evaluación de los impactos económicos, ambientales y sociales de la implementación de la responsabilidad extendida del productor en Chile: sector envases y embalajes*.

Mohamed Sultan, A. A., Lou, E., & Mativenga, P. T. (2017). What should be recycled: An integrated model for product recycling desirability. *Journal of Cleaner Production*, 154, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.201>

- Monczka, R., Trent, R., & Handfield, R. (2001). *Purchasing and Supply Chain Management* (2nd ed.). South-Western.
- Pradhan, J. K., & Kumar, S. (2014). Informal e-waste recycling: Environmental risk assessment of heavy metal contamination in Mandoli industrial area, Delhi, India. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(13), 7913–7928.
<https://doi.org/10.1007/s11356-014-2713-2>
- Sheriff, K. M. M., Subramanian, N., Rahman, S., & Jayaram, J. (2015). Integrated optimization model and methodology for plastics recycling: Indian empirical evidence. *Journal of Cleaner Production*, 153, 707–717.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.137>
- Straub, J. (2015). In search of technology readiness level (TRL) 10. *Aerospace Science and Technology*, 46, 312–320. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.07.007>
- Tansel, B. (2017). From electronic consumer products to e-wastes: Global outlook, waste quantities, recycling challenges. *Environment International*, 98, 35–45.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.10.002>
- Waste Plastic Recycling. (2014). Plastic Recycling Company. Retrieved June 22, 2017, from <http://greentechindia.com/plastic-recycling/>
- Yang, G., Wang, Z., & Li, X. (2009). The optimization of the closed-loop supply chain network. *Transportation Research Part E*, 45(1), 16–28.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2008.02.007>
- Zhang, S., Zhang, M., Yu, X., & Ren, H. (2016). What keeps Chinese from recycling: Accessibility of recycling facilities and the behavior. *Resources, Conservation and Recycling*, 109, 176–186. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.02.008>
- Zhang, W. H., Wu, Y. X., & Simonnot, M. O. (2012). Soil Contamination due to E-Waste Disposal and Recycling Activities: A Review with Special Focus on China. *Pedosphere*, 22(4), 434–455. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(12\)60030-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(12)60030-7)