



## DOCUMENTO INFORME FINAL

---

“Consultoría de Mejoramiento al Sistema de Recolección de Residuos Sólidos Domiciliarios en la Comuna de Santiago”

21 de Octubre de 2014



Santiago, Octubre 21 de 2014

Señor  
Mauricio Valenzuela  
Subdirector de Planificación SECPLAN  
**Ilustre Municipalidad de Santiago**  
P r e s e n t e

De mi consideración;

Por medio de la presente y adjunto, hago entrega a Ud. en medios físicos y magnéticos, del Informe de Final y Anexos de la "Consultoría de Mejoramiento al Sistema de Recolección de Residuos Sólidos Domiciliarios en la Comuna de Santiago" y del Estudio Complementario denominado "Análisis del Sistema de Barrido de la Comuna de Santiago", conforme a las observaciones emitidas con fecha 15 de octubre y las obligaciones contractuales vigentes.

Atentamente,

Pablo Beltrán Correa  
Jefe de Proyecto y Gerente Planificación Comercial  
**Cityplanning**

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>7</b>
1.1	ANTECEDENTES SOBRE LA COMUNA DE SANTIAGO.....	7
1.2	EVOLUCIÓN DE LOS RESIDUOS .....	10
1.3	EL SERVICIO DE RECOLECCIÓN DE BASURA.....	11
<b>2</b>	<b>DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....</b>	<b>12</b>
2.1	DESCRIPCIÓN GENERAL .....	12
2.2	NATURALEZA Y ALCANCE DEL PROBLEMA DE RECOLECCIÓN.....	16
2.2.1	<b>Características del Modelo requeridas por la Municipalidad .....</b>	<b>16</b>
2.2.2	<b>Análisis Legal Jornada Laboral de Funcionarios Municipales.....</b>	<b>22</b>
2.3	VISITAS A TERRENO Y REUNIONES .....	25
2.3.1	<b>Visita Terminal .....</b>	<b>25</b>
2.3.2	<b>Visita Sede Zona Oriente .....</b>	<b>25</b>
2.3.3	<b>Reuniones con las Zonas .....</b>	<b>26</b>
2.3.3.1	Reunión con Zona Centro Poniente .....	26
2.3.3.2	Reunión con Zona Poniente .....	27
2.3.3.3	Reunión con Zona Oriente.....	29
2.3.3.4	Reunión con Zona Nocturna .....	30
2.3.3.5	Reunión con Zona Centro Oriente.....	34
2.4	REVISIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN .....	35
2.4.1	<b>Exploración y Revisión Bibliográfica .....</b>	<b>35</b>
2.4.2	<b>Restricciones y Condiciones Viales de Contexto .....</b>	<b>37</b>
2.4.2.1	Restricciones de Tránsito .....	37
2.4.2.2	Ferías y Ciclorecreovías .....	39
2.4.3	<b>Información proporcionada Municipalidad de Santiago.....</b>	<b>42</b>
2.4.4	<b>Otras Fuentes de Información.....</b>	<b>43</b>
<b>3</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DE LA RECOLECCIÓN.....</b>	<b>44</b>
3.1	RED VIAL DEL ESTUDIO .....	44

<b>3.1.1</b>	<b>Área de Estudio</b> .....	<b>44</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Red Vial</b> .....	<b>45</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Vías de Circulación de Camiones</b> .....	<b>47</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Vías según Tipo de Recolección</b> .....	<b>50</b>
<b>3.1.5</b>	<b>Vías de Doble Recolección</b> .....	<b>54</b>
<b>3.1.6</b>	<b>Otras Características</b> .....	<b>57</b>
3.1.6.1	Zonas Territoriales Actuales .....	57
3.1.6.2	Azimuth .....	58
<b>3.1.7</b>	<b>Estructura de Datos Red Vial</b> .....	<b>58</b>
<b>3.2</b>	<b>GENERADORES DE BASURA</b> .....	<b>59</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Definición de Generadores</b> .....	<b>59</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Fuentes de Información</b> .....	<b>59</b>
3.2.2.1	Base de Roles de la Comuna de Santiago .....	59
3.2.2.2	Edificios .....	60
3.2.2.3	Aseo extraordinario .....	60
3.2.2.4	Cités.....	61
<b>3.2.3</b>	<b>Caracterización de los Generadores</b> .....	<b>61</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Georeferenciación de los Generadores</b> .....	<b>61</b>
3.2.4.1	Generadores Complejos.....	62
3.2.4.2	Generadores Puntuales.....	64
3.2.4.3	Generadores Cités .....	67
3.2.4.4	Generadores Simples .....	69
<b>3.3</b>	<b>RECOLECCIÓN ANUAL EN 2013</b> .....	<b>78</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Oferta Ejecutada en 2013</b> .....	<b>78</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Generación de Residuos EN 2013</b> .....	<b>84</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Caracterización del Problema de Recolección</b> .....	<b>90</b>
<b>4</b>	<b>DESARROLLO SOLUCIÓN DEL MODELO</b> .....	<b>91</b>

4.1	MODELAMIENTO DE LA GENERACIÓN DE BASURA .....	92
<b>4.1.1</b>	<b>Formulación de un Modelo de Generación de Basura .....</b>	<b>94</b>
4.1.1.1	Construcción de la cantidad de basura generada .....	95
4.1.1.2	Cantidad de viviendas en Edificios (Generadores Puntuales) y Cités .....	97
4.1.1.3	Modelamiento de la generación de basura .....	99
4.2	MODELO DE DISEÑO ÓPTIMO DE RUTAS .....	108
<b>4.2.1</b>	<b>Formulación Matemática .....</b>	<b>108</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Metodología Solución.....</b>	<b>113</b>
4.2.2.1	Introducción.....	113
4.2.2.2	Etapas y Sub-problemas.....	114
4.2.2.3	Sub-referencias Bibliográficas del Modelo .....	125
4.3	MODELO DE ASIGNACIÓN DE RECURSOS .....	127
4.4	DISEÑO GRAFOS .....	129
<b>4.4.1</b>	<b>Asignación de Generadores a los Arcos .....</b>	<b>129</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Tipo de Disposición de la Basura.....</b>	<b>131</b>
<b>4.4.3</b>	<b>Operación Nocturna y Horarios de Salida de la Basura .....</b>	<b>132</b>
4.4.3.1	Operación Nocturna .....	132
4.4.3.2	Operación Diurna y Nocturna .....	139
4.4.3.3	Operación Diurna.....	141
<b>4.4.4</b>	<b>Especificación Condiciones de Operación.....</b>	<b>142</b>
4.4.4.1	Tiempos de Desplazamiento o Circulación .....	144
4.4.4.2	Tiempos de Operación.....	156
4.4.4.3	Tiempos de viaje KDM.....	164
<b>4.4.5</b>	<b>Restricciones de Viraje .....</b>	<b>169</b>
<b>5</b>	<b>CORRIDAS DEL MODELO Y OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA .....</b>	<b>172</b>
5.1	CORRIDAS INICIALES .....	172
<b>5.1.1</b>	<b>Especificación de Parámetros y Penalidades .....</b>	<b>172</b>
5.1.2	Cantidad de Servicios a Modelar .....	175

5.1.3	Resultados Modelaciones Iniciales.....	177
5.1.3.1	Resultados Generales .....	177
5.1.3.2	Resultados por Escenario-Zona.....	178
5.1.3.3	Conclusiones de las Modelaciones Iniciales .....	182
5.2	CORRIDAS FINALES .....	183
<b>5.2.1</b>	<b>Ajuste Zona Nocturna .....</b>	<b>183</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Ajustes al Modelo Matemático.....</b>	<b>184</b>
5.2.2.1	Resultados por Escenario .....	186
5.2.2.2	Conclusiones de las Modelaciones Finales .....	194
5.3	ANÁLISIS COMPLEMENTARIO: CONTROL DE EFECTO “ISLAS” .....	196
<b>5.3.1</b>	<b>Análisis de Indicadores .....</b>	<b>202</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>204</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>205</b>
6.1	CONCLUSIONES .....	205
6.2	RECOMENDACIONES .....	208
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>210</b>
<b>8</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>211</b>
8.1	ANEXO: EJEMPLOS DE ERRORES DE LAS BASES DE DATOS .....	211
8.2	ANEXO: ANALISIS DE DATOS DE GOOGLE .....	213
8.3	ANEXO: ASIGNACIÓN DE REGISTROS GPS A LA RED .....	214
8.4	ANEXO: ENTREGABLES.....	217
8.5	ANEXO: MEDIO ÓPTICO .....	224

# 1 INTRODUCCIÓN<sup>1</sup>

---

## 1.1 ANTECEDENTES SOBRE LA COMUNA DE SANTIAGO

Hacia principios de la década de los 90, cuando se dio inicio al Programa de Repoblamiento, la comuna de Santiago alojaba tan sólo 230.974 habitantes, en una superficie total – enteramente urbanizada – de 2.230 hectáreas (poco menos del 10% de la superficie de los 34 municipios que componen el Área Metropolitana de Santiago), y con una densidad bruta de casi 104 habitantes por hectárea.

Esta situación fue fruto de un acelerado proceso de despoblamiento residencial que experimentó la comuna fundacional, en conjunto con otras 10 a 12 comunas del área central de la ciudad. En efecto, entre 1940 y 2002, y mientras la población total de la ciudad crecía más de 5 veces (de 952 mil a 5,4 millones de habitantes), la población residencial de la comuna de Santiago disminuyó a menos de la mitad, pasando de 444.196 habitantes en 1940 a poco más de 200.000 en 2002.

Este proceso de despoblamiento residencial fue particularmente severo entre los años 1960 y 1982, período en el que la comuna de Santiago perdió 170.000 habitantes, que equivalían al 80% del total de la población que dejó de vivir en la comuna de Santiago durante los últimos 100 años.

Al modelo de desarrollo urbano claramente expansionista que dominó la forma de hacer ciudad durante el último siglo, se asigna como una de las causas de este vaciamiento de su área central, que afectó no solo a la comuna de Santiago sino a un sector más amplio. La explosión expansiva comenzó a fines de la década de los 30, cuando la población de mayores ingresos comenzó a buscar una forma de vida suburbana, ligado a la idea del emergente modelo de la ciudad jardín que coincidió con la introducción del automóvil.

La comuna de Santiago ha experimentado en los últimos años una serie de cambios demográficos sociales y culturales influidos en parte, por el Programa de Repoblamiento, que se expresan de manera significativa durante el último período intercensal 2002 – 2012.

Según los datos preliminares del censo 2012, la comuna de Santiago creció durante los últimos 10 años, en **110.623** habitantes, siendo la de mayor crecimiento absoluto del Área Metropolitana de Santiago (AMS), seguido por Puente Alto (82.429) y Quilicura (70.821). Este crecimiento convirtió a la comuna de Santiago en la cuarta comuna más poblada de la ciudad capital con **311.415** habitantes (en el 2002 Santiago ocupaba el 7° lugar).

Este crecimiento poblacional tiene una expresión particular en cuanto a su velocidad de cambio, cuando se verifica que **117.355** habitantes mayores de 5 años (40% del total comunal) no vivían en la comuna del 2007. De ellos **22.387** habitantes tampoco vivían en el país ese año,

---

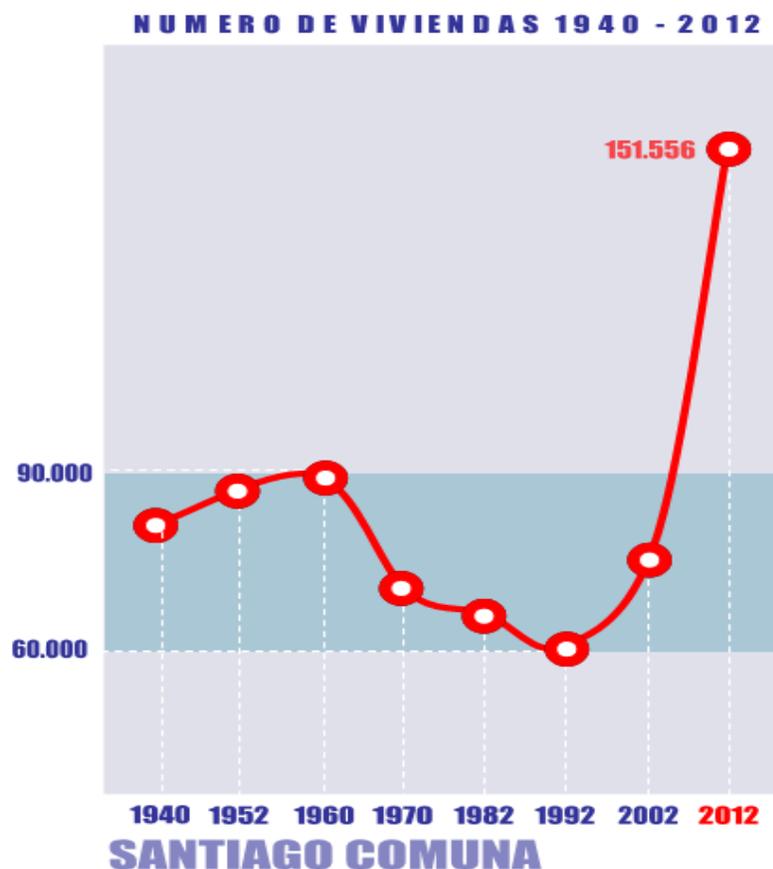
<sup>1</sup> Textos extraído del documento "Especificaciones\_Técnicas\_Referenciadas\_Estudio", correspondiente a las Bases Técnicas del concurso público de la asesoría que da origen a este informe.

representando la mayor llegada de población inmigrante desde el extranjero, de toda la ciudad durante el último quinquenio.

Los inmigrantes en la comuna suman el 2012 un total de **38.737** extranjeros, lo que representa un crecimiento del 210% respecto del 2002 (se triplicaron en los últimos 10 años) y manifiestan la mayor concentración de población inmigrantes de la ciudad, seguido por Las Condes (24.300) y Providencia (11.438). En cuanto al origen de procedencia, un 76,9% se concentra solo en 4 países (Perú : 20.800, Colombia : 5.300, Argentina : 1.975 y Ecuador : 1.696).

Además de lo anterior también se constata cambios en el perfil de los habitantes de la comuna, que hoy se concentran con un 44,85% en el tramo atareo de jóvenes y adultos jóvenes entre 15 y 34 años. Este Segmento prácticamente duplicó su población en el último período intercensal, pasando de 77.422 habitantes en 2002 a 143.348 habitantes en el 2012. El tramo "mayores de 60 años" bajó del 16% al 11,7%.

Figura 1, Evolución de Viviendas 1940 - 2012



Fuente: Bases de Licitación

Otro aspecto necesario de destacar en el perfil poblacional, es la cantidad de personas mayores de 15 años que trabajan y estudian, ya sea carreras profesionales, postítulos o magister. En todos estos casos la comuna de Santiago muestra la mayor concentración de la ciudad, en números de residentes que realizan esta doble función en los niveles de enseñanza superior (en estudios de doctorado Santiago ocupa el tercer lugar).

Santiago también ocupa el primer lugar a nivel de la ciudad, cuando hablamos de población mayor de 15 años que trabaja en la misma comuna, con 73.794 habitantes; seguido por Puente Alto (65.528) y Maipú (64.818). Santiago muestra también el índice de Dependencia Demográfica General (33,19) y menores de 15 años (17,55) más bajos de la ciudad, seguidos siempre por Providencia (47,56 – 17,94 respectivamente) el IDD General implica que existen 33,19 personas (menos de 15 años y mayores de 60) por cada 100 habitantes potencialmente activos; en tanto el IDD menores de 15 años expresa que hay 17,55 menores de 15 años por cada 100 habitantes potencialmente activos.

Finalmente – a nivel de ciudad – Santiago también concentra el mayor número de personas que conviven con parejas del mismo sexo (4.783), seguidos por Providencia (1.236) y Maipú (1.045).

El stock residencial de la comuna se implementó durante el período intercensal en **74.042** viviendas particulares, ocupando también el primer lugar en crecimiento absoluto del AMS, triplicando a las comunas que le siguen: Maipú (25.505) y Puente Alto (24.096). Este crecimiento consolidó a Santiago como la tercera comuna con más viviendas en la ciudad, con 151.556 viviendas particulares (en el 2002 Santiago estaba en el 5º lugar).

Cabe mencionar que el proceso del levantamiento censal encontró un 10,19% de viviendas desocupadas (15.455), que corresponden en su mayoría a edificaciones dispuestas para arriendo o venta, con uso temporal, o simplemente abandonadas. De ellas, **12.599 (81%)** serían departamentos desocupados, lo que correlaciona con la distribución del tipo de vivienda en la comuna, dado que un 77,34% son de tipo departamentos (117.216) y un 16,67% del tipo casas (25.272). Estos nuevos valores cambian significativamente el panorama del 2002, donde un 56% eran departamentos (45.218) y un 34% eran casas (26.635).

El número de hogares comunales se elevó en Santiago de 72.293 en el 2002, a 134.581 en el 2012, lo que representa un crecimiento del 86% en el período. De ellos un 43,32% tiene jefatura de hogar femenina, siendo superado levemente por Providencia (44,92%), Independencia (45,18%) y Ñuñoa (45,96%).

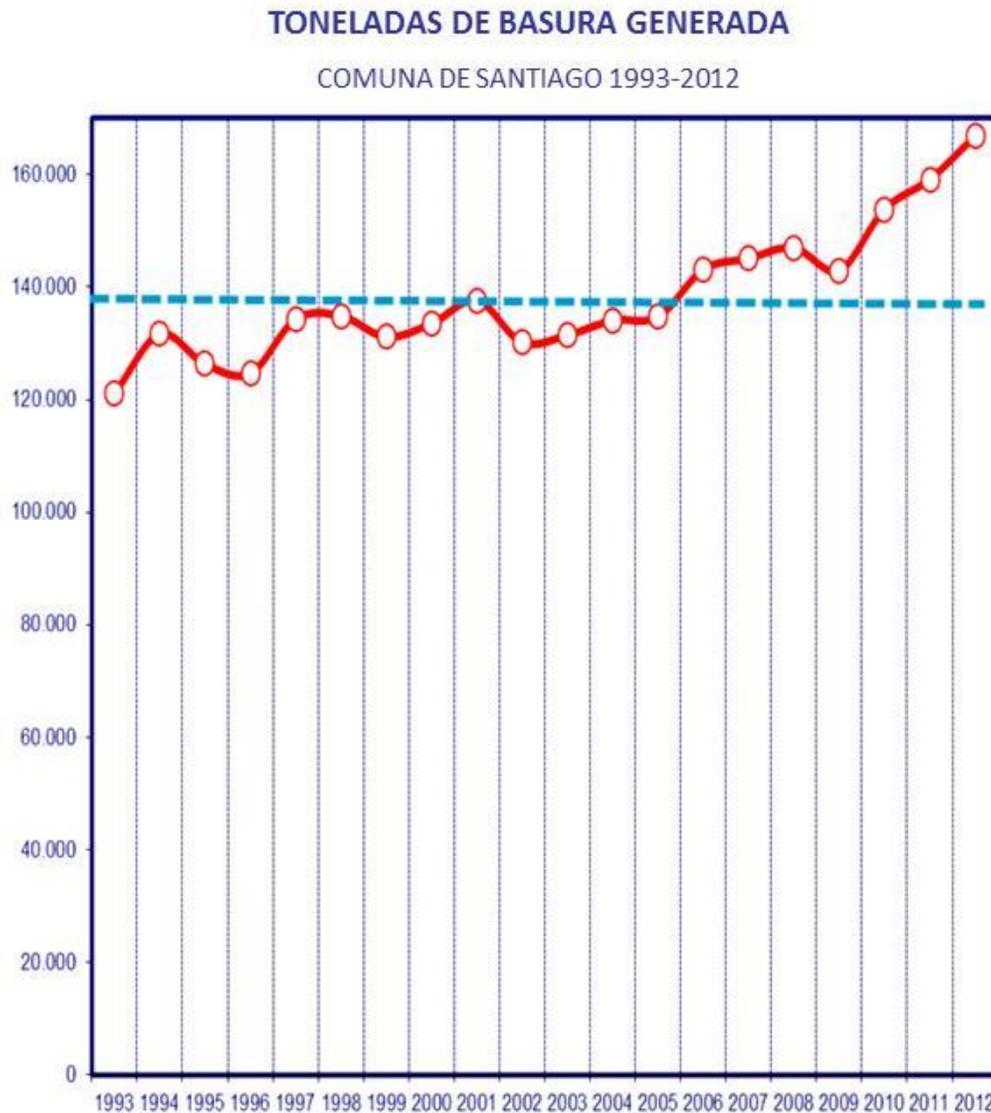
Se destaca al respecto que Santiago tiene el promedio de personas por hogar más bajo de la ciudad (2,2), tanto cuando el jefe de hogar es hombre (2,28%) como cuando es mujer (2,14%). Ellos también explican que Santiago posea el promedio más bajo respecto al número de piezas que usan los hogares exclusivamente como dormitorio, con 1,58 dormitorios exclusivos por hogar. En segundo lugar aparece Providencia (1,9) y luego Independencia con 2,05 piezas por hogar.

Durante los últimos 26 años la comuna de Santiago ha experimentado un notable crecimiento en sus permisos de edificación. El gráfico adjunto muestra la dinámica de los permisos habitacionales respecto de los permisos totales en la comuna de Santiago, identificándose que desde el año 2004 al año 2009 se produce el mayor desarrollo de la actividad inmobiliaria. En el año 2004 el 68% de los permisos de edificación corresponderían a viviendas; en el año 2008 el 87% de los permisos corresponden del mismo modo, al desarrollo habitacional.

## 1.2 EVOLUCIÓN DE LOS RESIDUOS

La comuna produce actualmente casi 167 mil toneladas de basura, con una clara tendencia ascendente. A diferencia de las demás comunas de la capital, que han externalizado el servicio, la comuna de Santiago ocupa sus propios camiones y personal, y controla toda su operación directamente.

Figura 2, Evolución de la Basura Generada en la Comuna de Santiago, 1993 - 2012



Fuente: Bases de Licitación

El consumo de combustible, que evidentemente es una parte elevada del costo del servicio, se ha incrementado en aproximadamente un 50% desde el 2005 a la fecha. Esto se debe en parte a una flota que ha envejecido, lo cual ha llevado a la Municipalidad a iniciar el proceso de reemplazo de la flota, cosa que se materializará durante 2014.

De los 134.581 hogares totales, un 40,9% (55.088) asegura separar la basura para reciclarla, número que encabeza el ranking del AMS seguido por Ñuñoa (45.812) y Las Condes (45.190).

Existen actualmente 44 servicios programados de recolección, cuyas ruta e itinerarios han sido construidos combinando el conocimiento tradicional con modificaciones surgidas de la creciente demanda provocada por el repoblamiento.

### 1.3 EL SERVICIO DE RECOLECCIÓN DE BASURA

El servicio de recolección de basura se presta esquemáticamente de la siguiente forma:

- Los Conductores de camiones recolectores de basura llegan a la subdirección de Mantenimiento y Transporte Municipal (TERMINAL) donde se guardan todos los vehículos municipales (Padre Arellano n°1876).
- El Conductor lleva un camión desde el Terminal hasta una Zona de Aseo, donde se encuentran los cargadores, personal que deberá acompañar al camión en su operación. Los cargadores abordan el camión.
- El chofer conduce el camión haciendo un recorrido preestablecido (RUTA), deteniéndose constantemente para que los cargadores carguen el camión con la basura dispuesta en las calles o contenedores, que vecinos y contribuyente han dejado allí previamente. La basura se encuentra en contenedores en algunos casos, y en simples bolsas (denominado "basuras a granel") en otros.
- Una vez terminado el recorrido del camión, el chofer lo conduce a una Estación de Transferencia (KDM S.A.) una empresa especializada para recibir la basura ubicada fuera de la comuna (Quilicura). Allí descarga.
- El chofer conduce el camión de regreso a la Comuna, ya sea para iniciar un nuevo ciclo de recolección desde el punto en que dejó el servicio (por haberse llenado el camión), o bien para terminar la jornada.

La operación desde el inicio del recorrido hasta el regreso de la comuna desde la estación de Transferencia de KDM S.A., se denomina "expedición". Cada camión, cada chofer y cada cargador, normalmente hará más de una expedición al día. Al finalizar la jornada, el chofer conduce el camión devuelta al Terminal, para ser estacionado, revisado y volver a iniciar otro servicio en otra jornada (turno tarde o noche) con un conductor distinto.

**Por cierto, la descripción anterior es una simplificación del proceso de recolección, pues como se verá en los siguientes dos capítulos, tanto el proceso como la aplicación del mismo poseen una serie de particularidades y restricciones de debieron considerarse en el desarrollo de la Consultoría, a saber:**

- **Aspectos Laborales:** jornadas de trabajo, descansos, tiempos muertos, etc.
- **Aspectos Operacionales:** variabilidad de los tiempos de viaje, restricciones de uso de vías (permanentes y temporales), movimientos prohibidos (permanentes y temporales), consideraciones de seguridad, horarios de recolección, capacidad y holgura de los camiones, etc.
- **Aspectos relacionados con la generación de basura:** estacionalidad, variabilidad, recolección con servicios particular (permanente o específica en determinados día), lugares específicos de carga de camiones, horarios de y disposición de la basura en la calle, etc.

## 2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

### 2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

La Dirección de la Aseo del Municipio (DAO) es la Unidad encargada de prestar los servicios de limpieza de las vías públicas, mediante el barrido de las calles y la recolección de los residuos sólidos domiciliarios en la jurisdicción de la comuna de Santiago. De acuerdo a lo señalado por la Subdirección de Aseo y Limpieza Urbana, ésta no sólo se ocupa de la recolección de residuos sólidos y barrido vial, sino también de la limpieza vertical y acciones del aseo urbano correspondientes a una ciudad capital.

Dicha Dirección tiene a su cargo cuatro (4) Zonas de Aseo, las que se ubican en distintos puntos de la comuna de Santiago y cuyo personal municipal es el encargado de realizar las labores de recolección de residuos sólidos (basuras) y el barrido de las vías públicas, siendo este último también ejecutado por personal contratado a través de empresas contratistas externas.

**Tabla 1, Ubicación de Dirección de Aseo y Zonas**

ZONAS DE ASEO	Ubicación
<b>Dirección de Aseo</b>	Amunátegui N°980, 5° Piso
<b>Zona Oriente</b>	Raúl N°684
<b>Zona Poniente</b>	Santiago N°1390
<b>Zona Centro Oriente</b>	Almirante Barroso N°729
<b>Zona Centro Poniente</b>	Almirante Barroso N°735

Fuente: <http://aseo.munistaq.cl/>, Abril 2014

El objetivo de la Dirección es dar cumplimiento a la Ley Orgánica Constitucional de Municipalidades, respecto de la recolección de basuras, barrido de calles, limpieza y lavado de las vías públicas, limpieza de sumideros y canaletas, instalación y mantención de papeleros y contenedores, retiro de escombros y cachureos, etc., logrando con ello mantener una comuna limpia, segura y con mejor calidad de vida para todos sus habitantes.

**Figura 3, Extracto Ley N° 18.695**

FIJA EL TEXTO REFUNDIDO, COORDINADO Y SISTEMATIZADO DE LA LEY N° 18.695, ORGANICA CONSTITUCIONAL DE MUNICIPALIDADES

Artículo 3°.- Corresponderá a las municipalidades, en el ámbito de su territorio, las siguientes funciones privativas:

f) El aseo y ornato de la comuna.

Artículo 25.- A la unidad encargada de la función de medio ambiente, aseo y ornato corresponderá velar por:

a) El aseo de las vías públicas, parques, plazas, jardines y, en general, de los bienes nacionales de uso público existentes en la comuna;

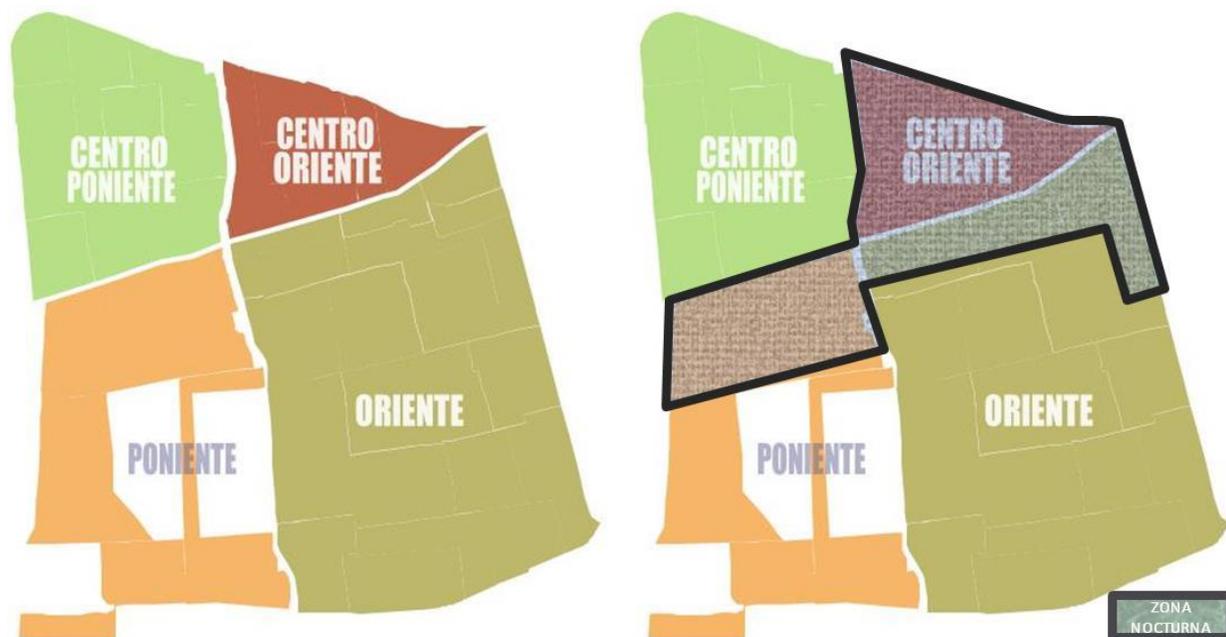
b) El servicio de extracción de basura;

Fuente: <http://www.leychile.cl/>, Abril de 2014

Adicionalmente, dicha Dirección tiene entre sus funciones recepcionar durante los 365 días del año y en forma personalizada, todas aquellas inquietudes y denuncias formuladas por los vecinos y la comunidad en materias de aseo, las que son atendidas y en caso de proceder, y solucionadas dentro de un plazo prudente<sup>2</sup>.

Los Servicios de Aseo y Limpieza de Vías Públicas se encuentran operacionalmente divididos en cuatro zonas territoriales y una funcional, aunque los límites de dichas zonas no necesariamente coinciden con los límites municipales.

Figura 4, Zonas de Aseo y Límites Comunales



#### ZONAS DE ASEO

- Centro Oriente
- Centro Poniente
- Oriente
- Poniente

#### EJES VIALES DIVISORES:

- Sentido N-S:** Autopista Central.  
**Sentido O-P:** Av. del Libertador Bernardo O'Higgins

#### LIMITES COMUNALES:

- Norte:** Avenida Santa María  
**Este:** Avenida Vicuña Mackenna.  
**Oeste:** General Bulnes, Presidente Balmaceda, Matucana, Exposición, Ramón Subercaseaux, San Alfonso.  
**Sur:** Avenida Centenario, Lindero sur del Complejo Judicial y Penitenciario de Santiago, Línea del ex Ferrocarril de Circunvalación

Fuente: "Propuestas de Mejoramiento Servicio de Aseo Comunal", Dirección de Aseo, Abril 2013

Adicionalmente, la Zona Funcional u Operacional correspondiente a la **Zona Nocturna** contiene íntegramente a la zona territorial Centro Oriente y parte de las restantes zonas territoriales. Hasta mediados del 2013, los límites de la zona nocturna, partiendo desde Exposición/Alameda, eran: Exposición (al Sur), Blanco Encalada (al Oriente), Manuel Rodríguez (al Norte), Padre Diego de Rosales (al Oriente), Eleuterio Ramirez (al Oriente), Marín (al Oriente), Portugal (al Sur), 10 de Julio

<sup>2</sup> [http://aseo.munistgo.cl/joo/index.php?option=com\\_content&view=article&id=24&Itemid=1](http://aseo.munistgo.cl/joo/index.php?option=com_content&view=article&id=24&Itemid=1)

(al Oriente), Avenida Vicuña Mackenna (al Norte), Merced (al Poniente), Ismael Valdés Vergara (al Poniente), Balmaceda (al Poniente), Manuel Rodríguez (al Sur) y Alameda (al Poniente). **Cabe consignar que desde mediados de 2013, el límite sur de la Zona Nocturna, partiendo desde Blanco Encalada/Exposición, es: Banco Encalada (al Oriente), Manuel Rodríguez (al Norte), Santa Isabel (al Oriente), Portugal (al Sur) y 10 de Julio (al Oriente).**

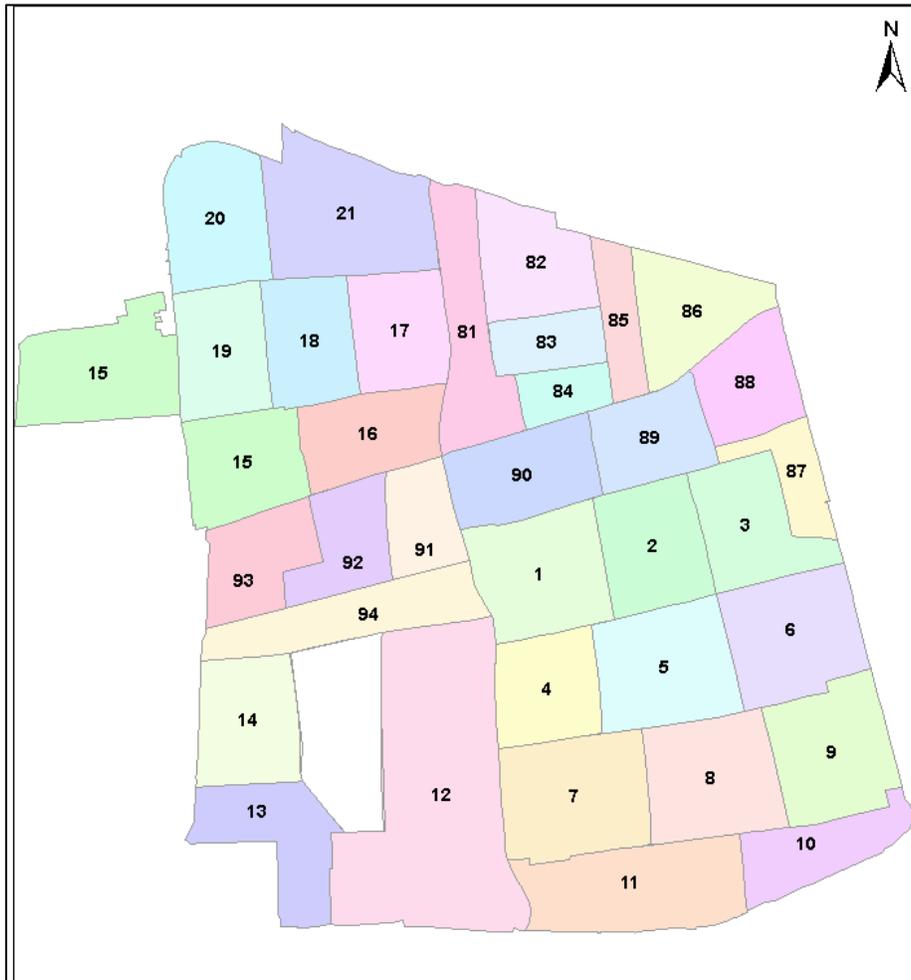
La Figura 6 muestra una síntesis de la organización de los servicios de recolección de basura hasta mediados del año 2013. En ella se observan 21 servicios diurnos (numerados desde el 1 al 21) y 14 servicios nocturnos (numerados desde el 41 al 94). Sin embargo, como parte de la modificación del límite sur de la Zona Nocturna, cambiaron las cantidades y organización de los servicios de recolección, y de acuerdo a lo señalado por la DAO, en la actualidad los sectores o servicios de recolección nocturnos son 17, y el horario de depósito de los residuos en la vía pública es a las 21 horas,.

A nivel de tipo de día y de acuerdo a lo indicado por la propia DAO, el servicio nocturno opera todas las noches de la semana, sin embargo en la actualidad operan solo 8 servicios las noches de sábado y 15 servicios las noches de domingo. Esta implementación ha implicado en la práctica un cambio en los hábitos de generación de residuos de vecinos y contribuyentes que habitan edificios y condominios.

La Zona Centro Oriente de Aseo, no realiza el retiro de residuos sólidos domiciliarios en horario diurno, aunque dispone de dos camiones diariamente para el retiro del producto del barrido y las basuras ocasionales.

Finalmente, los tipos de servicios de aseo y limpieza de espacios públicos, a cargo de la señalada Dirección de Aseo, son los que se señalan a continuación, aunque solo el primero de ellos es materia de la presente Consultoría:

- **Recolección y Disposición Final de Residuos Sólidos Domiciliarios**
- Barrido y Limpieza de Vías Públicas
- Retiro de Escombros y Residuos Voluminosos (programado)
- Lavado de Calles en lugares especiales (Paseos y sectores críticos)
- Aseo de Ferias Libres (externalizado)
- Recolección Diferenciada (Puntos Limpios - Eco Chilectra)

**Figura 5, Delimitación geográfica de los Servicios de recolección hasta mediados de 2013**

Fuente: Reuniones con Jefes de Zonas y "Propuestas de Mejoramiento Servicio de Aseo Comunal", Dirección de Aseo, Abril 2013

## 2.2 NATURALEZA Y ALCANCE DEL PROBLEMA DE RECOLECCIÓN

### 2.2.1 Características del Modelo requeridas por la Municipalidad

Con el objeto de no confundir al lector, corresponde aclarar que los puntos que se describen más abajo corresponden a un listado de las características que se pidieron las Bases de Licitación o Términos de Referencia de la Licitación que dio origen a esta Consultoría. Estos puntos han sido precisados o comentados (en cursiva) por el Consultor, para su mejor entendimiento.

1. La operación es de lunes a domingo. La programación diaria no tiene necesariamente que ser la misma todos los días, pero sí debe repetirse semana a semana.
  - **Solo a modo referencial, la situación actual se caracteriza por:**
    - a. *El servicio diurno opera de lunes a sábado de manera normal.*
    - b. *Los domingos se operan servicios de recolección de residuos, sin embargo ellos se entregan en ejes y/o puntos específicos de la Comuna.*
    - c. *El servicio nocturno opera desde domingo-noche a viernes-noche. De acuerdo a lo señalado por la DAO, el servicio nocturno opera todas las noches de la semana, sin embargo, se encuentra actualmente en ejecución una solución que consiste en reducir la cantidad de servicios, operando 8 la noche de día sábado y 15 servicios los días domingos. Dicha implementación implica en la práctica un cambio en los hábitos de generación de residuos de vecinos y contribuyentes que habitan edificios y condominios.*
    - d. *Los feriados que no sean domingo son tratados como días normales, por lo que la modelación no hará distinción. Los servicios de tarde son solo complementarios a los de la mañana, por lo que la cantidad de servicios (5) es inferior al 20% de los servicios de la tarde (23).*
  - **El énfasis de privilegiar la calidad de servicio, a través de la minimización del tiempo que la basura permanece en la calle sin ser recogida, sumado a las costumbres de los vecinos y contribuyentes de la Comuna, podrá redundar dependiendo de la definición de los horarios de salida de la basura por tipo generador (señalados en el punto 3 siguiente), en la minimización de los servicios de tarde, dejando para dicha jornada solo aquellas rutas que no sea posible cubrir en la mañana.**
2. Existe un solo tipo de basura.
3. La basura se origina por dos actores principales: a) los residentes y empresas, que ponen la basura en la calle, frente a su inmueble, diariamente; b) barredores municipales, que recorren a pie la comuna recogiendo basura del suelo y basureros menores, y que en cierto puntos predefinidos se encuentran con los camiones y los cargan.
4. Respecto de la basura de residentes y empresas:
  - a. La basura está, para efectos de modelación, distribuida en las calles esperando ser recogida.

- **Respecto, a los servicios nocturnos, la aparición de la basura en la calle es consecuencia de las características del generador, no de los servicios, salvo que existan disposiciones legales o reglamentarias que señalen algo distinto.**
- b. La basura es producida por 3 tipos de generadores distintos: simples, complejos y puntuales. El primero representa casas, edificios pequeños, y comercio local, que generan poca basura, una vez al día. El segundo representa comercios que producen basura en elevado volumen dos veces al día. El tercero representa fundamentalmente condominios, que generan elevada cantidad de basura, pero solo una vez al día.
- **El comercio local correspondiente a los generadores simples se podrá tratar de manera especial, considerando su hora de apertura promedio. Se podría incluir en este tratamiento especial a las oficinas, lo cual será acordado previamente con el Mandante.**
  - **Los generadores complejos se caracterizan por el elevado volumen de basura que generan, determinado principalmente mediante la tarifa cobrada por los servicios de aseo, por parte de la I. M. de Santiago.**
- c. Una calle dada puede tener varios tipos distintos de generadores de basura.
- d. Existen pasajes y cités, que deben verse como calles que generan basura como cualquier otra, pero donde el camión no puede entrar. En estos casos el camión espera en la entrada del pasaje o cité, mientras los cargadores van a pie a buscar la basura (alcance). El tiempo de recogida por lo tanto no es igual al de una calle normal. Las horas en que la basura aparece en la calle debe modelarse explícitamente.
- **La necesidad de identificar a los cités en la modelación tiene que ver con el tiempo adicional que demanda la operación en la calle, pues la basura esta menos accesible a los cargadores.**
- e. Para generadores simples y complejos, se asumirá que ella aparece en la calle en horas específicas, a acordar con el Mandante. Para generadores puntuales se asumirá que aparece en la calle una cierta cantidad de minutos antes del paso del camión, acordada con el Mandante.
- **Lo solicitado es que las horarios en que la basura aparece en la calle sean consideradas en la modelación.**
  - **Como fuera señalado anteriormente, el comercio local correspondiente a los generadores simples se tratará de manera especial, considerando específicamente su horario de apertura promedio.**
  - **Como parte de la Etapa de Modelamiento, será necesario acordar los horarios en que la basura aparece en la calle, para los generadores simples y complejos. No obstante, según lo señalado en el punto 4 a), para los servicios nocturnos es necesario revisar la reglamentación vigente. De acuerdo a información provista por el Municipio, el horario de depósito de los residuos en la vía pública para los servicios de recolección nocturna es a las 21 horas, ni antes ni después.**

5. Respecto de la basura de los barredores: Existe un conjunto de puntos predefinidos en que se requiere que haya un camión a una hora determinadas, a efectos de cargar la basura que han recolectado los barredores municipales.
  - **En vista de las aclaraciones hechas por la dirección de aseo, se eliminará este fenómeno de la modelación. es decir, no será necesario que los barredores y camiones se encuentren en puntos y horarios.**
6. La cantidad de basura generada se considerará igual para todos los días de la semana, exceptuando el domingo, para el cual se estimará un valor menor.
  - **Si la basura generada para el servicio diurno se considera igual para todos los días de la semana de lunes a sábado, la dotación requerida en sábado será la misma de un día laboral (o muy similar si se ajustan las rutas), y en consecuencia no será posible aplicar el patrón de libranzas actuales (sábados o domingos alternados).**
7. El tiempo de viaje de cada arco de la red vial depende de la cantidad de basura recogida, la distribución de tipos de generadores presentes, el número de cargadores a bordo, y la congestión vial. En las vías peatonales, sin embargo, no hay congestión vial.
  - **Dado que el número de cargadores es fijo (ver punto 9 siguiente), el tiempo de viaje no depende de ello. Con ello se logra independizar la solución de ruteo, del ausentismo de los cargadores.**
  - **En calles unidireccionales de tres o más pistas útiles, la recolección de los residuos se debe ejecutar (y modelar) pasando dos veces por dichas vías. Esto también podría ser necesario por otras razones (seguridad, flujo, bidireccionalidad).**
8. Hay dos tipos de camiones, grandes y pequeños. El grande puede ser usado en calles normales, pero no es apto para calles peatonales, mientras que el pequeño es apto únicamente para calles peatonales. Ninguno es apto para pasajes y cités.
9. Existen dos tipos de operadores, los choferes y los cargadores. Cada camión debe operar idealmente con 1 chofer y 3 cargadores, pero por ausencia laboral es necesario que una fracción de las expediciones se realice con 1 chofer y 2 operadores.
  - **La ausencia de cargadores se resuelve en la práctica con cargadores de reserva, por lo que no es opción que se recoja con 2 cargadores.**
10. Los operadores se organizan en equipos, los cuales son estables, es decir, una persona dada siempre trabaja junto a las mismas personas.
  - **Lo que se busca en el Escenario 5 (denominado "Libre") es mejorar la productividad de los cargadores, mediante el relevo de camión y chofer en la ruta. Con lo anterior, el escenario 5 combina tríos de cargadores, con conductores y camiones.**
11. Los cargadores pueden subirse o bajarse de un camión (para iniciar o finalizar una expedición) en una Zona de Aseo (Sede). Existen 4 Zonas de Aseo en el sistema en localizaciones conocidas.
  - **Previo al último viaje del servicio a KDM, los cargadores son llevados por el chofer hasta la Sede correspondiente.**

- **No es posible modificar la ubicación de las sedes como parte de la Consultoría.**
12. Los cargadores de cada equipo dado deben utilizar una sola Sede.
  13. La comuna está dividida en 4 grandes zonas, de modo que cada Sede está asociada a una zona particular. Cada equipo puede trabajar en recorridos que atienden exclusivamente una zona.
  14. Cada Sede tiene su propia capacidad para atender cargadores, la cual no puede ser superada en ningún momento.
  15. Cada Sede tiene su propia capacidad para atender camiones simultáneamente, la cual no puede superada en ningún momento.
  16. Cada tipo de camión tiene una capacidad de carga, la cual no puede ser sobrepasada en ningún momento.
    - **La capacidad de carga teórica de los camiones (en volumen) es de 15 metros cúbicos, y el factor de compresión es 4 a 1.**
    - **El Municipio determinó en 7% el factor de holgura y tolerancia, que permita absorber la variabilidad de la generación diaria.**
  17. Todo chofer puede manejar cualquier tipo de camión.
  18. El número de conductores es finito y dado, lo cual representa un límite operacional que no puede superarse en ningún momento.
    - **El número señalado se trata de una cifra máxima para la situación actual, considerando reservas. No obstante, el incremento de la cantidad de camiones (servicios) podría redundar en un incremento de la cantidad de conductores. En efecto, si la optimización arroja que el personal es insuficiente, se debe modificar esta restricción.**
  19. El número de cargadores es finito y dado, lo cual representa un límite operacional que no puede superarse en ningún momento.
    - **El número señalado se trata de una cifra máxima para la situación actual, considerando reservas. No obstante, el incremento de la cantidad de camiones (servicios) podría redundar en un incremento de la cantidad de cargadores, dado que se mantienen los 3 cargadores por camión. En efecto, si la optimización arroja que el personal es insuficiente, se debe modificar esta restricción.**
  20. El número de camiones de cada tipo es finito y dado, lo cual representa un límite operacional que no puede superarse en ningún momento del día.
    - **El número de camiones será de 35, sin embargo se considerará una flota de reserva del 10%.**
  21. El itinerario de cada camión debe comenzar y terminar en el Terminal. Existe un solo Terminal en el sistema en una localización predefinida.

- **Los conductores deben entregar y retirar los camiones desde el Terminal, sin carga de basura.**
22. El total de horas de operación de cada operador no puede exceder un límite dado; 8 horas máximo por día y 44 máximo por semana.
  23. En un período dado (un mes por ejemplo), todos los operadores deber haber trabajado la misma cantidad de horas.
  24. Existe una cantidad de Puntos de Descanso, que son lugares donde los operadores pueden hacer sus necesidades y almorzar. Toda Sede es un Punto de Descanso, pero el inverso no necesariamente es cierto.
    - **Los camiones que no han terminado el servicio, y que deban ir a KDM, retoman la ruta en el lugar en que la abandonaron, independiente que los cargadores en el intertanto hayan realizado labores de acopio de basura.**
  25. La basura recogida por un camión debe ser llevada a la Estación de Transferencia de KDM S.A. ubicada en la comuna de Quilicura. Hay un único Procesador de Basura en el sistema.
  26. El Procesador de Basura tiene un tiempo de atención de cada camión, que debe considerarse en la modelación.
  27. El viaje hacia el Procesador de Basura no puede realizarse con cargadores a bordo quienes por lo tanto deber ser dejados en un Punto de Descanso previamente al viaje.
    - **Si bien la relación con este punto es solo colateral, se propone estimar adecuadamente de tiempo de viaje, hacia y desde la Estación de Transferencia de KDM (incluido el vaciado del camión), con la información histórica disponible, que precise para cualquier momento del día, los tiempos a considerar en la modelación.**
  28. La puerta del Terminal tiene una capacidad de buses por minuto dada, lo cual no puede ser superada en ningún momento.
    - **El objetivo de este punto es que las soluciones de los escenarios consideren la imposibilidad de que los camiones abandonen el Terminal en un mismo momento.**
    - **La capacidad del Terminal no es una cuestión abordable, modificable ni optimizable como parte de esta Consultoría.**
  29. Los camiones deben respetar los sentidos de tránsito de las calles, las señales de no virar, y los límites de velocidad.
  30. Existen calles en que los camiones tienen prohibición de transitar, ya sea en ciertos períodos del día o durante todo el día.
  31. Existe un tiempo muerto entre la entrada del chofer al trabajo en el Terminal y el inicio del itinerario que le corresponde. Este tiempo debe considerarse para efectos de la contabilización de horas totales trabajadas.

32. Existe un tiempo muerto entre el fin del itinerario de un camión, que llega de vuelta al Terminal, y el momento en que el chofer está listo para abandonar el recinto. Este tiempo debe considerarse para efectos de la contabilización de horas totales trabajadas.
33. Existe un tiempo muerto entre la entrada al trabajo de un cargador en una Sede, y el momento en que es recogido por el camión para iniciar su trabajo. Este tiempo debe considerarse para efectos de la contabilización de horas totales trabajadas.
34. Existe un tiempo muerto entre el retorno de un cargador a una Sede, y el momento en que esa persona está lista para abandonar el recinto, finalizando su trabajo diario. Este tiempo debe considerarse para efectos de la contabilización de horas totales trabajadas.
35. La operación consume combustible, que se asumirá proporcional al kilometraje recorrido por los camiones, o proporcional al tiempo de operación, según criterio del consultor.
  - **La carga de combustible es realizada en el Terminal, por una persona especialmente designada para ello, y la autonomía de los camiones es suficiente para toda la operación durante el turno del chofer.**
  - **La carga de combustible se realiza antes del despacho matutino de los camiones, y al regreso del servicio diurno, para que los servicios de tarde y nocturnos encuentren los camiones cargados de combustible.**
  - **Son los conductores de los servicios diurnos quienes posicionan los camiones en la zona de expendio de combustible, para luego retirarlos de ella.**
36. Las calles deben ser visitadas por defecto cada 48 horas como mínimo, pero algunas requieren una frecuencia de cada 24 horas mínimo. En un día cualquiera, una fracción de la flota no está disponible, ya sea por fallas mecánicas o por mantenciones programadas.
37. Existe un nivel de ausentismo laboral entre los operadores, que hace que el total de personal no esté disponible siempre.
  - **Como fuera señalado en punto 9, la ausencia de cargadores se resuelve, tanto en la práctica como en la modelación, con cargadores de reserva.**
38. Cada operador debe tener un día a la semana libre.
  - **En la actualidad el día de la semana libre corresponde a sábado o domingo, trabajando en cada uno de ellos solo la mitad de la dotación de conductores y cargadores.**
  - **Con las restricciones y consideraciones del modelo, lo anterior no es posible. La solución sería distribuir la totalidad de las rutas entre sábado y domingo, de acuerdo a algún criterio por definir con el Municipio.**
39. Cada equipo debe tener una hora de almuerzo durante la jornada, que debe realizarse en una Sede.
  - **Este punto es sustituido por el punto 40, siguiente.**

40. Cada equipo debe tener una hora de almuerzo durante la jornada, que debe realizarse en un Punto de Descanso. La hora de almuerzo no podrá iniciarse antes de las 12:00 hrs. ni después de las 16:00.
41. Un equipo no puede trabajar más de 3 horas seguidas sin detenerse en un Punto de Descanso. La detención tiene una duración de 20 minutos.

Deberá tenerse en cuenta que:

- Un itinerario puede iniciarse un día y terminar en la madrugada del siguiente. **La clasificación de servicios diurnos y nocturnos es una característica de la operación actual, la cual no debe arrastrarse a la modelación, es decir, no debe imponerse como restricción, aunque podría ser resultado de la modelación.**
- Los camiones pueden transitar por autopistas concesionadas (en su trayecto al Procesador de Basura). **Se entiende que esto es posible también en los trayectos de regreso desde el Procesador de Basura.**
- A efectos de maximizar la probabilidad de cumplir los itinerarios ante variaciones en la congestión vial, los tiempos de viaje en los arcos deben asumirse menores que el promedio, en una magnitud a acordar entre el Mandante y el consultor. **La intención del mandante fue que los tiempos de viaje en los arcos sean mayores que el promedio.**

**Respecto al Punto 3.5.5 de las Bases Técnicas, es necesario precisar que el modelo puede ser usado para “calibrar” la situación actual, pero desde la perspectiva de la información y datos que contenga (tiempos de viaje, carga, etc.), más no de corridas del modelo de optimización.**

## 2.2.2 Análisis Legal Jornada Laboral de Funcionarios Municipales

Analizada la Ley N° 18.883. que Aprueba el Estatuto Administrativo para Funcionarios Municipales. se rescatan los Artículos entre el 62 y el 68:

### PARRAFO 2.º DE LA JORNADA DE TRABAJO

**Artículo 62.-** La jornada ordinaria de trabajo de los funcionarios será de cuarenta y cuatro horas semanales distribuidas de lunes a viernes. no pudiendo exceder de nueve horas diarias.

El alcalde podrá proveer cargos de la planta a jornada parcial de trabajo. cuando ello sea necesario por razones de buen servicio. En estos casos los funcionarios tendrán una remuneración proporcional al tiempo trabajado y de manera alguna podrán desempeñar trabajos extraordinarios remunerados.

Los funcionarios deberán desempeñar su cargo en forma permanente durante la jornada ordinaria de trabajo.

**Artículo 63.-** El alcalde podrá ordenar trabajos extraordinarios a continuación de la jornada ordinaria. de noche o en días sábados. domingos y festivos. cuando hayan de cumplirse tareas impostergables.

Los trabajos extraordinarios se compensarán con descanso complementario. Si ello no fuere posible por razones de buen servicio. aquéllos serán compensados con un recargo en las remuneraciones.

**Artículo 64.-** Se entenderá por trabajo nocturno el que se realiza entre las veintiuna horas de un día y las siete horas del día siguiente.

**Artículo 65.-** El descanso complementario destinado a compensar los trabajos extraordinarios realizados a continuación de la jornada, serán igual al tiempo trabajado más un aumento de veinticinco por ciento.

En el evento que lo anterior no fuere posible, la asignación que corresponda se determinará recargando en un veinticinco por ciento el valor de la hora diaria de trabajo. Para estos efectos, el valor de la hora diaria de trabajo ordinario será el cociente que se obtenga de dividir por ciento noventa el sueldo y las demás asignaciones que determine la ley.

**Artículo 66.-** Los empleados que deban realizar trabajos nocturnos o en días sábado, domingo y festivos deberán ser compensados con un descanso complementario igual al tiempo trabajado más un aumento de cincuenta por ciento. En caso de que el número de empleados de una municipalidad o unidad de la misma, impida dar el descanso complementario a que tienen derecho los funcionarios que hubieren realizado trabajos en días sábado, domingo y festivos u horas nocturnas, se les abonará un recargo del cincuenta por ciento sobre la hora ordinaria de trabajo calculada conforme al artículo anterior.

**Artículo 67.-** El alcalde ordenará los turnos pertinentes entre su personal y fijará los descansos complementarios que correspondan.

**Artículo 68.-** Los funcionarios no estarán obligados a trabajar las tardes de los días 17 de septiembre y 24 y 31 de diciembre de cada año, sin perjuicio de lo dispuesto en el artículo 63.

Para los temas que no se mencionan en los artículos señalados, como por ejemplo mínimo descanso o días seguidos de trabajo, no se menciona que se rijan por el código del trabajo, por lo que el Consultor levantó con el Municipio una serie de consultas y precisiones sobre las disposiciones que regulan las actividades de los funcionarios municipales:

### **HORARIO DE DESCANSO (COLACIÓN) DE CARGADORES – FUNCIONARIOS MUNICIPALES DURANTE LA JORNADA LABORAL DIURNA**

La ley N° 18.883 no hace referencia al horario de colación. En esta materia se aplica lo señalado en el Decreto N° 1.897 de 1995 del Ministerio del Interior, que estableció la jornada única para los servicios públicos de determinadas ciudades, entre ellas la de Santiago, indicando una suspensión de actividades de 30 minutos para la colación de los funcionarios (similar a lo establecido en el artículo 34 del Código del Trabajo). En todo caso, dicha suspensión de actividades no es imputable a la jornada laboral máxima de 44 horas semanales, y se puede extender hasta 15 minutos, debiendo agregarse estos minutos a la jornada laboral ordinaria.

Por lo tanto, el horario en que debe efectuarse la suspensión de actividades para la colación es una cuestión de mérito y prudencia; que debe ser determinado teniendo presente la buena marcha de los servicios, y la costumbre y necesidad de alimentarse de los funcionarios.

## **HORARIO DE DESCANSO (COLACIÓN) DE CARGADORES – FUNCIONARIOS MUNICIPALES DURANTE LA JORNADA LABORAL NOCTURNA**

Se aplica la misma respuesta anterior, con la salvedad de que la suspensión puede aplicarse no necesariamente a la mitad de la jornada, lo cual debe ser determinada por las unidades municipales respectivas. Determinada ésta, se debe aplicar igual para todos los funcionarios o funcionarias que desarrollan turnos de noche en los servicios de aseo.

## **DISPOSICIONES ESPECIALES RELATIVAS A TRABAJOS PESADOS**

La calificación de trabajo pesado es determinada por la Comisión Ergonómica Nacional (CEN), creada por la ley 19.404, del 21 de Agosto de 1995, es la encargada de la calificación de una labor considerada pesada, para la rebaja de edad legal para pensionarse por vejez.

## **DISPOSICIONES LABORALES ESPECIALES DE PERSONAL QUE REALIZA SUS FUNCIONES DE PIE O CAMINANDO**

No existen disposiciones laborales especiales. salvo recibir de parte del empleador ropas adecuadas para realizar sus labores: zapatos. ropas o uniformes. guantes.

## **TRABAJO EN JORNADA DIURNA Y NOCTURNA**

Los trabajadores (conductores y cargadores) podrían desempeñar sus jornadas de trabajo en turnos que impliquen laborar algunas horas de día y otras de noche en el mismo turno, pero la jornada laboral no puede exceder el máximo legal, es decir 44 horas semanales, y deben ser turnos con horarios razonables, que permitan la recuperación de los trabajadores. En todo caso para los funcionarios municipales el horario nocturno es desde las 21:00 hasta las 07:00 del día siguiente.

### **• DÍA DE DESCANSO SEMANAL**

En materia laboral, la regla general es que los días domingos y aquellos que la ley declare festivos serán de descanso, salvo las actividades autorizadas por ley para trabajar en esos días. Entre las excepciones legales establecidas en el artículo 38 N° 2 del Código del Trabajo, se dispone: *“los servicios que exijan continuidad por la naturaleza de sus procesos, por razones de carácter técnico, por las necesidades que satisfacen o para evitar notables perjuicios al interés público”*, entre los que se encuentra el servicio de recolección de residuos sólidos.

En este caso la jornada normal de trabajo podrá ser distribuida en días domingos y festivos, y sólo las horas más allá de la jornada laboral semanal serán pagadas como hora extraordinarias. En compensación al trabajo en días domingos y festivos se deberá otorgar un día de descanso a la semana por cada día domingo y otro por los festivos.

En todo caso, en esta clase de servicio, al menos dos de los días descanso en el respectivo mes calendario, deberán ser domingos.

## 2.3 VISITAS A TERRENO Y REUNIONES

### 2.3.1 Visita Terminal

En la visita al Terminal realizada el 29 de Abril de 2014, guiada por el Jefe Despachador del turno mañana, señor Miguel Prado, y en la reunión sostenida con el Jefe de Terminal, señor Francisco Martínez, se abordaron los siguientes tópicos generales:

1. Dependencia de los conductores del Área de Mantenimiento.
2. Asignación de camiones y rutas a los conductores.
3. Carga de combustible antes de salir a operar y al regreso del turno de mañana.
4. Viajes a la Estación de Transferencia de KDM.
5. Excepcionalidad de los servicios que no terminan en el vertedero, sino en el terminal y salen desde éste con un nuevo chofer en dirección a la Estación de Transferencia.
6. Distribución, extensión y desbalance de servicios por turno.

Por las características del lugar y de las personas entrevistadas, la visita y las conversaciones fueron muy ilustrativas respecto al contexto en el cual se entrega hoy el servicio de recolección de basura.

### 2.3.2 Visita Sede Zona Oriente

En la visita a la sede de la Zona Oriente realizada el 29 de Abril de 2014, el Consultor se entrevistó (en formato asamblea) con las jefaturas de Sede y la totalidad de los inspectores, abordando o recogiendo los siguientes aspectos:

1. El servicio nocturno de esta zona se realiza en el límite de Santa Isabel. (los inspectores recomiendan que este límite sea Matta).
2. A pesar del aumento de edificios en la zona, a juicio de los inspectores no ha aumentado el número de servicios: 10 servicios diurnos, 2 servicios tarde y 1 servicio nocturno.
3. El sector de Franklin es visitado 2 veces en el día, en la mañana y otras después de las 18:00 horas, al cierre de la hora comercial.
4. Los días lunes los servicios diurnos terminan pasado las 18:00 horas.
5. Los inspectores manifiestan que sería ideal tener 1 ruta al día por cada camión.
6. Existe una cantidad de basura oculta (a ojos de los inspectores), que se debería considerar al momento de la modelación.
7. La Zona Oriente se caracteriza por ser mixta (comercio, residencial y condominio).
8. La basura de los locales comerciales es dejada después de las 10:00 AM (horario de apertura de estos) y al cierre del comercio, después de las 20:00 horas.
9. Los actuales horarios de inicio de jornada de los cargadores son: 6:30 horas; 14:30 horas y 20:30 horas.
10. Los domingos en la tarde solo se visita el sector de Franklin.
11. Se entrega al conductor siempre el mismo recorrido, aunque ese día exista feria (se modifica solo la calle por donde no puede circular) y el servicio de recolección lo realice una empresa contratista de Ferias Libres.
12. Existe en la zona un plan piloto de contenedores en las esquinas que ha mejorado los tiempos de viaje.
13. Se informa a los vecinos de los horarios tentativos de paso de la basura.

La visita a la Sede Oriente pudo haber sido más provechosa si el Consultor hubiera tenido un mayor conocimiento del servicio de recolección, por lo que se decidió postergar las visitas al resto de las sedes y a KDM, de modo que sirvan no solo para entender la problemática, sino además para obtener información valiosa en la modelación del problema a resolver como parte de esta Consultoría.

### 2.3.3 Reuniones con las Zonas

A continuación se describen los principales aspectos levantados en las reuniones con los jefes o líderes de las Zonas. Sin embargo, es necesario advertir que no todas las particularidades conversadas, levantadas o solicitadas en las reuniones y en terreno fueron incluidas en la modelación, pues algunas de ellas contravenían el espíritu, objetivo o texto de las Bases de Licitación, y otras no estaban dentro del ámbito o alcance de la Asesoría.

#### 2.3.3.1 Reunión con Zona Centro Poniente

La reunión con la Zona Centro Poniente se realizó en dependencias de la Municipalidad el martes 17 de Junio y el resumen de los aspectos tratados fue remitido vía correo electrónico el lunes 23 de Junio.

No se recibieron observaciones, comentarios o complementos por parte de la Zona a la información remitida, sin embargo, las dudas o temas pendientes del Consultor fueron resueltas posteriormente en reunión efectuada el 21 de Agosto del 2014, también en dependencias del Municipio.

#### EN MATERIA DE LÍMITES:

- Se confirmó la totalidad de los límites de la Zona, y su operación en la vereda interna, identificando los siguientes casos particulares:
  - En la calle Santo Domingo, entre Walker Martinez y Matucana es habitual que los vecinos de Quinta Normal arrojen basura a la vereda oriente (esta basura ya se encuentra incorporada en los registros de KDM).
  - El límite norte de la zona corresponde a la ribera del Río Mapocho, aunque el aseo de ella es esporádico y responde a necesidades específicas.
  - El eje Alameda es parte de la Zona, pero es atendido por la Zona Nocturna, en ambas veredas y sus respectivos generadores.

#### EN MATERIA DE USO DE VÍAS:

- Se revisó cada una de las calles en las que en teoría se podía circular, pero no se tenían registros de GPS, confirmando o no el ingreso de camiones, e indicando cuándo y por dónde se opera en la modalidad de alcance (barredores ingresan a sacar la basura)
- Se identificaron las vías o tramo de vías por las cuales es necesario circular dos veces (una vez por calzada).
- Se generó y remitió Excel con el detalle de las calles de la Zona Nocturna, indicando:
  - **USO:** Vial, Pasaje o Cité, Peatonal
  - **DEBE PASAR 2 VECES:** SI, cuando ello es necesario, identificando el tramo (DESDE, HASTA).
  - **CAMIÓN:** SI o NO, circulan camiones recolectores.

- **ALCANCE:** Si o NO en las calles donde los camiones NO circulan.  
Es posible que algunas calles se repitan cuando tienen tramos de distinto **USO**.

**EN MATERIA DE GENERADORES:**

- La basura del INBA (instituto Nacional Barros Arana) es retirada por calle San Pablo e ingresando al recinto, de lunes a viernes, por los servicios de recolección en la jornada de la tarde, y su volumen aproximado es de 800 litros diarios.
- Tanto la Escuela Salvador Sanfuentes como el Liceo Polivalente A28 Emilia Toro generan diariamente del orden de 700 litros de basura cada uno.
- Las instalaciones y dependencias de la Armada generan entre 500 y 800 litros diarios.
- En la actualidad, el servicio de recolección en la Quinta Normal utilizan solo la vialidad externa a ella.
- La basura generada por las oficinas de Falabella es retirada desde el interior del recinto, de lunes a viernes a las 7am, y su volumen fluctúa entre los 1.000 y 1.300 litros diarios, aunque su volumen se extraerá de los derechos de aseo (base+adicionales) que paga el rol respectivo.
- No se retira la basura del Hospital San Juan de Dios.
- La basura del Centro de Diagnóstico y Terapéutico es retirada de lunes a viernes por el servicio del Municipio, y su volumen es de 240 litros diarios aproximadamente.
- No se retira la basura del Parque de los Reyes ni de las instalaciones al interior del señalado parque.
- No se retira la basura del Laboratorio Du Randin (Manuel Rodríguez entre Mapocho y General Mackenna).

**OTROS, PLANTEADOS POR LA ZONA CENTRO PONIENTE o CONSULTADOS POR EL CONSULTOR:**

- En la actualidad la calle Cumming es atendida dos veces al día, con una recolección temprana (7am) y otra después de las 10 am.
- En la actualidad la calle San Pablo es atendida dos veces al día, con una recolección entre las 8:30 y 9:00, y otra después a las 12:30.
- Debido a la gran cantidad de basura, la calle Chacabuco también debería atenderse dos veces, desde Alameda hasta Agustinas.
- El barrio Concha y Toro es atendido tres veces durante el día, y posee un punto de acopio en Maturana con Romero.
- Es habitual que en algunos servicios el camión no se llene para ser enviado a KDM.
- El plan piloto de contenedores está circunscrito al cuadrante determinado por las calles Matucana – San Pablo – Sotomayor – Agustinas, es decir, abarca el sector del servicio 19 y la primera cuadra poniente del sector del servicio 18.

**2.3.3.2 Reunión con Zona Poniente**

La reunión con la Zona Poniente se realizó en dependencias de la Municipalidad el miércoles 11 de Junio y el resumen de los aspectos tratados fue remitido vía correo electrónico el viernes 13 de Junio.

No se recibieron observaciones, comentarios o complementos por parte de la Zona a la información remitida, sin embargo, las dudas o temas pendientes del Consultor fueron resueltas posteriormente en consultas telefónicas y en reunión efectuada el 27 de Agosto del 2014, también en dependencias del Municipio.

**EN MATERIA DE LÍMITES:**

- Se confirmó la totalidad de los límites de la Zona, identificando los siguientes casos particulares:
  - El eje Alameda es parte de la Zona, pero es atendido por la Zona Nocturna, en ambas veredas y sus respectivos generadores.
  - La operación nocturna en la Zona se desarrolla en el cuadrante definido por la calles Exposición – Alameda – Manuel Rodríguez – Blanco Encalada (Arica), abarcando ambas veredas de los ejes señalados.
  - En la calle Exposición es habitual que los vecinos de Estación Central arrojen basura a la vereda oriente (esta basura ya se encuentra incorporada en los registros de KDM).
  - El límite sur de la zona corresponde al eje Centenario, sin embargo por el eje Carlos Valdovinos se atiende a Emergencias de la I.M. de Santiago y antes (esporádicamente) al Club de Rodeo Gil Letelier.

**EN MATERIA DE USO DE VÍAS:**

- Se revisó cada una de las calles en las que en teoría se podía circular, pero no se tenían registros de GPS, confirmando o no el ingreso de camiones, e indicando cuándo y por dónde se opera en la modalidad de alcance (barredores ingresan a sacar la basura)
- Se identificaron las vías o tramo de vías por las cuales es necesario circular dos veces (una vez por calzada).
- Se generó y remitió Excel con el detalle de las calles de la Zona Nocturna, indicando:
  - **USO:** Vial, Pasaje o Cité, Peatonal
  - **DEBE PASAR 2 VECES:** SI, cuando ello es necesario, identificando el tramo (DESDE, HASTA).
  - **CAMIÓN:** SI o NO, circulan camiones recolectores.
  - **ALCANCE:** Si o NO en las calles donde los camiones NO circulan.Es posible que algunas calles se repitan cuando tienen tramos de distinto **USO**.

**EN MATERIA DE GENERADORES:**

- Salvo la basura de la arrocera Tucapel, la totalidad de los residuos domiciliarios del cuadrante Exposición – Lincoln – Conferencia – Fray Luis de la Peña (ambas veredas excepto en Exposición) es recogida por un servicio especial contratado por el Municipio con una empresa externa.
- La basura recogida desde la Universidad Bernardo O’Higgins se recolectada desde el interior del Parque O’Higgins.
- La basura de los arsenales de guerra es recogida desde su interior, accediendo a sus estacionamientos desde Av. El Parque, para luego a la salida conectar con eje Tupper.
- El servicio de recolección en el Parque O’Higgins atiende al Jardín Infantil, Universidad Bernardo O’Higgins, Teatro La Cúpula, Piscina Municipal, Centro Gastronómico El Pueblito, Instalaciones del Ejército, Club de Tenis, Patinódromo, etc.
- La basura de la arrocera Tucapel es retirada de lunes a viernes por el servicio del Municipio, y su volumen está dado por los derechos de aseo adicionales que paga.
- No se retira la basura del Movistar Arena ni de Fantasilandia.
- No se retira la basura de la Penitenciaría, ni de los Tribunales de Justicia.

Figura 6, Acceso y Egreso Arsenales de Guerra



Fuente: Elaboración propia sobre Google Street View, Agosto 2014 **OTROS, PLANTEADOS POR LA ZONA PONIENTE o CONSULTADOS POR EL CONSULTOR:**

- Tanto la salida como el acceso al Parque O'Higgins se realiza desde calle General Rondizzoni.

### 2.3.3.3 Reunión con Zona Oriente

Las reuniones con la Zona Oriente se realizaron tanto en la Sede, en terreno, como dependencias de la Municipalidad, en diversas fecha y apuntando a diversos objetivos.

#### EN MATERIA DE LÍMITES:

- Se confirmó la totalidad de los límites de la Zona, y su operación en la vereda interna, identificando los siguientes casos particulares:
  - En los días tipo Sábado, Domingo y Festivos, el servicio 10 que atiende el barrio Franklin se ajusta al cuadrante Nataniel – Placer – Matte – Gana.

#### EN MATERIA DE USO DE VÍAS:

- Se revisó cada una de las calles en las que en teoría se podía circular, pero no se tenían registros de GPS, confirmando o no el ingreso de camiones, e indicando cuándo y por dónde se opera en la modalidad de alcance (barredores ingresan a sacar la basura)
- Se identificaron las vías o tramo de vías por las cuales es necesario circular dos veces (una vez por calzada).
- Se generó Excel con el detalle de las calles de la Zona Nocturna, indicando:
  - **USO:** Vial, Pasaje o Cité, Peatonal
  - **DEBE PASAR 2 VECES:** SI, cuando ello es necesario, identificando el tramo (DESDE, HASTA).
  - **CAMIÓN:** SI o NO, circulan camiones recolectores.
  - **ALCANCE:** Si o NO en las calles donde los camiones NO circulan.

Es posible que algunas calles se repitan cuando tienen tramos de distinto **USO**.

**EN MATERIA DE GENERADORES:**

- No se retira la basura de las cocinerías del sector de Franklin.
- No se retira la basura del Hospital Clínico IST de Santiago.

**OTROS, PLANTEADOS POR LA ZONA CENTRO PONIENTE o CONSULTADOS POR EL CONSULTOR:**

- El plan piloto de contenedores está circunscrito al cuadrante determinado por las calles Carmen – Av. Matta Sur – Vicuña Mackenna – Ñuble.
- El servicio de repaso del Barrio Franklin también retira basura de la Posta Central, aproximadamente 3.000 litros/día, los 7 días de la semana
- Los ejes que se repasan durante la tarde son; 10 de Julio Huamachuco, Copiapó, Vicuña Mackenna, Lord Cochrane, San Francisco, San Diego y Arturo Prat.

**2.3.3.4 Reunión con Zona Nocturna**

La reunión con la Zona Nocturna se realizó en dependencias de la Municipalidad el jueves 19 de Junio y el resumen de los aspectos tratados fue remitido vía correo electrónico el lunes 23 de Junio.

No se recibieron observaciones, comentarios o complementos por parte de la Zona a la información remitida, sin embargo, las dudas o temas pendientes del Consultor fueron resueltas posteriormente en consultas vía correo electrónico y en visita a terreno efectuada el 25 de Agosto del 2014.

**EN MATERIA DE LÍMITES:**

- Se confirmó la totalidad de los límites de la Zona, identificando los siguientes casos particulares:
  - En la calle Exposición es habitual que los vecinos de Estación Central arrojen basura a la vereda oriente (esta basura ya se encuentra incorporada en los registros de KDM).
  - El límite norte de la zona nocturna es el eje Balmaceda – Ismael Valdez Vergara, por lo que el área de la comuna al norte del eje señalado, es atendida por la zona Centro-Oriente.
  - En el eje Alameda, incluso en el tramo desde Manuel Rodríguez – Matucana, la zona nocturna atiende ambas veredas.

**EN MATERIA DE USO DE VÍAS:**

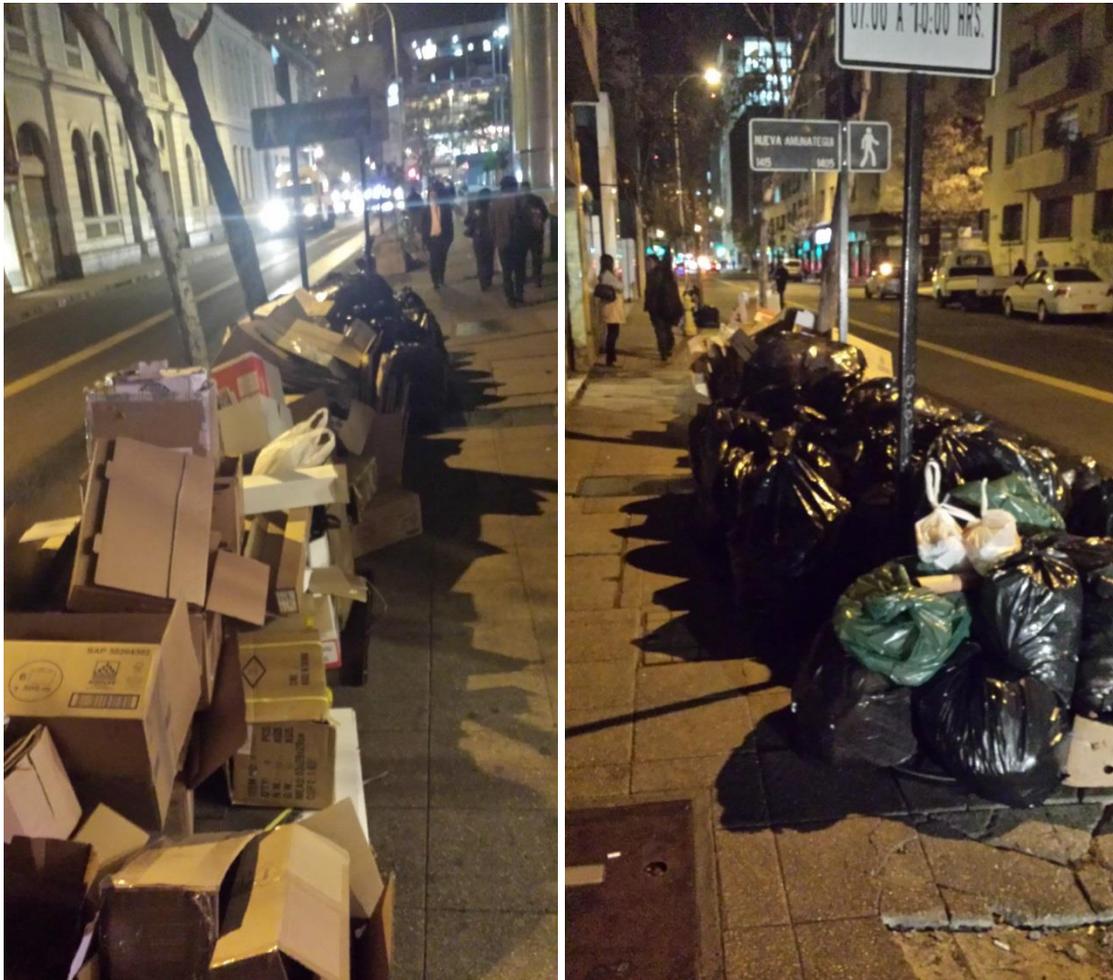
- Se revisó cada una de las calles en las que en teoría se podía circular, pero no se tenían registros de GPS, confirmando o no el ingreso de camiones, e indicando cuándo y por dónde se opera en la modalidad de alcance (barredores ingresan a sacar la basura)
  - Se identificaron las vías o tramo de vías por las cuales es necesario circular dos veces (una vez por calzada).
  - Se confirmó la Recolección de basura y el ingreso a los paseos Peatonales después de las 21:00: Ahumada, Puente, Estado, Huérfanos, 21 de Mayo, Almirante Lorenzo Gotuzzo, Valentín Letelier, Plaza De Armas, Mensia De Los Nidos, Campbell (un tramo), Enrique Meiggs y Gardland.

- Se generó y remitió Excel con el detalle de las calles de la Zona Nocturna, indicando:
  - **USO:** Vial, Pasaje o Cité, Peatonal
  - **DEBE PASAR 2 VECES:** SI, cuando ello es necesario, identificando el tramo (DESDE, HASTA).
  - **CAMIÓN:** SI o NO, circulan camiones recolectores.
  - **ALCANCE:** SI o NO en las calles donde los camiones NO circulan.
 Es posible que algunas calles se repitan cuando tienen tramos de distinto **USO**.

#### EN MATERIA DE GENERADORES:

- La basura de la Torre Entel, equivalente a 5 contenedores de 770 Litros (3.850 Lts), en la actualidad es retirada en dos tandas, una a las 21 horas y otra a las 22 horas.

Figura 7, Residuos Torre Entel



Fuente: Visita a terreno, Agosto 2014

- La basura hospitalaria de la Posta Central es retirada por un servicio específico, sin embargo la basura normal es retirada por el Municipio. Se estima que dos veces al día se retiran aproximadamente 10 contenedores de 770 litros junto a 3 contenedores de 240 litros.

- El Mall del Centro genera aproximadamente 25 contenedores de 770 Lts. y otros 15 de 240 Lts., (22.850 litros).

**Figura 8, Residuos Mall del Centro**



**Fuente: Visita a terreno, Agosto 2014**

- Aguas Andinas es también otro generador importante, al cual se le retira desde calle Teatinos. El volumen de residuos que se genera en Aguas Andinas es aproximadamente de 3 contenedores de 770 Litros, esto es, 2.310 Litros.

**Figura 9, Residuos Aguas Andinas**

Fuente: Visita a terreno, Agosto 2014

**OTROS, PLANTEADOS POR LA ZONA NOCTURNA o CONSULTADOS POR EL CONSULTOR:**

- El horario de retiro de la basura en el Barrio Lastarria coincide con una gran actividad turística y gastronómica, por lo que se sugiere postergarlo hasta entrada la noche.
- Según Ordenanza Municipal, en la Zona Nocturna los vecinos deben sacar la basura a la calle desde las 21:00 horas.
- Consultado sobre el inicio de la operación nocturna, no se identifican problemas con los cargadores si ella comienza más temprano o más tarde.
- La Operación nocturna se realiza con 19 camiones.

- La cantidad de servicios o sectores nocturnos es 17, y no 13 como se señala en la presentación del Municipio y en el Informe de Avance, debido a:
  - En la Zona Poniente son 4 los servicios.
  - En la zona oriente se añadieron los sectores 91N y 92N respecto al 2013, con motivo de las obras de la Línea 3 de Metro.
  - Existe un servicio específico para los paseos peatonales
- A juicio de la Zona Nocturna, los sectores 91N y 92N deberían volver a la operación diurna (Zona Oriente), debido a los reclamos que sigue provocando el ruido nocturno en esa área eminentemente residencial.
- El servicio 96N, del cuadrante 13, limitado por Alameda-Toesca-Molina-Exposición requiere un tratamiento especial debido a que no posee contenedores y los tiempos de operación se incrementan notablemente producto de la basura a granel generada en este sector comercial.
- En el diseño de rutas se deberían considerar cabalmente los edificios que se están entregando o con fecha de entrega próxima.
- Recientemente y con motivo de ajustes de operación-dotación de en fin de semana (retiro solo contenedores y domiciliario), en domingo (de domingo a lunes) se operan dos servicios menos, en circunstancia de que producto de la basura acumulada, deberían operarse todos ellos.
- Los generadores de La Moneda (Morandé 130) y Carabineros de Chile (Agustinas 1550, Sto. Domingo 714) no son atendidos por el servicio nocturno, sino por la Zona Centro Oriente.

### **2.3.3.5 Reunión con Zona Centro Oriente**

No se gestionaron ni materializaron reuniones con la Zona Centro Oriente, pues ella no realiza retiro de residuos sólidos domiciliarios en horario diurno, y se encuentra completamente contenida en la zona operacional Nocturna, aunque dispone diariamente de dos camiones para el retiro de la basura producto del barrido y de la basura ocasional<sup>3</sup>, pero ello se escapa del alcance de la presente asesoría.

---

<sup>3</sup> [http://aseo.munistgo.cl/joo/index.php?option=com\\_content&view=article&id=19&Itemid=34](http://aseo.munistgo.cl/joo/index.php?option=com_content&view=article&id=19&Itemid=34)

## 2.4 REVISIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

### 2.4.1 Exploración y Revisión Bibliográfica

La revisión bibliográfica realizada por parte el Consultor, tanto en la etapa inicial de la consultoría como en la formulación del problema, es posible agruparla de la siguiente manera:

- **Artículos identificados en la Propuesta Técnica**
- **Artículos de Recolección de Residuos**
- **Artículos/Estudios de residuos para Santiago**
- **Artículos Implementación de Algoritmos VRP - CARP<sup>[1]</sup>**
- **Artículos Scheduling (Planificación de acciones que requieren el uso de recursos)**

Específicamente, los artículos revisados por tipo fueron:

#### 1. Artículos identificados en la Propuesta Técnica:

- a. C. Vásquez (2012). *Planificación y Optimización de Flotas de Vehículos para la Recogida de Residuos Urbanos*. Universidad Complutense de Madrid, Memoria Master en Ingeniería de Sistemas y Control.
- b. M. Quispe, G. Easwaran, R. Moras (2010). *“Modelo Matemático para una Óptima Programación y Distribución de Vehículos durante Operaciones de Recolección de Residuos Sólidos y Materiales Reciclables en San Antonio, Texas USA”*
- c. Grupo de Residuos Sólidos, P.U.C.V. (2008). *“Asesoría al Proyecto de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos II Etapa I. Municipalidad de Valparaíso”*

#### 2. Artículos de Recolección de Residuos:

- a. SEDESOL, México (1997). *“Manual Para el Diseño de Rutas de Recolección de Residuos Sólidos Municipales”*
- b. F. Larumbe (2009). *“Optimización de la recolección de residuos en la zona sur de la Ciudad de Buenos Aires”*
- c. Sahoo, Kim, Kim et al. (2005). *“Routing Optimization for Waste Management”*
- d. Buhrkal, Larsen, Røpke (2012). *“The waste collection vehicle routing problem with time windows in a city logistic context”*
- e. M. Alberola, A. Gallardo, F. Colomer (2011). *“Comparación de métodos de optimización de rutas en la recogida de residuos sólidos urbanos aplicado a Castellón de la Plana”*

#### 3. Artículos/Estudios de Residuos para Santiago:

- a. Gobierno de Chile (2011). *“Informe Ministerio del Medio Ambiente-Residuos”*
- b. O. Vásquez (2009). *“Modelo de simulación de gestión de residuos sólidos domiciliarios en la Región Metropolitana de Chile”*

---

[1] Corresponde a una variante del Problema de Rutas de Vehículos (Vehicle Routing Problem) denominada Problema de Rutas de Arcos Capacitados (Capacitated Arc Routing Problem o CARP) que consiste en atender las demandas sobre determinadas calles de una red vial a través de una flota homogénea de vehículos, los cuales inician y finalizan sus recorridos desde un único depósito. El objetivo del problema es minimizar el costo total del recorrido de forma que se atiendan todas las demandas sin exceder la capacidad de carga de los vehículos involucrados.

#### 4. Artículos Implementación de Algoritmos VRP – CARP:

- a. V. Maniezzo (2004). "Algorithms for Large Directed CARP Instances: Urban Solid Waste Collection Operational Support"
- b. A. Haghani (2000). "Calvert County Snow Emergency Decision Support System. The State Highway Administration Maryland Department of Transportation. Final Report"
- c. Sahoo, Kim, Kim (2005). "Waste Collection vehicle routing problem with time windows"
- d. Karadimas, Papatzelou, Loumos (2007). "Optimal solid waste collection routes identified by the ant colony system algorithm"
- e. A. Bhambulkar. G.H.Raisoni (2007). "Municipal Solid Waste Collection Routes Optimized with ArcGis Network Analyst"
- f. A. Magriña, F. Robusté (2000) "Optimización de rutas de vehículos de recogida de basura mediante recocido simulado"

#### 5. Artículos Scheduling:

- a. R. Z. Rios, J.F. Bard (2000). "Heurísticas para Secuenciamiento de Tareas en Líneas de Flujo"
- b. G. Mailing (2003). "Algoritmos heurísticos y el problema de job shop scheduling"

Las conclusiones de la revisión bibliográfica son fueron:

- i. **Los modelos y algoritmos revisados, que han sido resueltos por métodos exactos, tienen dimensiones muy inferiores al problema de la comuna de Santiago.**
- ii. **Los problemas que por tamaño pueden ser considerados similares al de Santiago, han sido resueltos por métodos heurísticos.**
- iii. **De los problemas resueltos y reportados en la bibliografía, ninguno contempla todas las restricciones del problema de la recolección de residuos de la ciudad de Santiago.**
- iv. **Por lo anterior, el modelo que se diseñará y resolverá es particular al problema del Municipio de Santiago, considerando sus restricciones y las experiencias de otros estudios para el diseño final de un Modelo y Algoritmo únicos para la recolección de residuos de la Municipalidad de Santiago.**

Tanto los artículos señalados, como una presentación que los resume y analiza, pueden encontrarse en Anexos.



En algunos casos, estas restricciones solo se aplican en ciertos periodos de del día, aunque siempre en días laborales.

**Tabla 2: Restricciones de Uso de Vías en la Red del Estudio<sup>4</sup>**

Tipo Restricción	Horario	Nombre Eje	Distancia (Km)
<b>VIA REVERSIBLE</b>	7:00-10:00	PORTALES	1.15
	7:30-10:00	10 DE JULIO HUAMACHUCO	0.34
<b>VIA REVERSIBLE</b>	7:30-10:00	CARDENAL JOSE MARIA CARO	0.97
	7:30-10:00	PORTUGAL	1.41
	7:30-10:00	SAN IGNACIO DE LOYOLA	2.45
<b>VIA REVERSIBLE</b>	17:00-21:00	CARDENAL JOSE MARIA CARO	0.71
	7:30-10:00/17:00-21:00	COMPañIA DE JESUS	0.76
	7:30-10:00/17:00-21:00	ENRIQUE MAC IVER	0.98
	7:30-10:00/17:00-21:00	MERCED	0.60
	7:30-10:00/17:00-21:00	PLAZA DE ARMAS	0.13
<b>VIA EXCLUSIVA</b>	7:30-10:00/17:00-21:00	SAN ANTONIO	1.01
	7:30-10:00/17:00-21:00	SAN FRANCISCO	3.59
	7:30-10:00/17:00-21:00	SAN MARTIN	1.53
	7:30-10:00/17:00-21:00	SANTA ROSA	3.63
	7:30-10:00/17:00-21:00	SANTO DOMINGO	1.40
	0:00-24:00	AMUNATEGUI	1.35
	0:00-24:00	BASCUÑAN GUERRERO	2.29
	0:00-24:00	CARMEN	3.26
	0:00-24:00	EXPOSICION	2.00
	0:00-24:00	LIRA	1.13
	0:00-24:00	LORD COCHRANE	0.30
<b>PISTA SOLO BUS</b>	0:00-24:00	MANUEL ANTONIO MATTA	3.67
	0:00-24:00	MELIPILLA	0.14
	0:00-24:00	NATANIEL COX	3.23
	0:00-24:00	RAMON SUBERCASEAUX	0.75
	0:00-24:00	SAN DIEGO	3.25
	0:00-24:00	SAN PABLO	3.34
	0:00-24:00	SIERRA BELLA	1.91
<b>VIA SEGREGADA</b>	0:00-24:00	LIBERTADOR BERNARDO O'HIGGINS	8.80
	0:00-24:00	PROVIDENCIA	0.04
	0:00-24:00	VICUÑA MACKENNA	3.49
<b>CORREDOR</b>	0:00-24:00	VICUÑA MACKENNA	2.70
<b>TOTAL</b>			<b>62.31</b>

Fuente: Elaboración propia a partir de Red Táctica Suroeste y de [www.uoct.cl](http://www.uoct.cl)

<sup>4</sup> Como será explicado posteriormente, la inclusión de vialidad complementaria a la comuna es necesaria para permitir la circulación y que el grafo sea conexo, aunque no se recojan residuos en ella.

De las vías detalladas en la tabla anterior, solo las vías reversibles y exclusivas influirán de manera efectiva en el modelamiento de la circulación de los camiones recolectores, debido a que:

- Las pistas solo bus no impiden usar la vía, pues solo se restringe el uso de una pista, y por tramos largos (se permite el uso en tramos). Es decir, el espíritu de la medida es impedir el uso de dicha pista para circular. Apelando a ese espíritu, y entendiendo que la recolección de basura es excepcional en términos de la cantidad de camiones que hacen uso de ella en cada eje, no se justifica impedir el uso de estas vías las 24 horas de todos los días.
- En el caso de las vías segregadas o corredores de la comuna, estos se encuentran en la zona nocturna o son corredor central, por lo que es perfectamente compatible utilizar esas vías en la noche sin generar externalidades significativas sobre la operación de los buses.

### 2.4.2.2 Ferias y Ciclorecreovías

A objeto de evitar la circulación y recolección en las calles y horarios utilizadas por las ferias libres, ellas se debieron identificar y geocodificar, para luego incorporarlas como un post-proceso de la optimización de rutas.

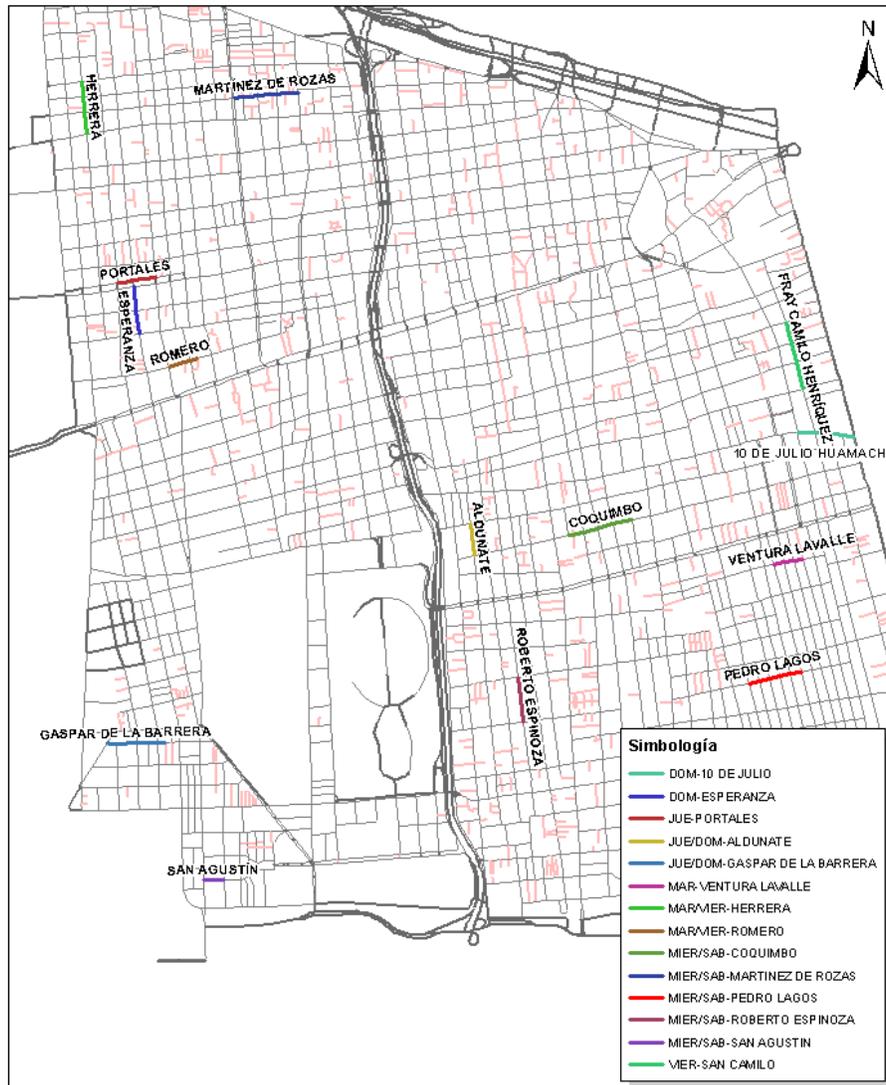
De acuerdo a lo publicado por el Municipio en su sitio web, la extensión de las ferias libres con los respectivos días de funcionamiento y horario se muestran a continuación. Por cierto, la extensión en cada caso señalada no incluye los coleros.

**Tabla 3: Ferias Libres Comuna Santiago**

FERIA	ENTRE LAS CALLES	DIAS FUNC.	HORARIO	DIAS FUNC.	TÉRMINO
SAN CAMILO	MARIN - ARGOMEDO	VIERNES	08:00 a 15:00	----	----
COQUIMBO	NVA.DE VALDES- L. BERRIOS	MIERCOLES	08:00 a 15:00	SABADO	08:00 a 16:00
DIEZ DE JULIO	V. MACKENNA- PORTUGAL	DOMINGO	08:00 a 16:00	----	----
PEDRO LAGOS	CARMEN- LIRA	MIERCOLES	08:00 a 15:00	SABADO	08:00 a 16:00
VENTURA LAVALLE	LIRA- CUEVAS	MARTES	08:00 a 15:00	----	----
HERRERA	SAN PABLO- MAPOCHO	MARTES	08:00 a 15:00	VIERNES	08:00 a 15:00
MARTINEZ DE ROZAS	R. CUMMING- BRASIL	MIERCOLES	08:00 a 15:00	SABADO	08:00 a 16:00
PORTALES	LIBERTAD- MAIPU	JUEVES	08:00 a 15:00	----	----
ESPERANZA	AV.PORTALES - E. ESCALA	DOMINGO	08:00 a 16:00	----	----
ROMERO	C.VILLARIN- LIBERTAD	MARTES	08:00 a 15:00	VIERNES	08:00 a 15:30
SN. AGUSTIN	BASCUÑAN- FCO. PIZARRO	MIERCOLES	08:00 a 15:00	SABADO	08:00 a 16:00
R. ESPINOZA	VICTORIA- P. LAGOS	MIERCOLES	08:00 a 15:00	SABADO	08:00 a 16:00
ALDUNATE	COPIAPO- COQUIMBO	JUEVES	08:00 a 15:00	DOMINGO	08:00 a 16:00
G. DE LA BARRERA	LONGAVI- MELIPILLA	JUEVES	08:00 a 15:00	DOMINGO	08:00 a 16:00

Fuente: <http://www.municipalidaddesantiago.cl/>, Agosto 2014

Figura 11, Ferias Libres Municipalidad de Santiago



Fuente: <http://www.municipalidaddesantiago.cl/>, Agosto 2014

Con respecto a las ciclorecreovías, éstas no permiten el tránsito de vehículos motorizados en los ejes afectados o en al menos una de sus calzadas.

La Municipalidad de Santiago publicó en su sitio web el circuito de estas vías dentro de la comuna. Todas las pistas y calzadas de los ejes individualizados son utilizados por la Ciclorecreovías, a excepción de José Miguel de la Barra donde sólo se utiliza la calzada poniente.

Figura 12, Ciclorecreovías Municipalidad de Santiago



Fuente: <http://www.municipalidaddesantiago.cl/>, Agosto 2014

### 2.4.3 Información proporcionada Municipalidad de Santiago

El análisis de la información proporcionada por el Municipio se realizará en cada tarea o capítulo que la requiera, por lo que no se repetirá en esta sección. No obstante, y solo a modo de listado general, el Municipio entregó al Consultor la siguiente información:

1. Rutas de los servicios actuales: *Archivos Excel de algunas rutas (tramos en operación)*
2. Estimación de los tiempos muertos antes mencionados: *Información de algunas zonas.*
3. Reportes del Procesador de Basura correspondientes al segundo semestre 2013. Estos reportes contienen:
  - a) La hora de llegada de cada camión al Procesador de Basura.
  - b) La hora de salida de cada camión desde el Procesador de Basura.
  - c) Kilos de basura total vertida por cada camión.
4. Tablas de desplazamiento de camiones medidos por GPS para los primeros meses de 2014.
5. Listado georeferenciado de los productores Puntuales de basura.
6. Listado georeferenciado de patentes comerciales que pagan derecho de servicio de basura, con el monto del derecho (que es un proxy del volumen de basura que generan). *No llego georeferenciado para el 2014*
7. Listado de los aproximadamente 500 pasajes y cités existentes en la comuna.
8. Listado de puntos, con sus horarios, en que se debe realizar la carga de basura de los barredores: *Información incompleta.*
9. Listado de camiones de cada tipo.
10. Listado de choferes.
11. Listado de cargadores.
12. Conformación de equipos (choferes + cargadores)
13. Dirección de Sedes, Terminal y Procesador de Basura.
14. Estimación de ausentismo laboral de choferes.
15. Estimación de ausentismo laboral de cargadores.
16. Estimación de flota no operativa diaria producto de fallas mecánicas: *Llegó información, pero no fue aplicable a los camiones nuevos.*
17. Calendario de mantenciones programadas de camiones. *Llegó información sobre las mantenciones mensuales preventivas y la programación de revisiones técnicas*
18. Listado de calles que deben ser visitadas como mínimo cada 24 horas. *Para algunas zonas llego información, por lo que se aplicó de manera general*
19. Listado de Puntos de Descanso: *Llegó información incompleta para la situación actual.*
20. Plano de calles de la comuna en formato ARCGIS. *No se utilizó porque no estaba completa ni atributada.*

#### 2.4.4 Otras Fuentes de Información

En complemento a los artículos revisados como parte de la revisión bibliográfica y de la formulación de los modelos de diseño óptimo de rutas y asignación de tareas, han sido utilizados los siguientes documentos, ya sea para la realización misma de las tareas de la Consultoría como para la elaboración del presente informe.

- Caracterización de Residuos Sólidos Domiciliarios en la Región Metropolitana.
- Ciudad Horizontal, un espacio dinámico, Alternativas para la reconversión de pequeños bolsones urbanos, Universidad Central, 2005.
- Informe de Gestión de Aseo 2012.
- Ley N° 18.695, Orgánica Constitucional de Municipalidades (Texto Refundido, Coordinado Y Sistematizado).
- Ley N° 18.883, que Aprueba Estatuto Administrativo para Funcionarios Municipales
- Ordenanza N° 77/1998, de la I. M. de Santiago, Ordenanza de "Aseo en la Comuna" (texto original y completo),
- Propuestas de Mejoramiento Servicios de Aseo Comunal, Comisión de Aseo del Municipio Abril de 2013.
- Resolución Exenta N° 347/1987, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Subsecretaría de Transportes, que establece La Red Vial Básica de la ciudad de Santiago.<sup>5</sup>
- Tchobanoglous, 1993. Gestión integral de residuos sólidos. McGraw-Hill.

Por cierto, estos documentos pueden encontrarse en los Anexos.

---

<sup>5</sup> Modificaciones incorporadas: Res.Ex. 636/87; Res.Ex. 403/92; Res.Ex. 857/98; Res.Ex. 526/2002; Res.Ex. 272/2003; Res.Ex. 480/2004

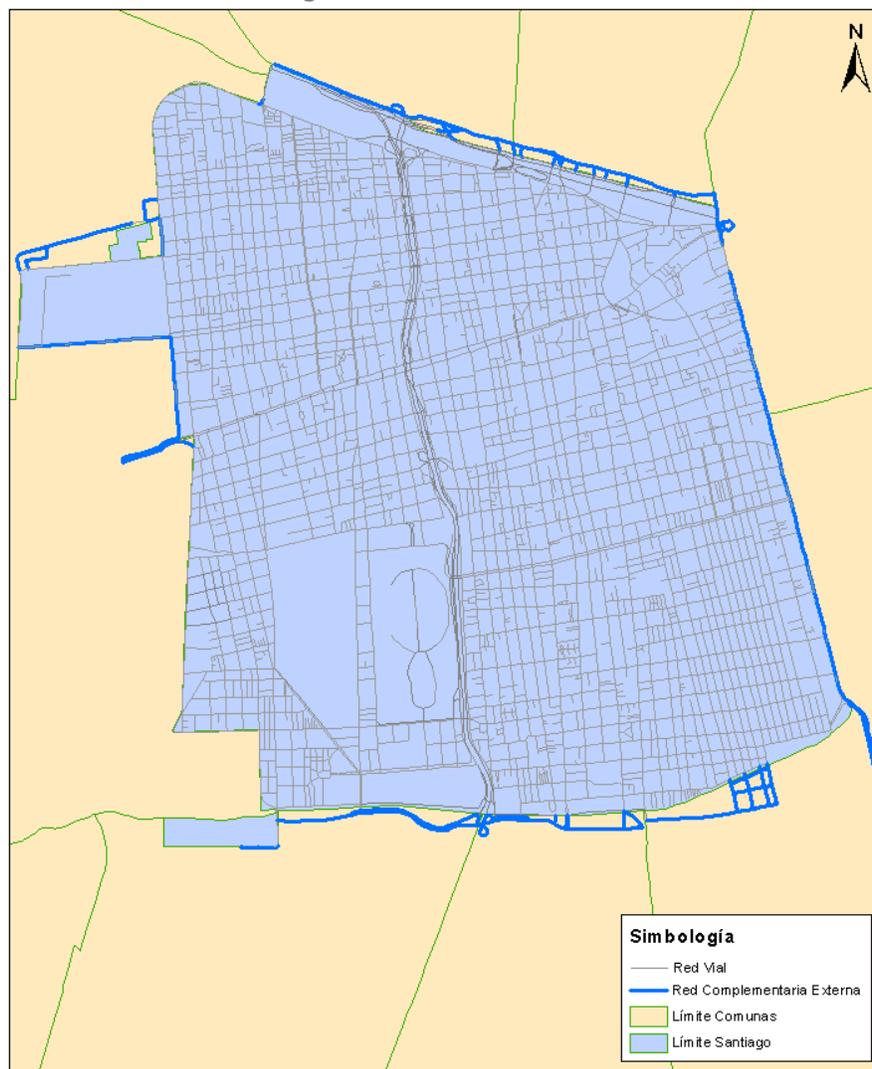
## 3 CARACTERIZACIÓN DE LA RECOLECCIÓN

### 3.1 RED VIAL DEL ESTUDIO

#### 3.1.1 Área de Estudio

Naturalmente, esta consultoría consideró como área de análisis la comuna de Santiago. Sin embargo, a pesar de que la recolección de residuos se realiza estrictamente en las calles de la comuna, los camiones deben desplazarse por vías pertenecientes a las comunas colindantes, ya sea para desplazarse o para llevar a cabo la completa recolección de residuos de la comuna de Santiago. Es por ello que el área de estudio también considera una **Red Complementaria Externa**, que incluye un conjunto de ejes no pertenecientes a la comuna de Santiago, que permiten la circulación entre todas las vías de ella.

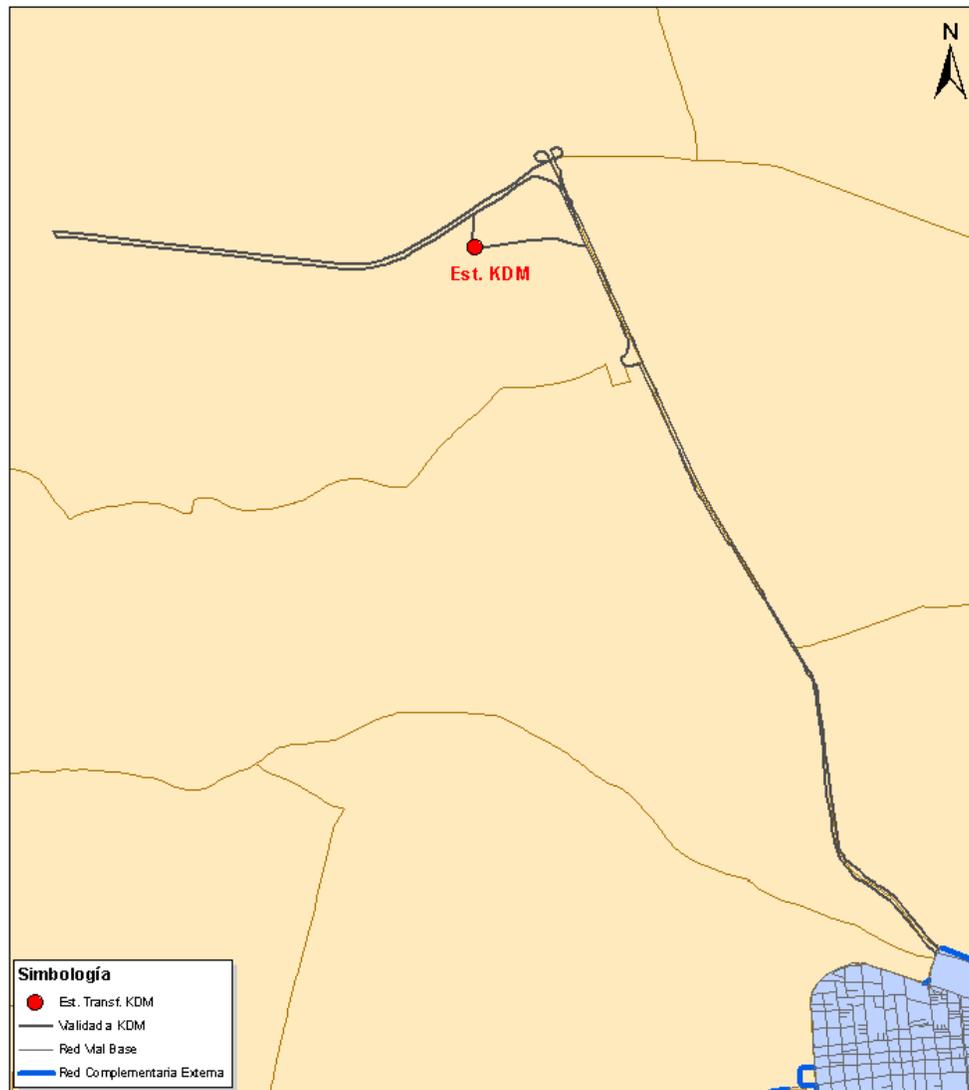
Figura 13, Área de Estudio



Fuente: Elaboración propia a partir de la Red Vial Nokia 2012

De manera complementaria y para la modelación de la recolección de residuos, se consideran los ejes que permitan la conexión directa de la comuna con la señalada estación de KDM.

Figura 14, Vías de conexión directa desde la Comuna a KDM



Fuente: Elaboración propia a partir de la Red Vial Nokia 2012

### 3.1.2 Red Vial

La red vial se construyó a partir de la red vial de la Región Metropolitana Nokia 2012, de propiedad de Cityplanning. De esta base, y al interior del área de estudio, fueron seleccionados todas las calles (**o en adelante e indistintamente, arcos**) de la comuna de Santiago por los que pueden transitar vehículos particulares y de emergencia.

Lo anterior tuvo por objeto eliminar del análisis arcos que representasen por ejemplo senderos o ciclovías. Previa eliminación de dichos arcos, se realizó una validación visual de que efectivamente estuvieran dentro de un parque, plaza, etc.

Como parte de la determinación de la Red Vial Base, se identificó la **Red Complementaria Interna**, que corresponde a un conjunto de calles o arcos donde no se realiza recolección de basura domiciliaria, ya sea por la inexistencia de ella o porque son atendidos por algún servicio particular de retiro ella.

En relación a esto último y de acuerdo a lo señalado por el Jefe de Zona, los residuos domiciliarios del cuadrante Exposición – Lincoln – Conferencia – Fray Luis de la Peña (ambas veredas excepto en Exposición) en la Zona Poniente, es recogida por un servicio especial contratado por el Municipio con una empresa externa. Lo anterior a excepción del único generador complejo de dicha zona, ubicado en Exposición, entre Fray Luis de la Peña y Tucapel.

**De este modo, la RED VIAL estará constituida por: la Red Vial Base, la Red Complementaria Interna y la Red Complementaria Externa, que suman en total 7.254 arcos o calles.**

Figura 15, Red Vial



Fuente: Elaboración propia a partir de la Red Vial Nokia 2012

### 3.1.3 Vías de Circulación de Camiones

Con el objeto de identificar las calles por las que efectivamente pueden circular los camiones de recolección, es que a los arcos de la Red Vial definida en el punto anterior, les fue asociado la cantidad de registros GPS disponibilizados por SITRACK<sup>6</sup>. Sin embargo, definir los arcos por los que puede transitar un camión recolector de acuerdo al número de registros GPS asociado, no resultó útil debido a la dispersión de los pulsos GPS sobre los ejes.

Por lo anterior, se realizó un análisis visual de los pulsos GPS y la red vial, de manera de identificar los arcos por los que no circulan los camiones recolectores. Luego, en conjunto con los Jefes de Zona se validó y depuró esta información, logrando identificar los arcos por los que transitan los camiones recolectores, de los que no. Además se individualizaron los arcos que se utilizan solo para circular, pero en donde no se recoge basura, cuestión que permitió precisar la Red Complementaria Interna definida en el acápite anterior.

Figura 16, Red Vial de Circulación de Camiones Recolectores



Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos SITRACK y reuniones con Jefes de Zona

<sup>6</sup> Proveedor de servicios de monitoreo de Flota de la Municipalidad de Santiago, que disponibilizó una base de datos que contiene los pulsos GPS de los camiones recolectores durante el periodo comprendido entre el 01 de enero de 2014 hasta el 14 de mayo de 2014. La información consiste principalmente en la posición y hora del camión cada 60 segundos.

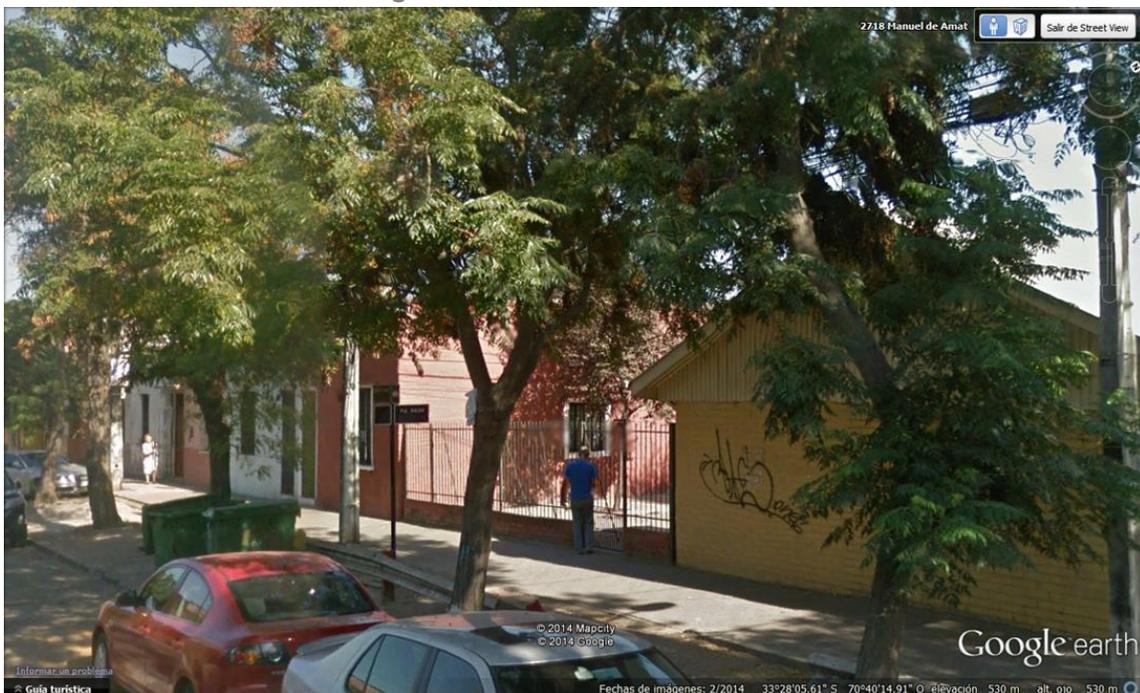
En el caso de los arcos que según los registros GPS no circulan camiones y según los Jefes de Zona si lo hacían, se realizó una validación visual en Google Street View, arrojando que de los 25 casos, en 4 de ellos se concluyó que no podía ingresar el camión. Estos casos se muestran a continuación.

Figura 17, Acceso calle Longaví



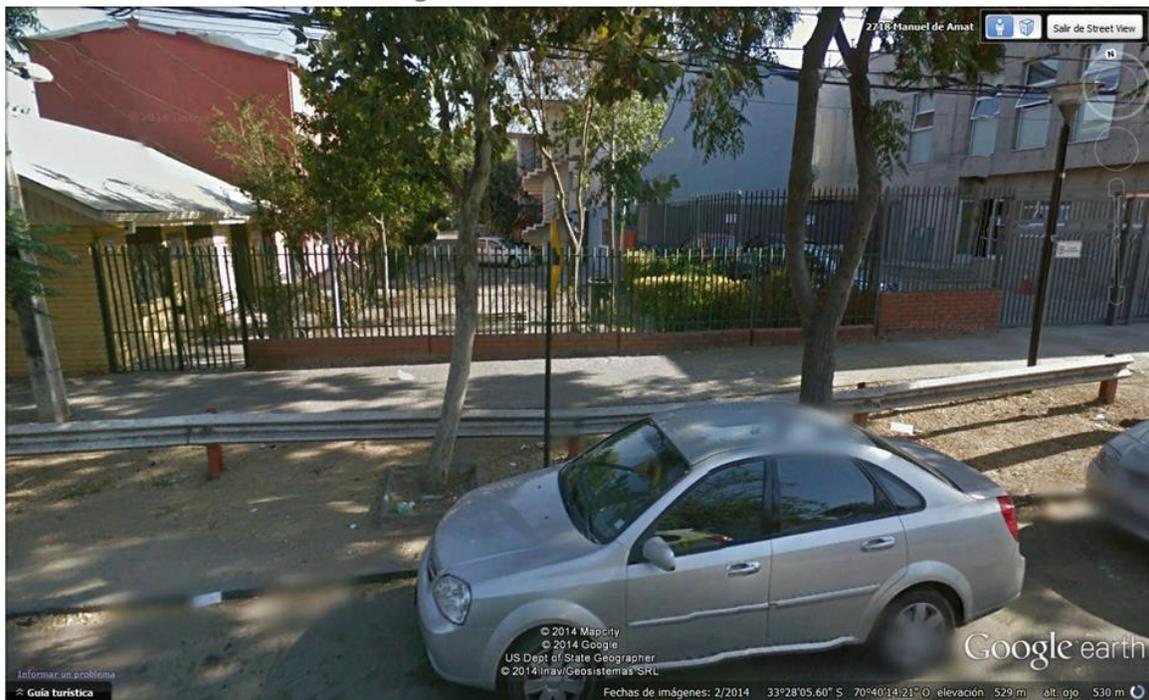
Fuente: Google Street View, Agosto 2014

Figura 18, Acceso calle El Boldo



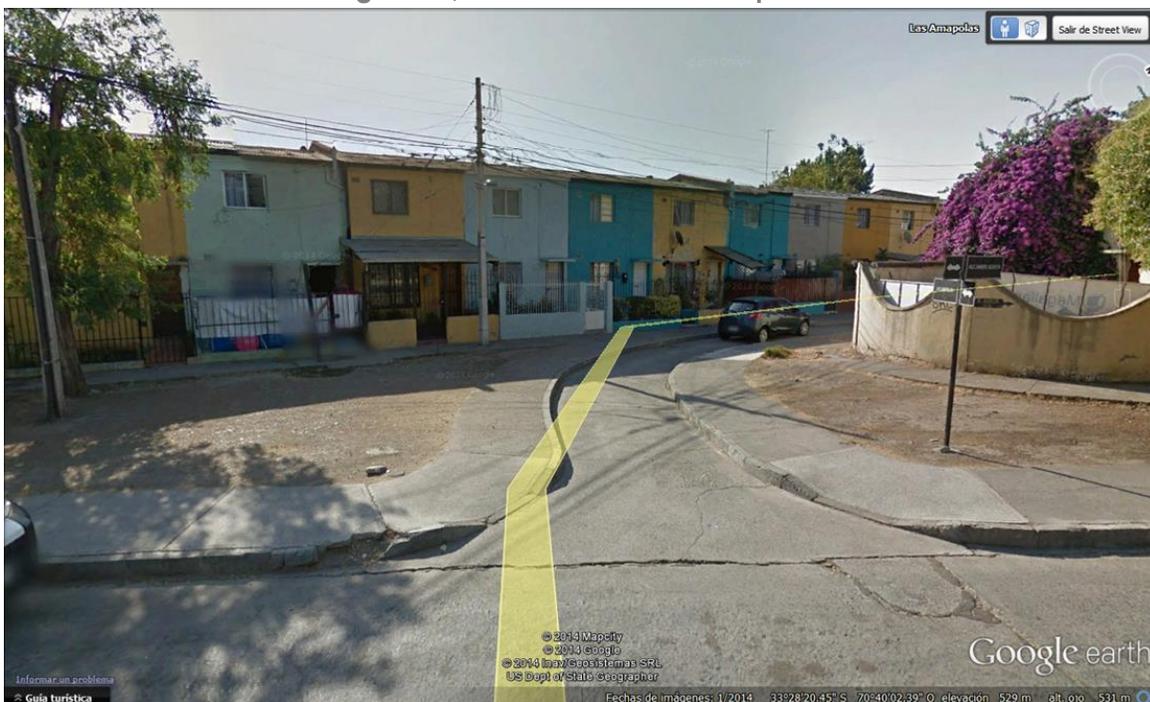
Fuente: Google Street View, Agosto 2014

Figura 19, Acceso calle El Sol



Fuente: Google Street View, Agosto 2014

Figura 20, Acceso calle Las Amapolas



Fuente: Google Street View, Agosto 2014

Una vez concluida la definición de calles o arcos por los que circulan los camiones recolectores, se duplicaron los arcos bidireccionales, de manera de representar de forma adecuada los

movimientos permitidos en la red vial. La composición de ejes por los que circulan o no los camiones recolectores, distribuida por zona territorial, se muestra en la Tabla a continuación:

**Tabla 4: Circulación de Camiones Recolectores en la Comuna de Santiago**

Zona	Tipo Eje	Cantidad Arcos	Distancia Ejes (Km)
CENTRO ORIENTE	No Circula Camión	173	10.03
	Circula Camión	579	37.96
CENTRO PONIENTE	No Circula Camión	339	18.18
	Circula Camión	1,002	78.88
ORIENTE	No Circula Camión	805	45.72
	Circula Camión	2,101	171.28
PONIENTE	No Circula Camión	200	11.48
	Circula Camión	1,090	91.21

Fuente: Elaboración propia a partir de la Red Vial Nokia 2012

### 3.1.4 Vías según Tipo de Recolección

En las calles de la Red Vial Base donde los camiones pueden circular, la recolección se realiza de manera normal. La **Recolección Normal** se refiere a que tanto el camión como los barredores recorren la calle recogiendo los residuos domiciliarios.

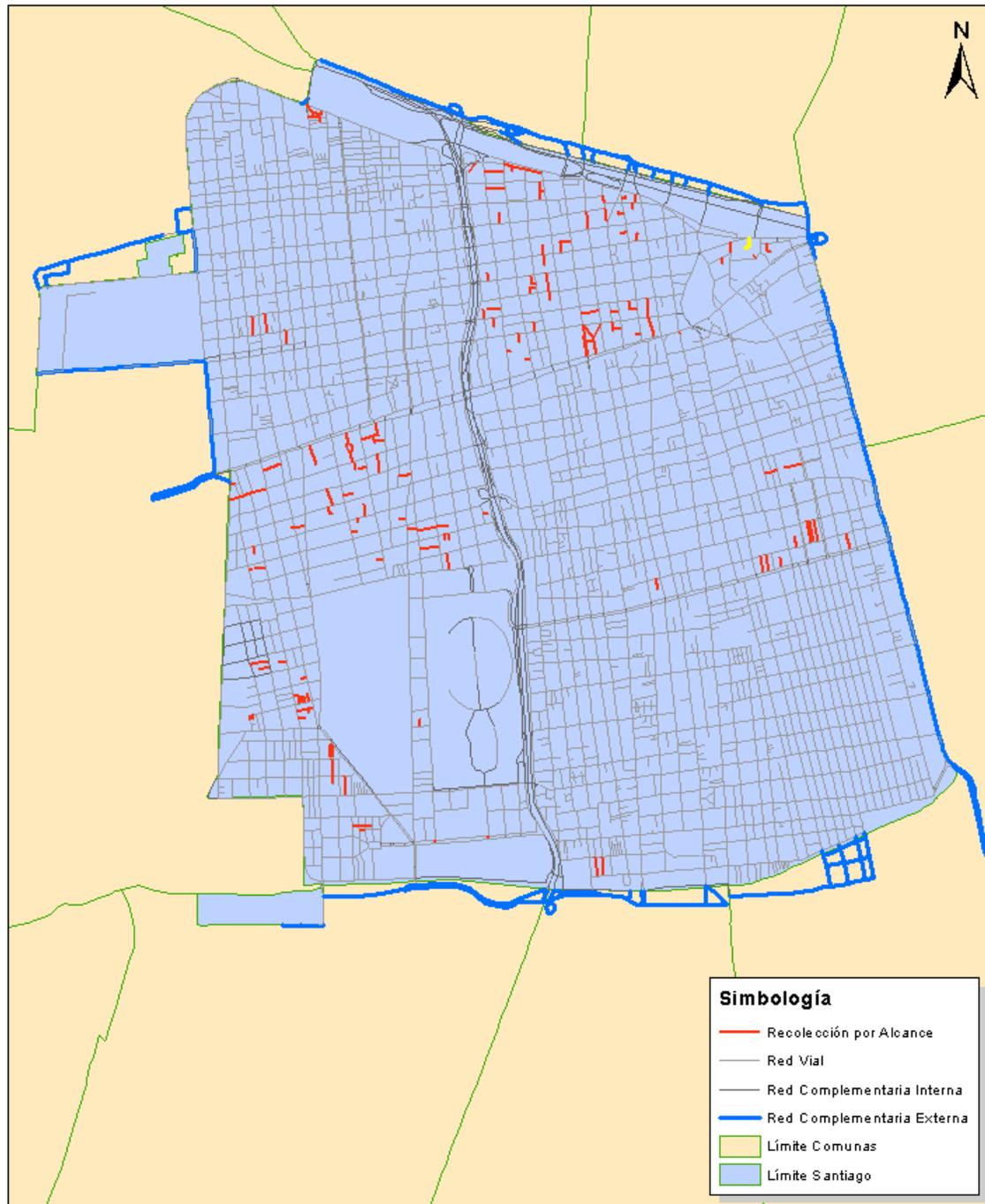
En las calles por las que no circulan camiones recolectores se especificó junto al Municipio si en la actualidad el retiro de basura se realiza por alcance (**Recolección por Alcance**), es decir, si los cargadores ingresan caminando a recoger la basura para llevarla al camión que espera. En caso contrario (**Recolección sin Acceso**), la basura es almacenada en contenedores ubicados en la o las intersecciones de estas calles con aquellas donde circula el camión recolector.

Por cierto, el tipo de recolección tiene implicancias prácticas que desde ya se pueden adelantar. Por ejemplo, en materia de tiempos de recolección, la Recolección Normal se caracteriza porque el tiempo de operación depende principalmente de la cantidad de residuos de la calle, y la forma en que están dispuestos en ella (a granel o en contenedores). En la Recolección por Alcance si bien no se requiere que los camiones recorran la calle, son los cargadores quienes deben recorrerla prácticamente dos veces (entran y salen) para llevar los residuos al camión recolector. La Recolección sin Acceso es a priori y de acuerdo a lo confirmado por los Jefes de Zona la más eficiente, pues evita tanto la circulación de los camiones como las caminatas de los cargadores trasladando bolsas de residuos.

Especial cuidado se tuvo en las calles sin salida, por las cuales circulan camiones recolectores, pues se trata probablemente de calles donde el camión deba salir de ella marcha atrás. Respecto a estas calles, la contraparte técnica manifestó la intención de minimizar estos casos, y definió que todos los arcos sin salida (solo una entrada) por los que circulan camiones con una distancia mayor o igual a 1,15 veces la distancia máxima de los arcos que se recogen por alcance, seguirán con Recolección Normal, pero el resto se deberá atender también mediante Recolección por Alcance.

A continuación se muestra el arco de mayor distancia (arco en amarillo) atendido en la actualidad por alcance, teniendo el cuidado de considerar solo la mitad de la distancia de los arcos con entrada y salida. Este arco corresponde a la calle Nueva de Bueras, y mide 90 mts.

**Figura 21, Calles atendidas actualmente por Alcance**

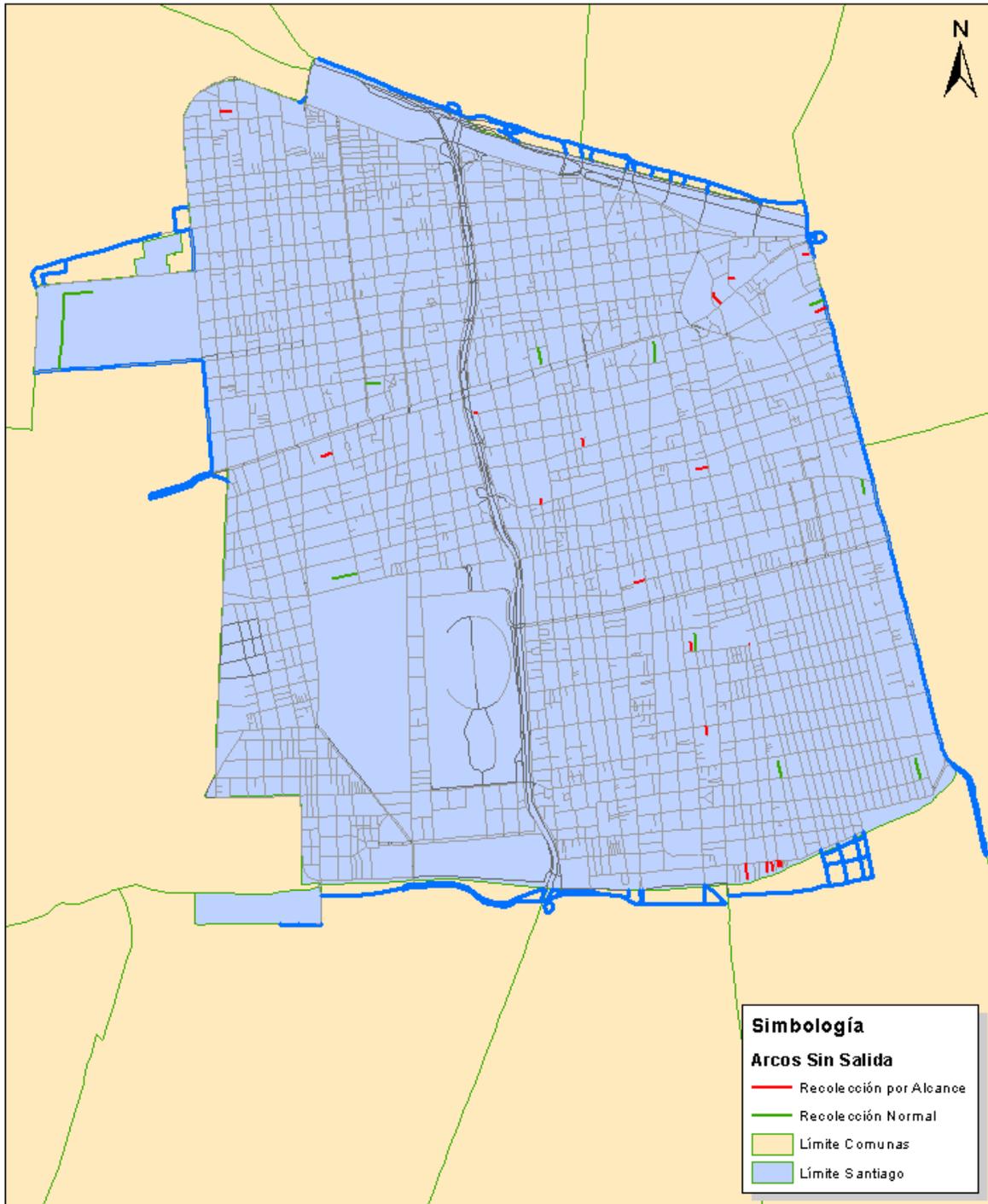


**Fuente: Elaboración propia a partir reuniones con Jefes de Zona**

Como consecuencia de lo anterior, todas las calles sin salida por las que actualmente circulan camiones y que midan menos de 103 metros, fueron consideradas (en el modelo) como calles en que se recoge la basura por alcance. En el resto de calles (de longitud igual o superior a 103

metros) se seguirá considerando que son atendidas mediante el ingreso de los camiones (Recolección Normal).

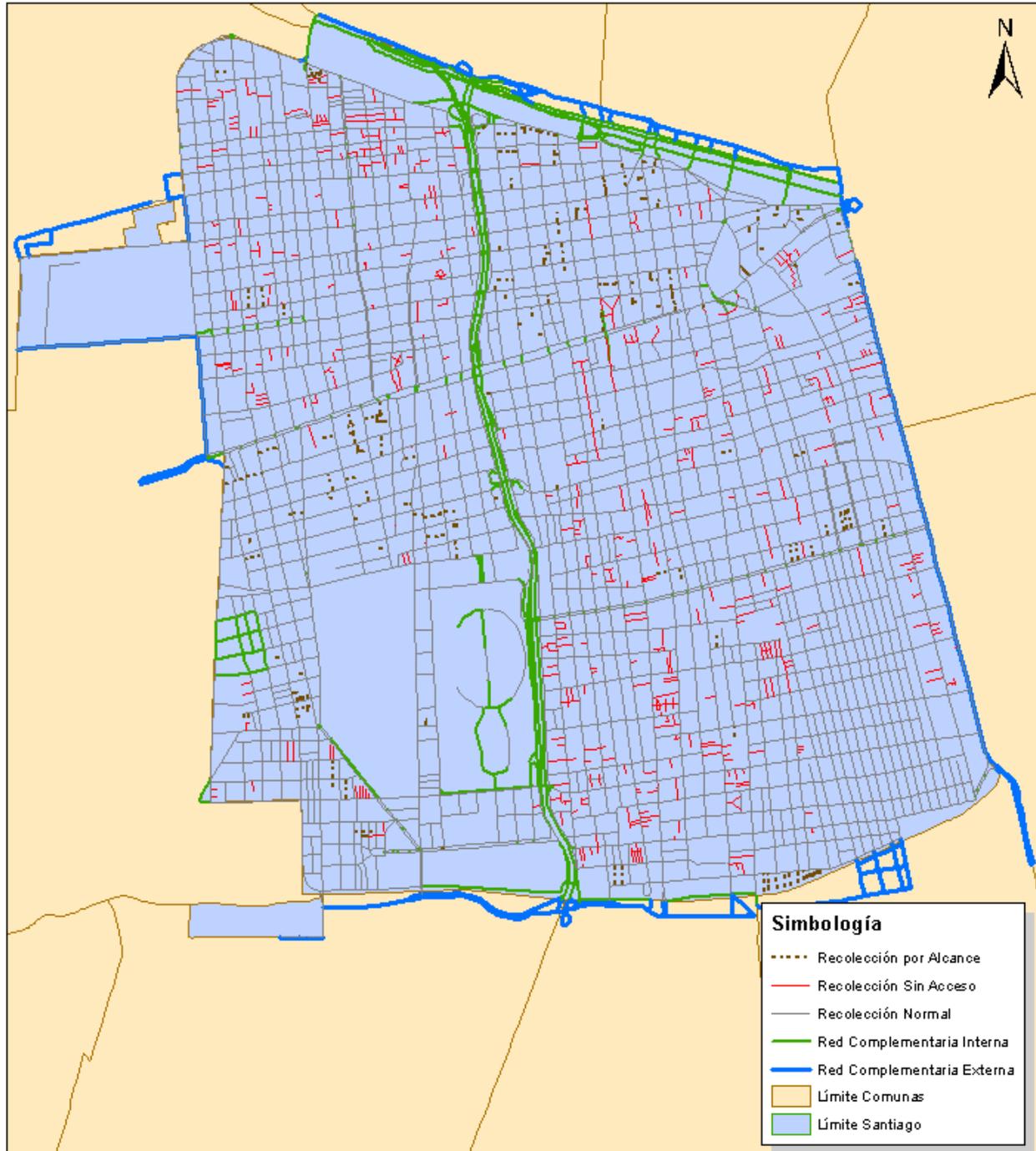
**Figura 22, Tipo de Recolección en calles sin salida que originalmente se atendían mediante Recolección Normal**



Fuente: Elaboración propia a partir de Reuniones con Jefes de Zona y Criterios Municipales

A modo de síntesis, en la siguiente figura se muestra el tipo de recolección de la totalidad de calles de la Red Vial Base.

Figura 23, Red Vial según Tipo de Recolección



Fuente: Elaboración propia a partir de Reuniones con Jefes de Zona y Criterios Municipales

### 3.1.5 Vías de Doble Recolección

Los ejes de doble calzada obviamente deben ser recorridos en operación al menos dos veces (una vez por cada calzada), a objeto de recoger la basura desde ambos lados del eje.

Sin embargo, existe otro conjunto de ejes donde, por razones de cantidad de pistas, flujo vehicular o bidireccionalidad, es deseable operar dos veces. En efecto, dado que el objetivo es evitar malas prácticas, o prácticas riesgosas (cargadores cruzando la calle donde no es conveniente), con fecha 27 de Mayo el Consultor le propuso a la Municipalidad de Santiago un conjunto de ejes por los cuales se opere dos veces.

Como resultado de dicha propuesta el Municipio se pronunció y los ejes que se deben recorrer dos veces debido a la conveniencia de atender cada vereda individualmente, según tipos de eje, se detallan a continuación:

- Doble Calzada: ejes que en cada sentido de tránsito está representado por un arco espacialmente distinto. En este caso no se debe realizar ningún cambio en la red vial.
  - Ejes Unidireccionales: en este caso se debe duplicar el arco en la red vial, de manera de asegurar que pase 2 veces y recoja la basura correspondiente a cada calzada.
- Ejes Bidireccionales: para los ejes bidireccionales existe un arco por sentido. Por lo que, para el resto de los ejes bidireccionales (donde no debe pasar dos veces), la basura se asignó solo en un sentido.

**Tabla 5: Ejes por los cuales se debe operar dos veces, según Tipo de Eje**

TIPO DE EJE	NOMBRE	DISTANCIA (KM)
<b>EJES DE DOBLE CALZADA</b>	BRASIL	1.55
	EL MIRADOR	2.01
	EL PARQUE	0.14
	GENERAL RONDIZZONI	1.21
	LIBERTADOR BERNARDO O'HIGGINS	7.00
	MANUEL ANTONIO MATTA	5.04
	PEDRO MONTT	2.17
	RICARDO CUMMING	4.05
<b>EJES UNIDIRECCIONALES</b>	10 DE JULIO HUAMACHUCO	2.20
	ALMIRANTE BLANCO ENCALADA	0.13
	ALMIRANTE LATORRE	0.03
	AMUNATEGUI	1.42
	BANDERA	1.00
	BASCUÑAN GUERRERO	2.86
	CARMEN	3.52
	COPIAPO	1.72
	CURICO	0.91
	DIAGONAL PARAGUAY	0.82
	DIECIOCHO	0.81
	ELEUTERIO RAMIREZ	0.11
	ENRIQUE MAC IVER	0.98

Fuente:

ESPAÑA	1.02
GENERAL MACKENNA	0.65
GENERAL RONDIZZONI	0.76
LIRA	0.88
LORD COCHRANE	0.85
MANUEL ANTONIO MATTA	0.03
MAPOCHO	1.71
MARIN	1.04
MAULE	2.02
NATANIEL COX	1.76
ÑUBLE	2.64
PADRE ALONSO DE OVALLE	0.39
PORTUGAL	0.52
RAMON SUBERCASEAUX	0.11
SAN DIEGO	3.18
SAN FRANCISCO	2.73
SAN PABLO	2.67
SANTA ROSA	3.63
SANTO DOMINGO	1.38
SIERRA BELLA	1.87
TARAPACA	0.92
TEATINOS	1.38
TUPPER	0.01
VICTORIA	2.29
<b>EJES BIDIRECCIONALES</b>	
ALMIRANTE BLANCO ENCALADA	2.62
ALMIRANTE LATORRE	0.89
AMUNATEGUI	0.15
ANTOFAGASTA	1.34
BASCUÑAN GUERRERO	0.06
BEAUCHEFF	2.64
GENERAL RONDIZZONI	0.32
LIBERTADOR BERNARDO O'HIGGINS	1.57
MATUCANA	1.17
PORTUGAL	2.84
REPUBLICA	0.65
RICARDO CUMMING	0.10
SAN DIEGO	0.26
TUPPER	1.08

Elaboración propia a partir de las definiciones Municipales

Figura 24, Ejes por los cuales se debe operar dos veces, según tipo de eje



Fuente: Elaboración propia a partir de las definiciones Municipales

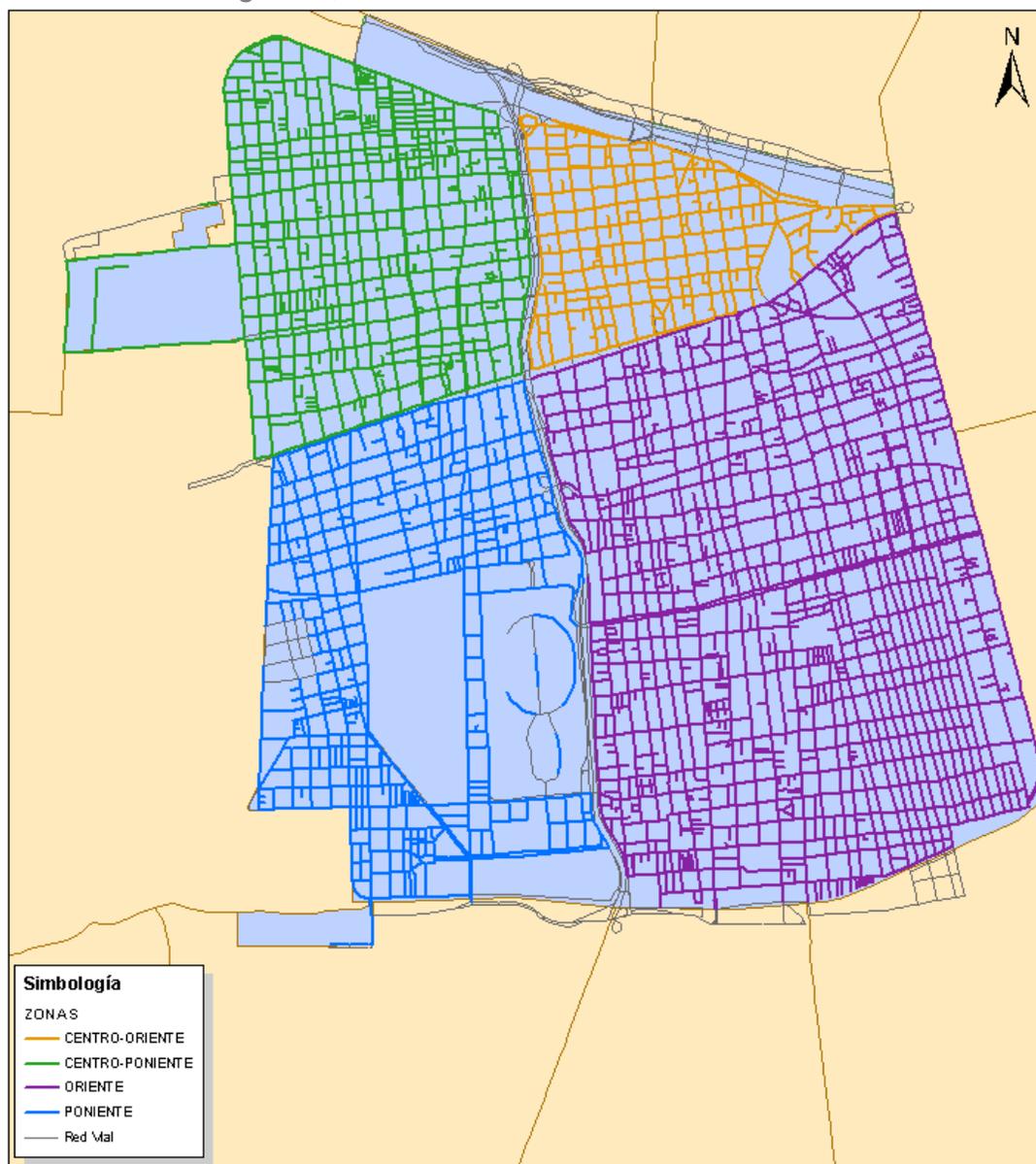
### 3.1.6 Otras Características

Tanto para el modelo matemático requerido por el Municipio, como la como para la comparación con la situación actual, fue necesario incorporar en el grafo de la red vial una serie de características. Entre ellas están:

#### 3.1.6.1 Zonas Territoriales Actuales

Como fuera señalado en el Capítulo 2, la comuna de Santiago está dividida en 4 zonas territoriales para la administración y organización de los servicios de recolección de basura. Estas zonas deben ser consideradas en el Escenario 1 de optimización de rutas, por lo que cada arco de la Red Vial Base fue atribuido según la zona en la que estuviera contenido.

Figura 25, Zonificación de los Arcos Red Vial Base



Fuente: Elaboración propia a partir reuniones con Jefes de Zona

### 3.1.6.2 Azimuth

Como una manera de hacer más eficiente la optimización de rutas de recolección de basura, se considerará la orientación con respecto al norte (azimuth) del sentido de tránsito de cada arco, medido como ángulo en el sentido de los punteros del reloj. De este modo, los valores del azimuth varían entre 0° y 360°.

### 3.1.7 Estructura de Datos Red Vial

La estructura de la red vial incluye la información detallada en los acápite anteriores, además de los tiempos de viaje en los tipos de día Laboral (DLN), sábado (SAB) y domingo (DOM):

**Tabla 6: Estructura de Datos de Red Vial**

Atributo	Descripción
<b>LINK_ID</b>	Identificador del Arco
<b>NOMBRE</b>	Nombre del eje
<b>CATEGORIA</b>	Tipo de eje
<b>DISTANCIA</b>	Distancia del arco (mts)
<b>NODOI</b>	Nodo Inicio
<b>NODOJ</b>	Nodo Fin
<b>TIPOVIA</b>	Vía Segregada, Exclusiva, Pista Solo Bus, Reversible o Corredor
<b>ZONA</b>	Centro-Oriente, Centro-Poniente, Oriente y Poniente
<b>AZIMUTH</b>	Azimuth del arco, considerando el sentido de tránsito (°)
<b>DOBLE PASO</b>	Define si el arco se debe recorrer 2 veces
<b>ALCANCE</b>	Define si el arco se recorre en camión (0), los cargadores (1) o no se recorre (-1).
<b>COMPLEMENTARIO</b>	Define si el arco es parte de la red complementaria interna, externo o no.
<b>Tv_DLN_0_7</b>	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DLN entre las 00:00 y 07:00hrs.
<b>Tv_DLN_7_10</b>	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DLN entre las 07:00 y 10:00hrs.
<b>Tv_DLN_10_17</b>	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DLN entre las 10:00 y 17:00hrs.
<b>Tv_DLN_17_21</b>	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DLN entre las 17:00 y 21:00hrs.
<b>Tv_DLN_21_24</b>	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DLN entre las 21:00 y 24:00hrs.
<b>Tv_SAB_0_7</b>	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en SAB entre las 00:00 y 07:00hrs.
<b>Tv_SAB_7_10</b>	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en SAB entre las 07:00 y 10:00hrs.
<b>Tv_SAB_10_17</b>	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en SAB entre las 10:00 y 17:00hrs.
<b>Tv_SAB_17_21</b>	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en SAB entre las 17:00 y 21:00hrs.
<b>Tv_SAB_21_24</b>	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en SAB entre las 21:00 y 24:00hrs.
<b>Tv_DOM_0_7</b>	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DOM entre las 00:00 y 07:00hrs.
<b>Tv_DOM_7_10</b>	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DOM entre las 07:00 y 10:00hrs.
<b>Tv_DOM_10_17</b>	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DOM entre las 10:00 y 17:00hrs.
<b>Tv_DOM_17_21</b>	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DOM entre las 17:00 y 21:00hrs.
<b>Tv_DOM_21_24</b>	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DOM entre las 21:00 y 24:00hrs.

Fuente: Elaboración propia

## 3.2 GENERADORES DE BASURA

### 3.2.1 Definición de Generadores

De acuerdo a las bases de licitación de la consultoría, los generadores de basura (en adelante Generadores) deben ser caracterizados en las siguientes categorías:

- **SIMPLES:** que representan casas, edificios pequeños y comercio local, que generan poca basura, **una vez al día**.
- **COMPLEJOS:** que representan comercios que producen un elevado volumen de basura, **2 veces al día**.
- **PUNTUALES:** que representan fundamentalmente condominios, que generan una elevada cantidad de basura, **una vez al día**.

### 3.2.2 Fuentes de Información

Para identificar estos generadores de basura se utilizaron las siguientes bases de datos, todas las cuales fueron entregadas por el Municipio de Santiago.

#### 3.2.2.1 Base de Roles de la Comuna de Santiago

Esta base de datos contiene más de 273 mil registros de la totalidad de roles de la comuna de Santiago para el año 2014, donde además se clasifica el uso (Destino) de dichas propiedades. Esta base de datos no posee información geográfica.

**Tabla 7: Detalle cantidad de Roles por Tipo**

Destino	Cuenta
Administración pública	146
Bodega	49.485
Comercio	19.693
Culto	172
Deporte	41
Educación	690
Estacionamiento	43.846
Habitacional	140.914
Hotel motel	306
Industria	2.222
Oficina	14.648
Otros no coincidentes	174
Salud	115
Sitio eriazo	664
Transporte y telecomunicaciones	38
<b>TOTAL GENERAL</b>	<b>273.154</b>

**Fuente:** Elaboración propia a partir de Base de Roles de la Comuna de Santiago

### 3.2.2.2 Edificios

Para caracterizar este tipo de recintos, el Municipio de Santiago hizo entrega de dos bases de datos, con información espacial:

- o **Precenso\_2012**. Levantamiento que se realizó el año previo al Censo para el dimensionamiento de encuestadores y cuadrillas. En esta base se registraron los edificios de vivienda de al menos 5 pisos.
- o **CORDESAN**. Registra los permisos de edificación otorgados por el municipio entre 1990 y 2012.

### 3.2.2.3 Aseo extraordinario

En relación a los generadores complejos, el Municipio de Santiago dispuso el registro de todas personas naturales o jurídicas (con dirección) que pagan aseo extraordinario en la comuna de Santiago, actualizada a Mayo 2014. Esta base, no posee información espacial.

Del registro antes señalado se desprende que, quienes pagan derechos de aseo adicionales, lo hacen por volúmenes superiores a 60 litros diarios, a pesar de que de acuerdo a la Ordenanza N° 77 del 23 de Julio de 1998, Ordenanza "Aseo en la Comuna" (texto original y completo), ello debe ocurrir desde los 200 litros.

Figura 26, Extracto Ordenanza N°77/1998

ARTÍCULO .17°	<p>La Municipalidad retirará la basura domiciliara doméstica, entendiéndose por tal la que resulte de la permanencia de las personas en locales habitados, como los residuos de la vida casera y los productos del aseo de los locales.</p> <p>Igualmente, retirará los residuos provenientes de los establecimientos comerciales e industriales que no exceda de 200 litros diarios, salvo que se trate de los materiales señalados en el Artículo 19° letra e) y en el Artículo 20° de la presente Ordenanza.</p>
ARTÍCULO 18°	<p>La Municipalidad podrá retirar la basura comercial o industrial que exceda de la cantidad señalada en el Artículo 17°, previa solicitud y pago adicional de este servicio por parte de los interesados. Para ello la I. Municipalidad fijará la tarifa correspondiente, anualmente, en la Ordenanza de Derechos Municipales. El contribuyente podrá aceptar o rechazar este costo. Si opta por lo último, la Municipalidad sólo retirará el volumen de desperdicio señalado en el Artículo N°17, debiendo el contribuyente ejecutar por sí mismo o por medio de terceros la extracción y transporte de los desperdicios, siempre que los vehículos empleados en dichos servicios cumplan con las condiciones que determine el Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente (SESMA).</p>

Fuente: Ordenanza N°77/1998; Título II, Recogidas de Basura

Frente a esta contradicción, la DAO señaló que por ser de mayor rango legal, la Ley 19.704/2000 prima por sobre la Ordenanza, y en ella se señala el límite de 60 litros diarios.

### 3.2.2.4 Cités

El Municipio de Santiago entregó también el listado, sin información espacial, de 530 direcciones que representan los cités y pasajes existentes en la comuna.

### 3.2.3 Caracterización de los Generadores

El objetivo de esta etapa fue caracterizar los distintos tipos de generadores definidos en las bases de licitación, para lo cual se usaron las siguientes consideraciones, conversadas con el Municipio.

- ✓ El Universo de Generadores de basura de la comuna estará constituido por todas las propiedades contenidas en la base de roles.
- ✓ Los generadores complejos corresponden a todos aquellos que pagan derechos de aseo extraordinario. **No obstante, el Consultor ha detectado en terreno y en reuniones con los Jefes o líderes de las Zonas, importantes generadores que no aparecen en el registro de quienes pagan derechos de aseo adicionales, que han sido agregados al listado de Generadores Complejos si procede. Adicionalmente, la modelación de la generación de basura arrojó que los recintos del tipo Educación o Industria son importantes y significativos generadores, por lo que fueron tratados como generadores complejos.**
- ✓ Los generadores puntuales corresponden a todos los edificios que se registran en la base CORDESAN, la que será complementada con los edificios registrados en el Precenso 2012.
- ✓ Se considerará a los cités como otro tipo de generador, de manera de poder caracterizar adecuadamente los tiempos de recolección de basura por parte de los cargadores, debido a que los camiones no pueden ingresar a estos lugares.
- ✓ En la comuna existen propiedades que cuentan con servicios particulares de recolección. Dichos recintos fueron identificados por los Jefes de Zona, y consecuentemente fueron excluidos del universo de generadores.
- ✓ Por último, los generadores simples, serán todos aquellos que no sean caracterizados como complejos, puntuales o cités, ni los que poseen servicio de aseo particular.

### 3.2.4 Georeferenciación de los Generadores

De las bases utilizadas para caracterizar los distintos tipos de generadores, solo contaba con información espacial las bases de edificios y permisos de edificación. Por lo que se debió realizar un proceso de geocodificación a las siguientes bases:

- Base de Roles 2014
- Base de Aseo Extraordinario 2014
- Listado de Cités

Para geocodificar dichas bases, se realizó el siguiente procedimiento:

1. Geocodificación por alcance de dirección. El Municipio hizo entrega de una base de patentes comerciales de Enero del 2013, que contaba con información espacial. Por lo que se realizó un proceso de normalización de direcciones en todas las bases y se asignó las coordenadas de la base de patentes comerciales 2013, mientras existiera coincidencia del nombre de calle y número.

- Para las direcciones no encontradas en la base de roles, se realizó un proceso de geocodificación utilizando Google Maps, validando las direcciones.

Finalmente, para las direcciones que no fue posible georeferenciar en los pasos anteriores, se flexibilizó la primera geocodificación, asignando las coordenadas de los registros de patentes comerciales del 2013, mientras coincidiera el nombre de eje y el rango de numeración. Es decir, si un generador tenía por dirección Moneda 1432, se buscó en la base de patentes comerciales alguna dirección de Moneda 1400 a Moneda 1499.

### 3.2.4.1 Generadores Complejos

La nómina entregada por el Municipio, de personas naturales o jurídicas que pagan aseo extraordinario, está constituida por 317 registros. Esta nómina fue generada por el Departamento de Rentas y Finanzas del Municipio, y cada uno de estos registros está caracterizado por un Nombre, Dirección y Pago, este último corresponde al pago mensual por concepto de aseo extra, el que es directamente proporcional a la cantidad de litros de basura por sobre los 60 litros.

**Tabla 8: Análisis Base Aseo Extra**

	<b>Cantidad de Registros</b>
<b>Total de registros</b>	317
<b>Registros Duplicados</b>	2
<b>Registros Fuera de la comuna</b>	1
<b>Registros encontrados por Nombre en la Base de Roles</b>	47
<b>Registros encontrados por Dirección en la Base de Roles</b>	40
<b>Registros encontrados por Dirección Normalizada en la Base de Roles</b>	127
<b>Registros encontrados por Dirección Normalizada en la Base de Roles y que tienen coincidencia de nombre</b>	43

Fuente: Elaboración propia, a partir de Base Aseo Extra

Para evitar la duplicidad se eliminaron de la Bases de Roles los 43 registros de la Base de Aseo Extra en los que existió coincidencia de la dirección normalizada y de nombre.

A esta base le fueron agregados 7 generadores de grandes cantidades de basura, cuyo volumen fue determinado en conjunto con el Municipio.

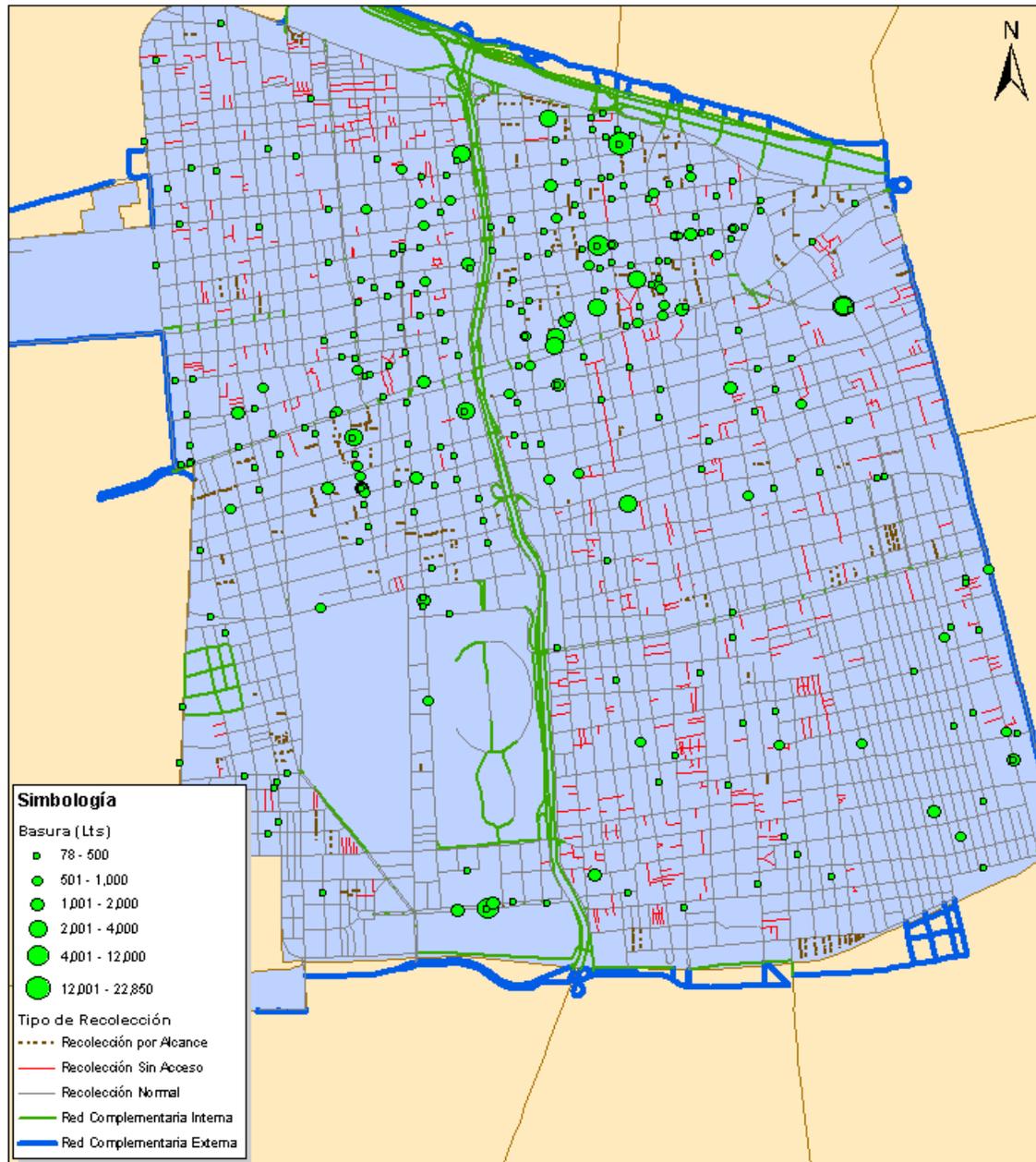
**Tabla 9: Generadores añadidos a la Base de Generadores**

<b>GENERADOR</b>	<b>Basura (Litros)</b>
<b>Asistencia Publica Central (Posta Central por Diagonal Paraguay)</b>	3.000
<b>Torre Entel</b>	3.850
<b>Mall del Centro</b>	22.850
<b>Aguas Andinas</b>	2.310
<b>Consejo de Defensa del Estado</b>	200
<b>Mall Chino Alameda Norte-Oriente</b>	1.500
<b>Instituto de Inteligencia</b>	1.440

Fuente: Jefes de Zona, Municipalidad de Santiago

Luego, y como parte del proceso de verificación y geocodificación se eliminaron 5 generadores porque no existían sus direcciones en la Comuna; 2 porque sus direcciones estaban en la comuna de Providencia; y 1 porque ya no le retiraban basura extra. La distribución de los 316 registros finalmente geocodificados se muestra en la siguiente figura.

Figura 27, Generadores Complejos



Fuente: Elaboración propia, a partir de Base Aseo Extra y Jefes de Zona

### 3.2.4.2 Generadores Puntuales

Los generadores puntuales fueron caracterizados a partir de una base que registra todos los permisos de construcción de edificios de vivienda de la Municipalidad de Santiago entre 1990 y el 2012 (CORDESAN). Esta base fue complementada con la información levantada en el Precenso 2011, que registra los edificios de viviendas de más de 5 pisos. Es importante mencionar, que se utilizó la base de Precenso como complementaria, ya que el levantamiento de esta información no es riguroso, pues con esa información solo se pretendió en su oportunidad dimensionar las cuadrillas de encuestadores para el Censo.

Luego de analizar las bases, se generó un consolidado de edificios de viviendas que representa los generadores puntuales.

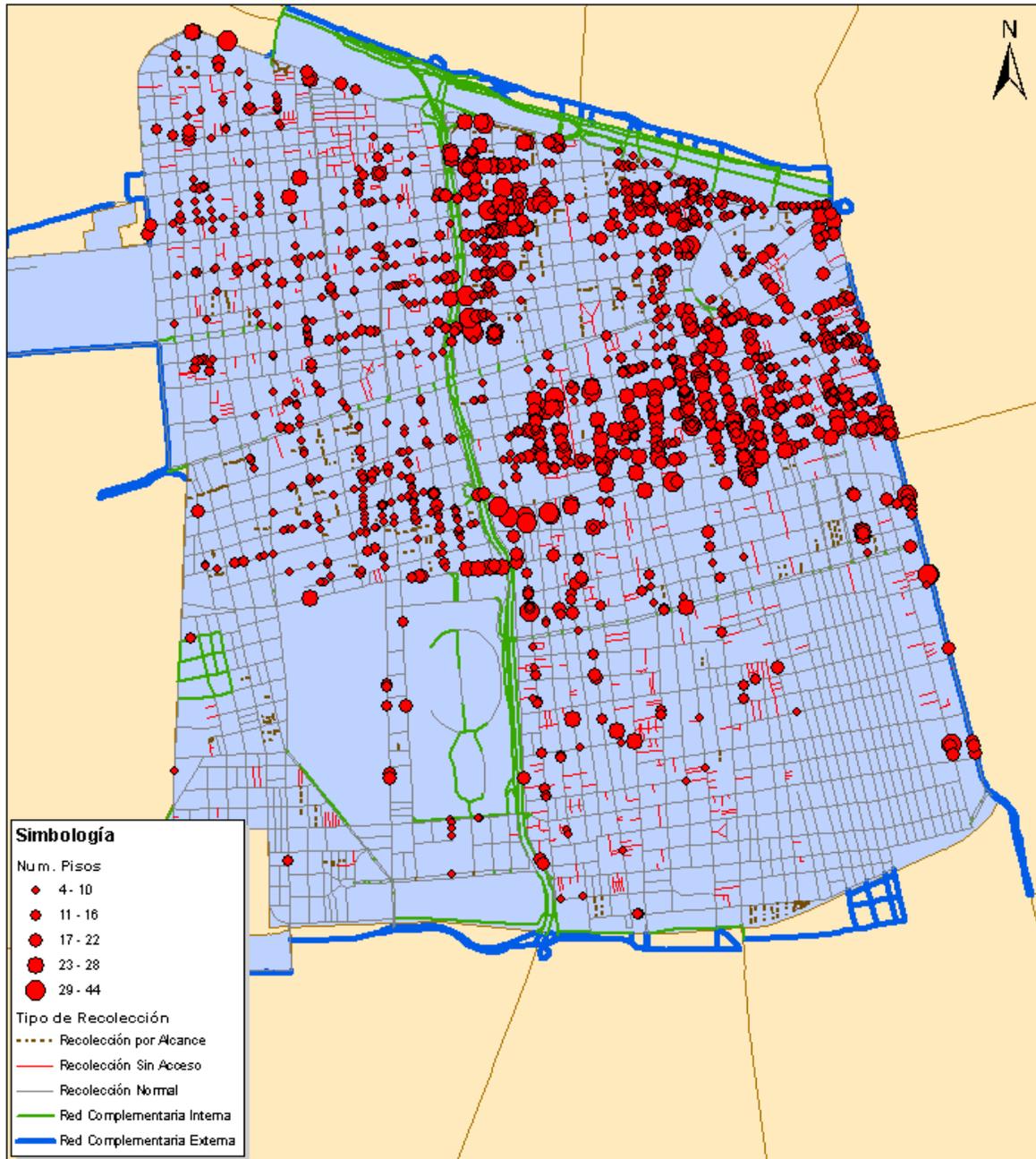
**Tabla 10: Análisis Bases de Edificios**

Detalle	Número de Registros
<b>BASE DE DATOS Permisos de Edificación</b>	<b>649</b>
Direcciones Únicas Base Perm. Edif. (1)	640
<b>BASE DE DATOS Precenso</b>	<b>883</b>
Direcciones Únicas Base Precenso	812
Direcciones de BD Precenso no existentes en Perm. Edificación (2)	603
Registro Consolidado de Edificios (1)+(2)	1.243
Registros del Consolidado de Edificios con Número de Pisos	1.131
Registros Consolidado de Edificios con Número de Viviendas	617

**Fuente: Elaboración propia a partir de las Bases CORDESAN y PRECENSO**

Para los 112 edificios que no tenían información del número de pisos, se obtuvo esta información utilizando la aplicación Street View, a 13 de estos edificios no se encontró la dirección, por lo que fueron eliminados de la base. De esta manera, se podrá estimar la generación de basura de cada edificio, según el número de pisos. La base de edificios de vivienda de la comuna de Santiago, quedó distribuida geográficamente según se observa en la siguiente figura.

Figura 28, Distribución y Cantidad de Pisos Edificios de Vivienda



Fuente: Elaboración propia a partir de las Bases CORDESAN y PRECENSO

Para identificar los generadores puntuales (edificios de vivienda que disponen basura en contenedores), se consideró el Título III Almacenamiento de basura domiciliar, de la Ordenanza 77 de la Municipalidad de Santiago, que establece que todos los edificios de vivienda de 4 pisos o más, deben acumular su basura en contenedores comunitarios. Con esta consideración, de la base de edificios, 1.216 (98%) de ellos cumplen con esta condición.

La relación que existe entre los contenedores comunitarios (edificios de vivienda de 4 pisos o más) y los generadores puntuales se sustenta en que de acuerdo a las Bases de Licitación, los generadores puntuales:

- a) Representan fundamentalmente condominios; y
- b) Se asume que su basura aparece en la calle minutos antes del paso del camión

En consecuencia, cumplirían estas dos condiciones solo edificios que posean administración, los cuales a través de los conserjes y/o personal de apoyo se preocupan de sacar la basura en los momentos adecuados (contenedores comunitarios → administración → sacada de basura coordinada con paso de camión).

Paralelamente, y previa normalización de los nombres de ejes, se analizó la base de roles asociados a uso habitacional. Así, se agruparon los roles de uso habitacional con igual nombre de eje y número. Para identificar los edificios de vivienda, se seleccionaron todas aquellas direcciones con al menos 50 roles de uso habitacional, que no pertenecieran a la base de cités y que la dirección original no hicieran referencia a un número de casa. Los resultados de este análisis fueron:

**Tabla 11: Análisis Base Roles Uso Habitacional**

<b>Análisis</b>	<b>Número de Registros</b>
<b>Direcciones con más de 50 roles habitacionales</b>	<b>593</b>
<b>Direcciones con más de 50 roles habitacionales y que no están contenidas en la base de edificios</b>	<b>101</b>

**Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Roles**

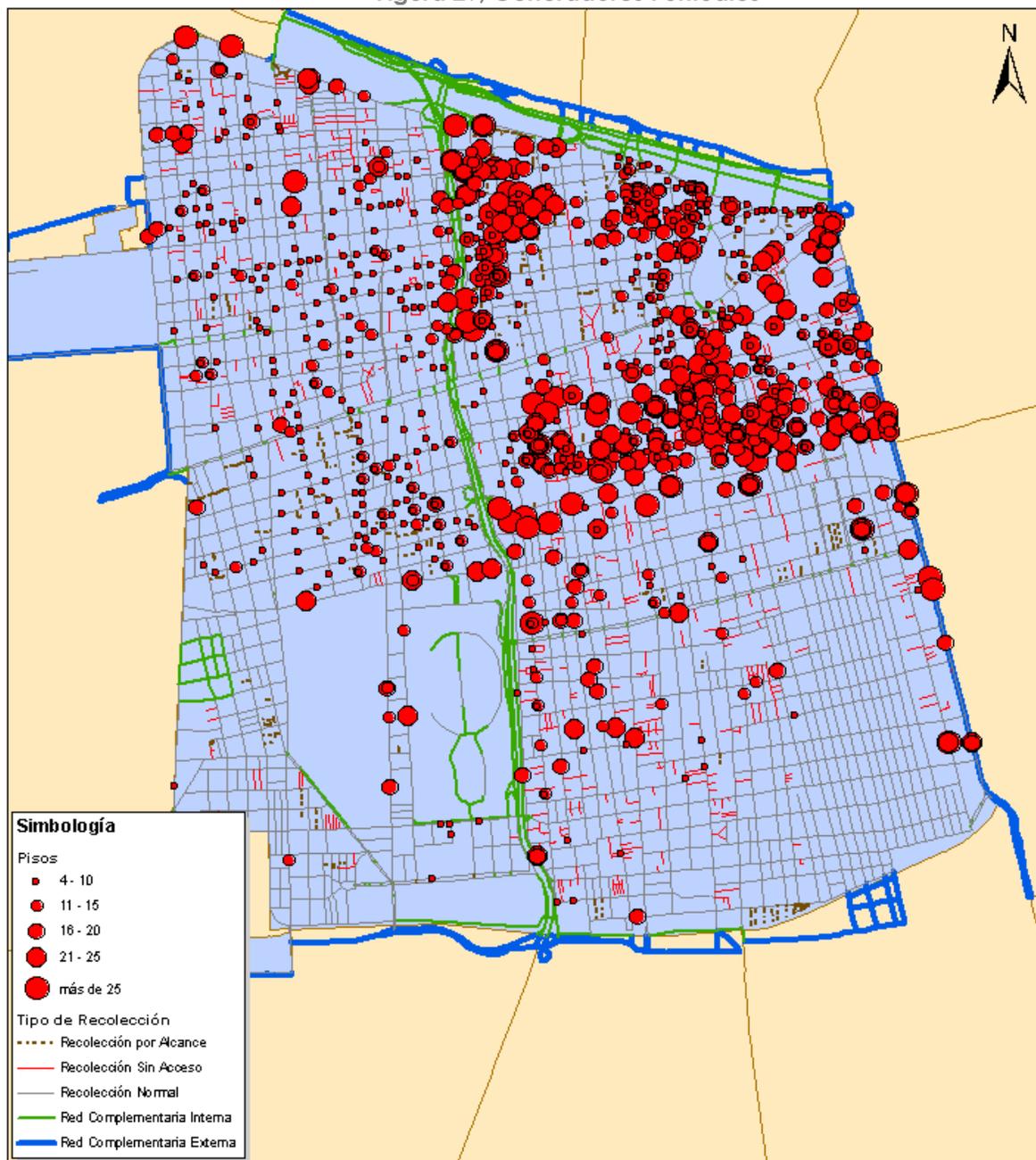
De este análisis se concluye que:

- ✓ Las bases de edificios entregadas por el Municipio no registran todos los edificios existentes en la comuna, o bien, las direcciones registradas en la base de los permisos de edificación, no fue la dirección definitiva del edificio.
- ✓ La base de roles no registra, al menos, todos los roles habitacionales asociados a edificios de la comuna.

En consecuencia, los generadores puntuales finalmente considerados fueron los 1.216 edificios identificados en las bases de edificios entregadas por el Municipio, más los 101 edificios identificados a partir de la base de roles, que no se encontraron en los 1.216 registros de la base de edificios. Estos 101 edificios, corresponden a 26.932 registros de roles asociados a uso habitacional, estacionamientos y bodegas. Es importante mencionar que todos los edificios de vivienda de la base de edificios que no tienen al menos 4 pisos, fueron incorporados en la base de roles, cuando no había registro de ellos.

La distribución en la comuna de Santiago de estos 1.317 generadores puntuales, correspondiente a edificios de vivienda de al menos 4 pisos, se muestra en la figura siguiente.

Figura 29, Generadores Puntuales



Fuente: Elaboración propia a partir de las Bases de Roles, CORDESAN y PRECENSO

### 3.2.4.3 Generadores Cités

Como parte de la Consultoría se debían considerar los cités como un tipo de generador que concentra la basura de un grupo de viviendas y que debe tener asociado un tiempo mayor de carga de basura, ya que los cargadores por lo general deben ingresar a estos pasajes a buscar la basura (Recolección sin Acceso).

Por este motivo el Municipio entregó 2 bases que registran los cités. La primera, un listado de 529 cités y el segundo, una cobertura espacial obtenida a partir de una fotointerpretación de una

imagen satelital. Debido a que esta última no había sido validada aún por el Municipio, se decidió usar como referencia el listado de 529 pasajes y cités, los que fueron geocodificados.

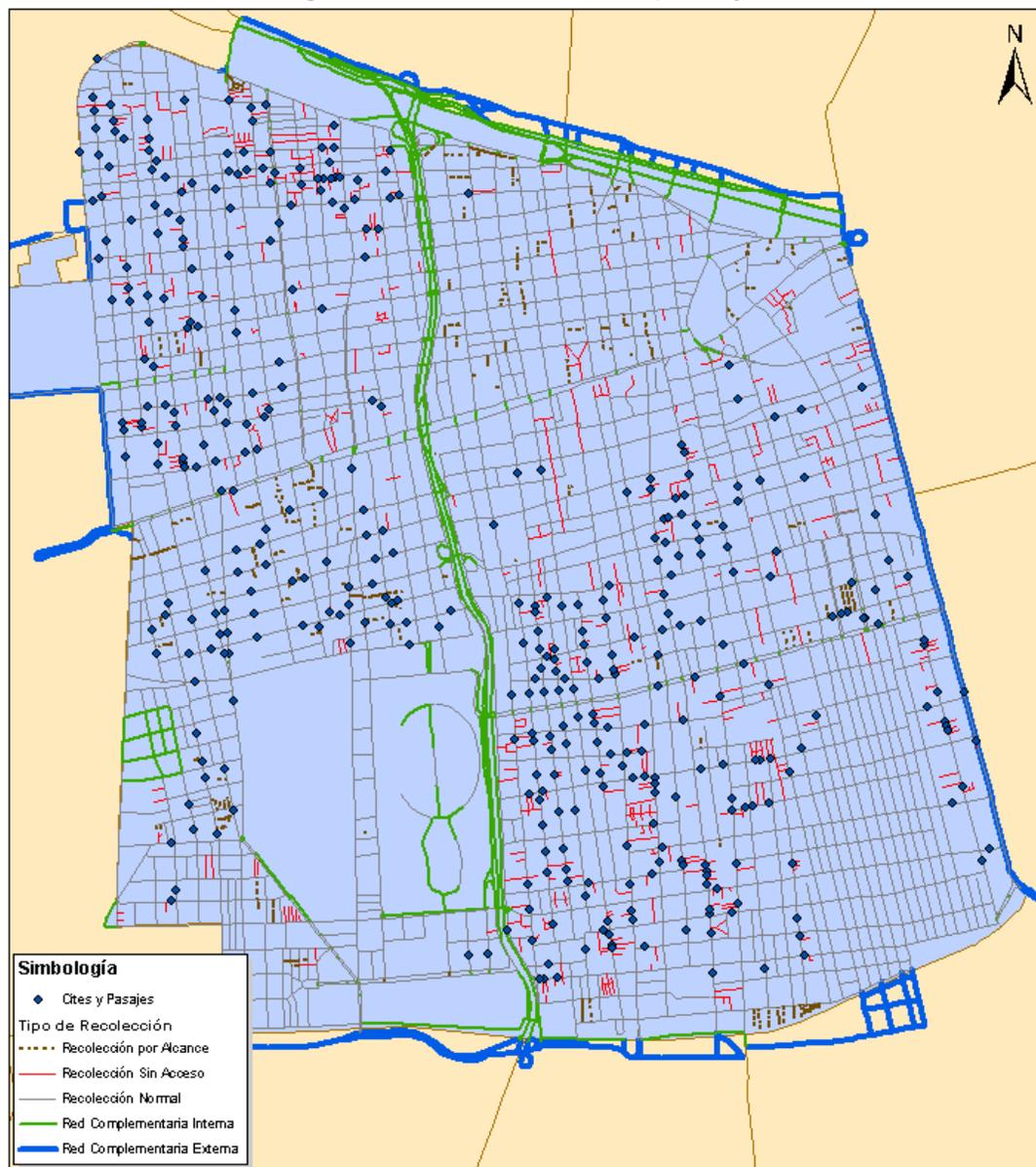
**Tabla 12: Análisis Listado Cités y Pasajes.**

Análisis	Número de Registros
Listado Cités y Pasajes	529
Direcciones Duplicadas	3
Cités y Pasajes Geocodificados	526

Fuente: Elaboración propia a partir del Listado de Cités

El resultado de la geocodificación de cités y pasajes se muestra en la siguiente figura.

**Figura 30, Generadores Cités y Pasajes**



Fuente: Elaboración propia a partir del Listado de Cités

### 3.2.4.4 Generadores Simples

Para la identificación de generadores simples, se consideró como base el Registro de Roles entregado por el Municipio de Santiago. De esta base se eliminaron los registros coincidentes con las bases de generadores complejos, puntuales, cités y los que cuentan con aseo servicios de aseo particular.

Luego, se agregaron los registros correspondientes a los edificios de vivienda de menos de 4 pisos y que no estaban en la base de roles.

Finalmente, los registros de roles con las modificaciones anteriores fueron geocodificados y considerados como generadores simples. A continuación se detallan los registros coincidentes por base y la distribución de estos roles de generadores simples, según uso.

**Tabla 13: Análisis Base Roles**

	Número de Registros en Base Roles	Número de Registros	Total Base
<b>Base de Roles</b>	273.154	273.154	273.154
<b>Coincidencias Base Complejos</b>	42	42	310
<b>Coincidencias Base Puntuales</b>	150.751	792	1.312
<b>Roles Edificios Vivienda</b>	26.932	101	273.154
<b>Coincidencias Base Cités y Pasajes</b>	3.838	395	526
<b>Coincidencias Base Aseo Particular</b>	317	29	70
<b>Edificios de menos de 4 pisos, Base Edificios</b>	312	11	11
<b>Roles Generadores Simples</b>	92.016	92.016	273.154
<b>Roles Generadores Simples Geocodificados</b>	87.556	87.556	273.154

Fuente: Elaboración propia, a partir de la Base de Roles y de bases complementarias

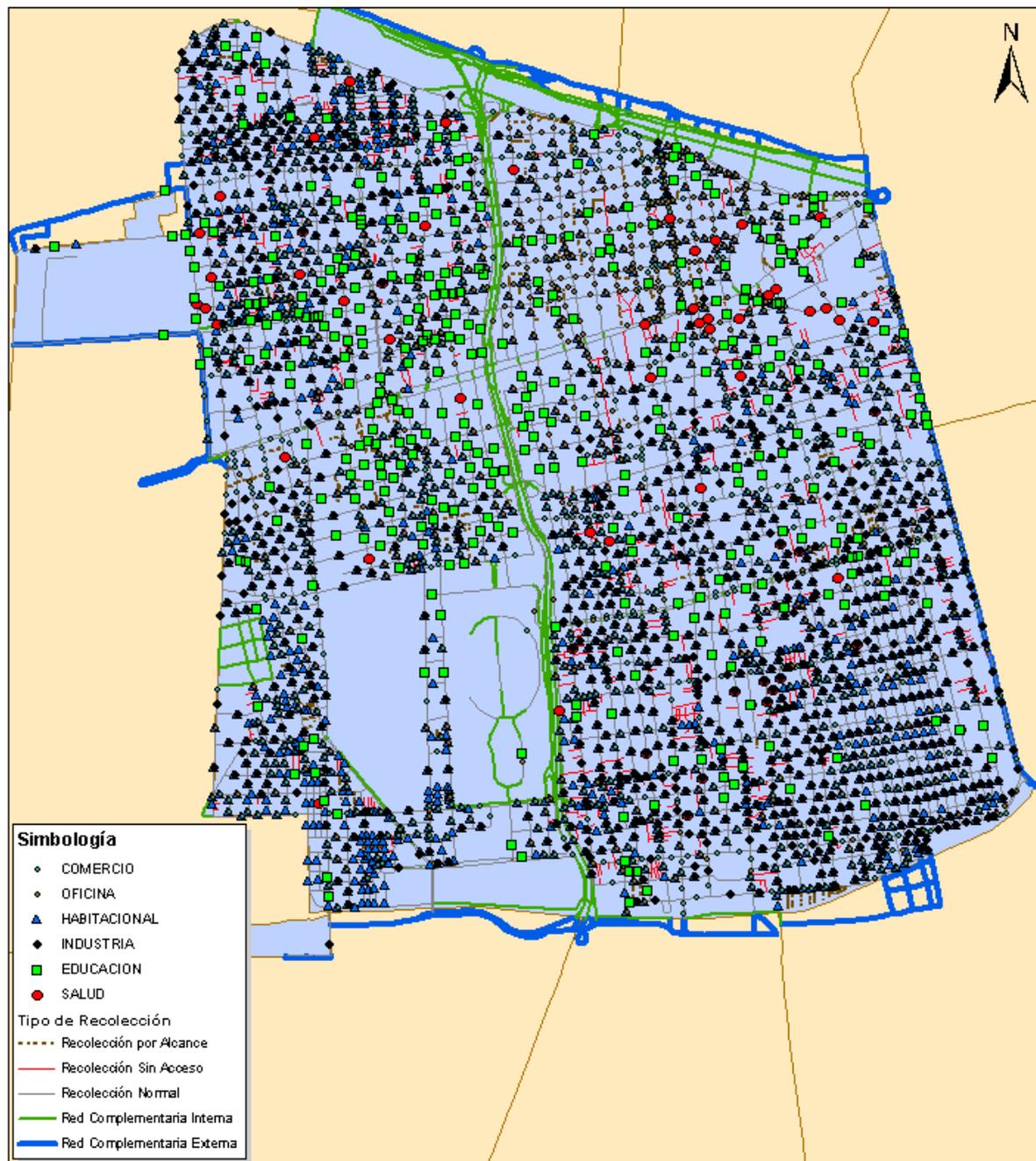
**Tabla 14: Análisis de Destino de Usos de los Generadores Simples Geocodificados**

Destinos	Roles
<b>Administración pública</b>	141
<b>Bodega</b>	3.367
<b>Comercio</b>	18.969
<b>Culto</b>	169
<b>Deporte</b>	41
<b>Estacionamiento</b>	18.416
<b>Habitacional</b>	27.447
<b>Hotel motel</b>	301
<b>Industria</b>	2.183
<b>Oficina</b>	14.469
<b>Otros no coincidentes</b>	166
<b>Salud</b>	112
<b>Sitio eriazo</b>	634
<b>Transporte y telecomunicaciones</b>	21
<b>Educación</b>	652

Fuente: Elaboración propia, a partir de la Base de Roles y de bases complementarias

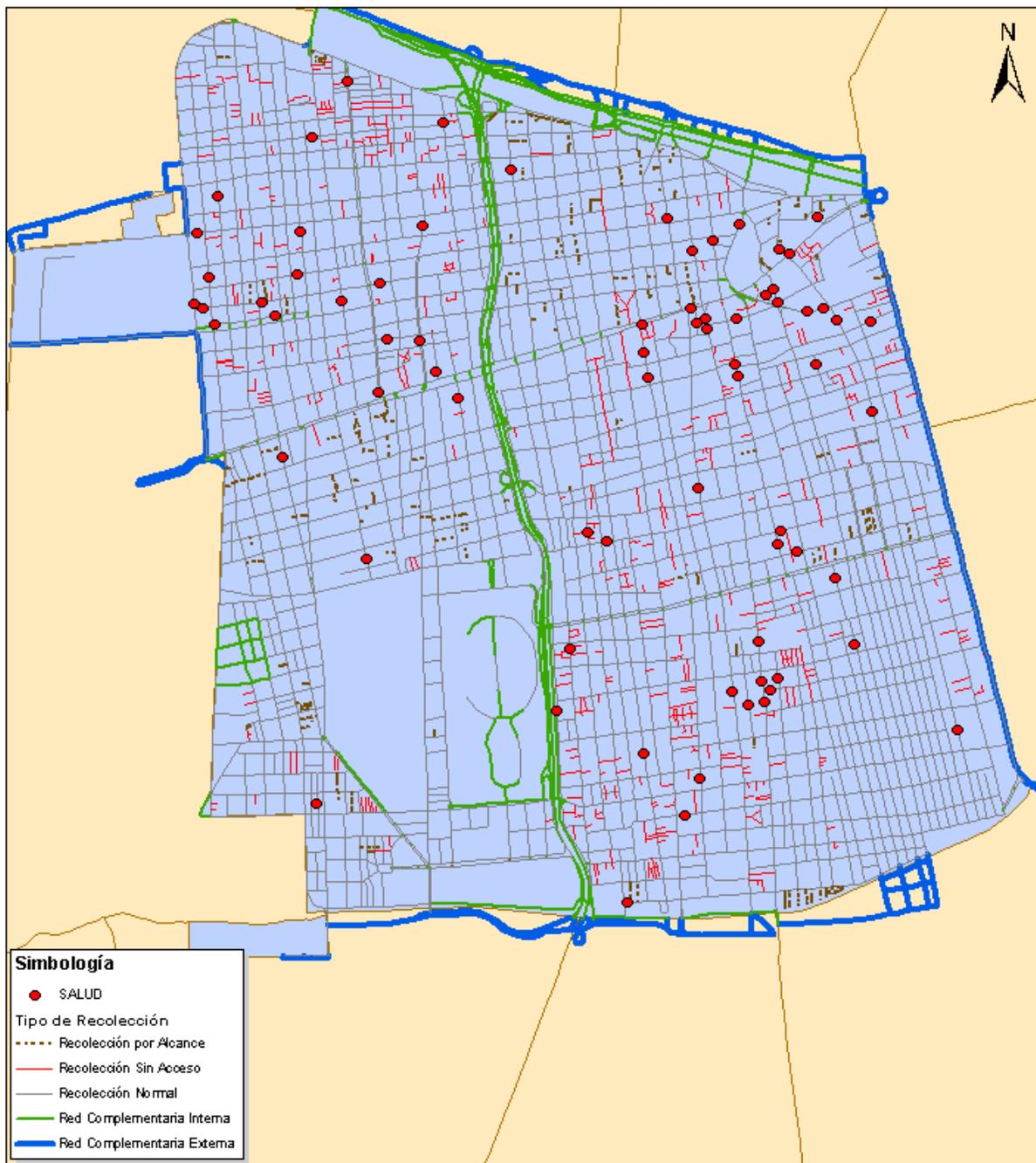
Como fuera señalado anteriormente, el cuadrante delimitado por las calles Exposición – Lincoln – Conferencia – Fray Luis de la Peña (ambas veredas excepto en Exposición) en la zona Poniente, cuenta con un servicio de recolección particular, por lo que todos los generadores geocodificados en dicho sector fueron eliminados de la base de generadores, dejando exclusivamente el único generador complejo del cuadrante.

Figura 31, Generadores Simples (todos los usos)



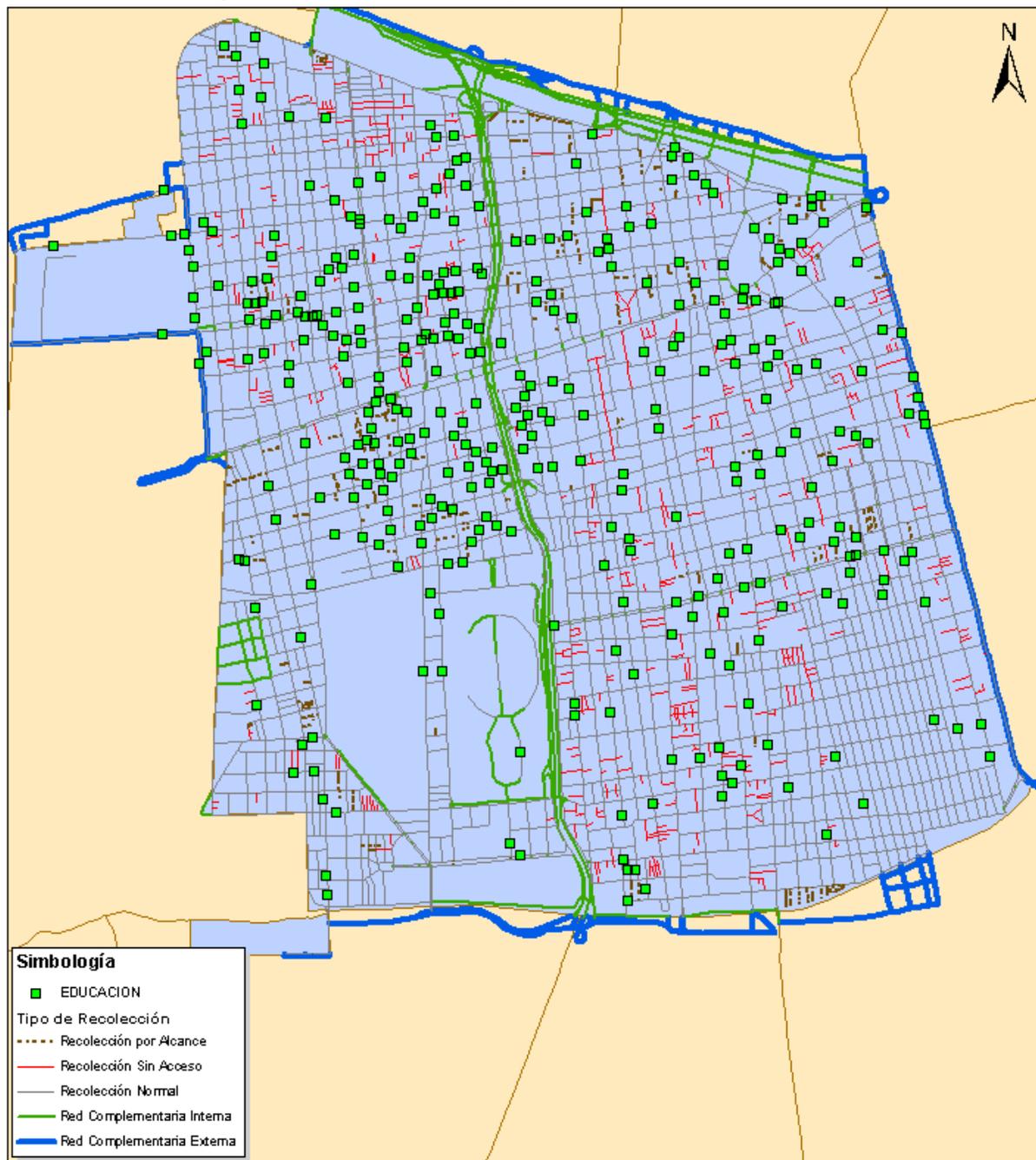
Fuente: Elaboración propia, a partir de la Base de Roles y de bases complementarias

Figura 32, Generadores Simples - Salud



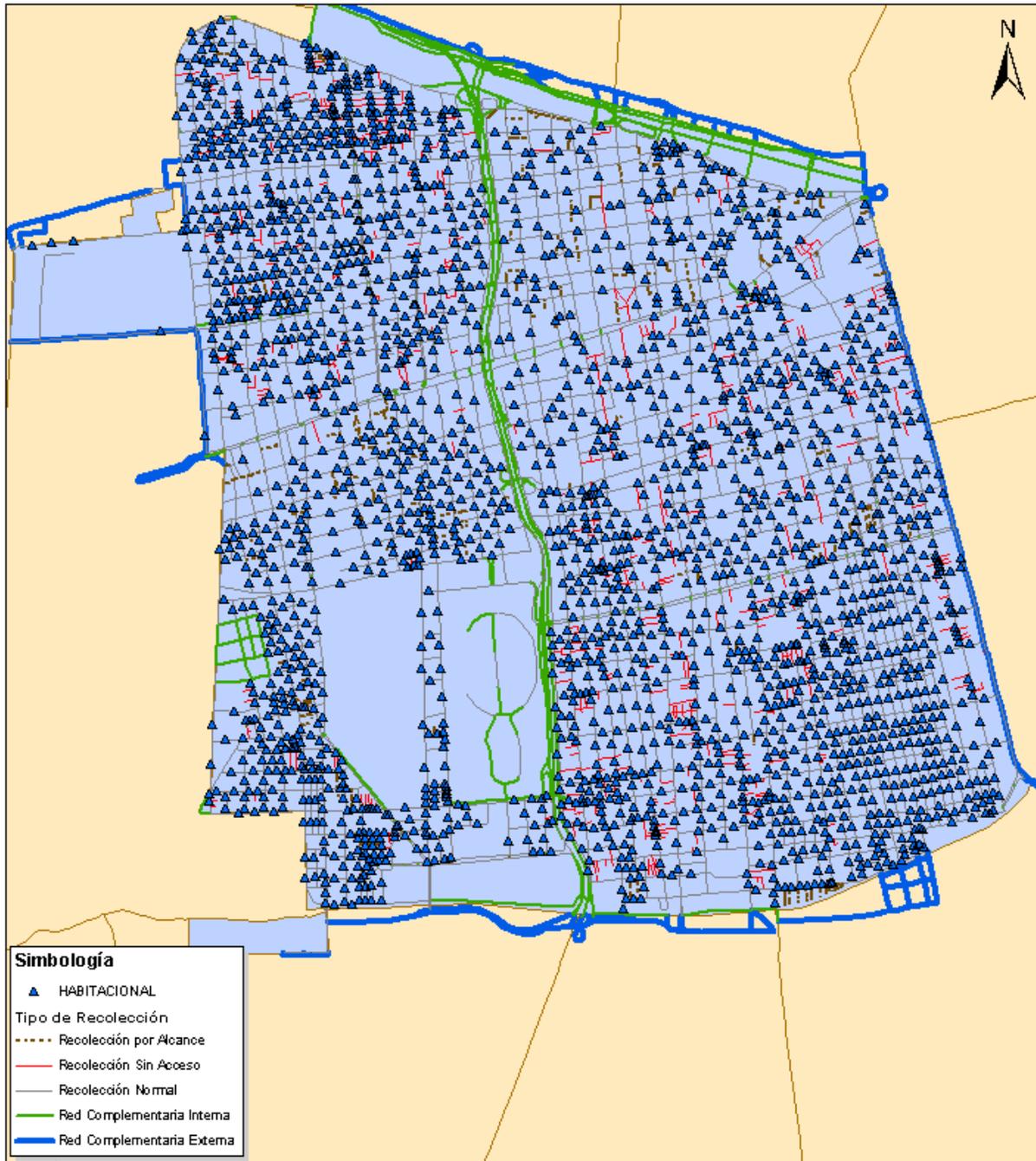
Fuente: Elaboración propia, a partir de la Base de Roles y de bases complementarias

Figura 33, Generadores Simples - Establecimientos Educativos



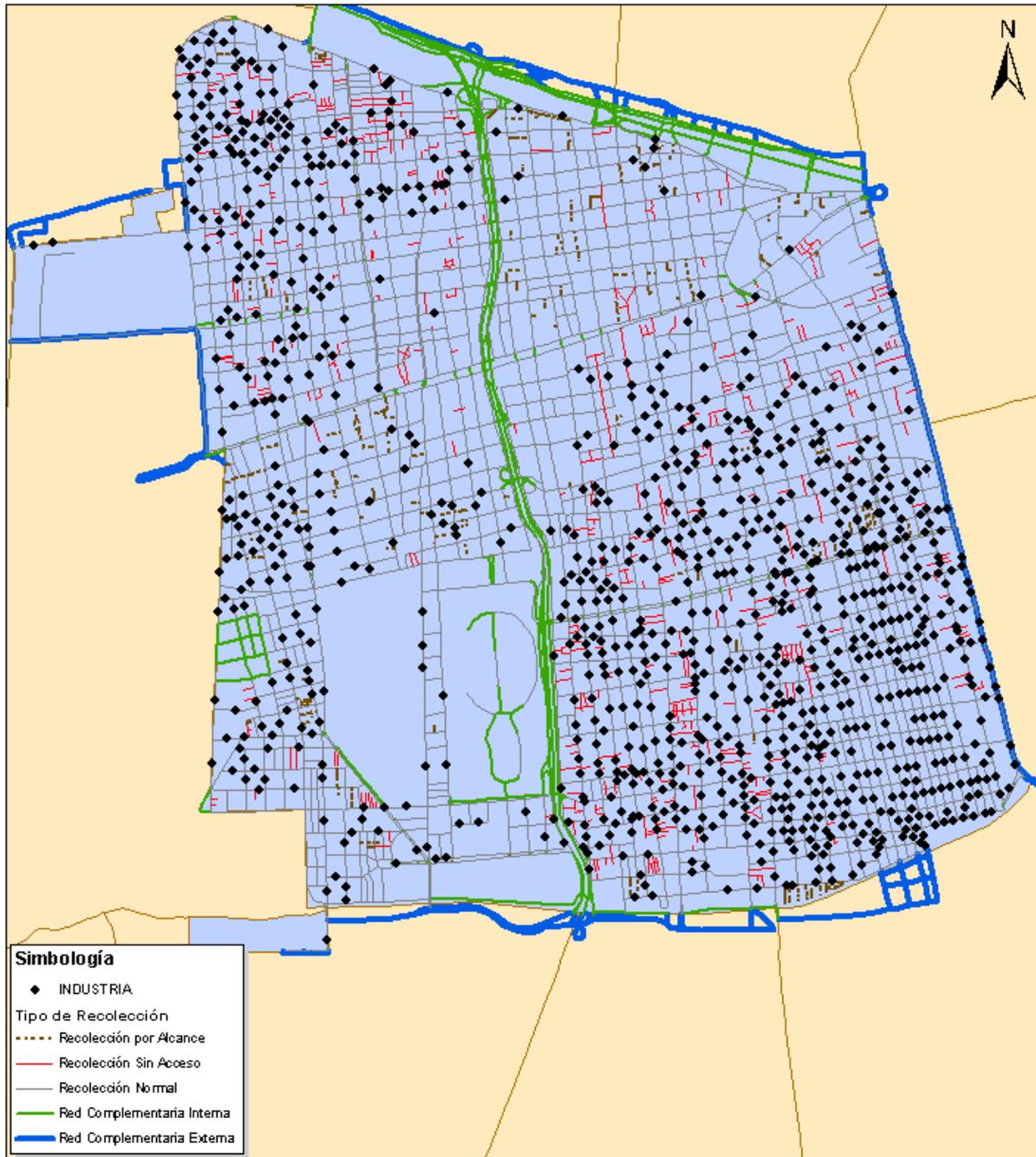
Fuente: Elaboración propia, a partir de la Base de Roles y de bases complementarias

Figura 34, Generadores Simples - Viviendas



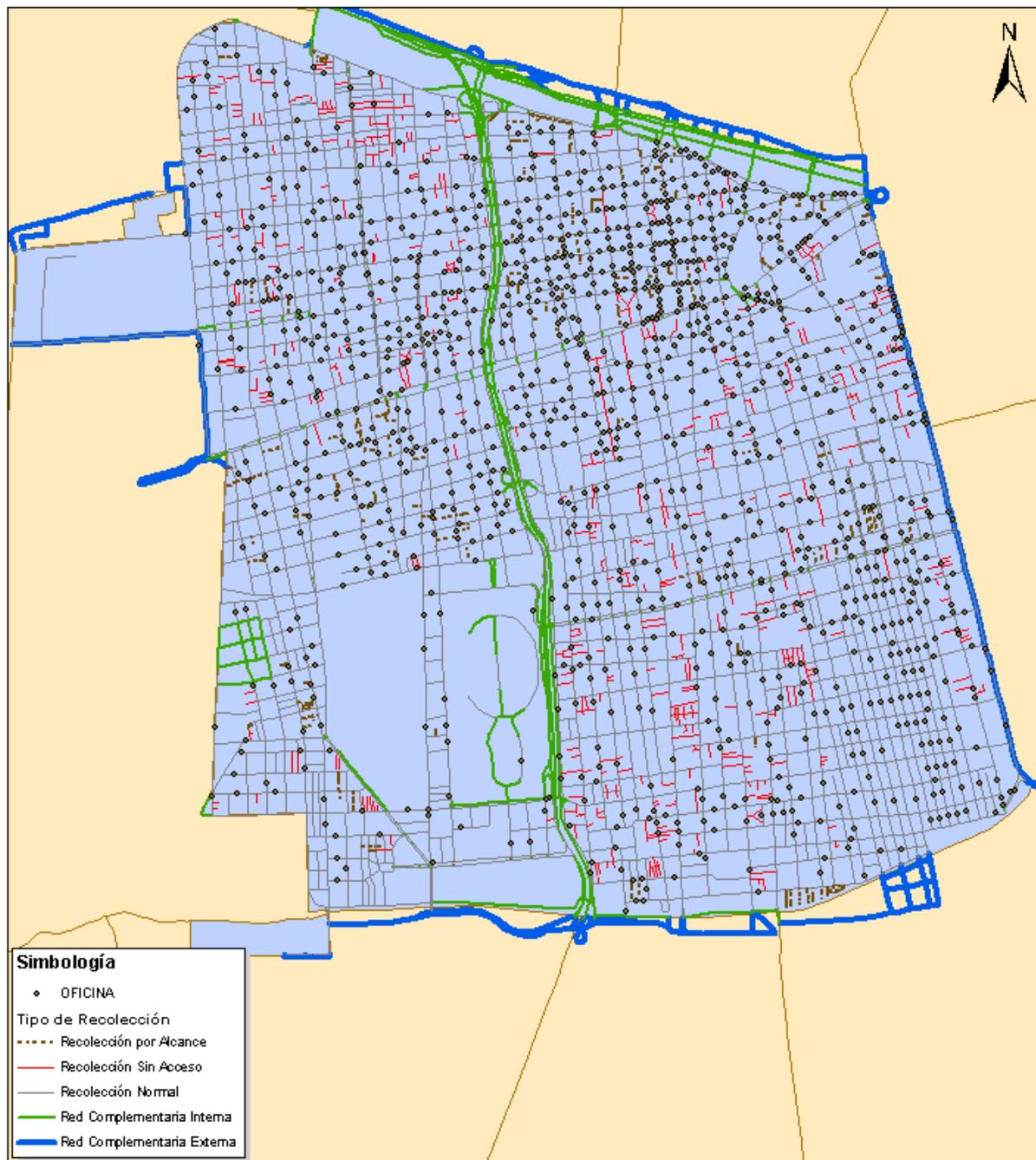
Fuente: Elaboración propia, a partir de la Base de Roles y de bases complementarias

Figura 35, Generadores Simples - Industrias



Fuente: Elaboración propia, a partir de la Base de Roles y de bases complementarias

Figura 36, Generadores Simples - Oficinas



Fuente: Elaboración propia, a partir de la Base de Roles y de bases complementarias

Figura 37, Generadores Simples - Comercios



Fuente: Elaboración propia, a partir de la Base de Roles y de bases complementarias

En resumen, se puede caracterizar las 4 zonas en las que se divide la comuna para organizar la recolección de basura, de la siguiente manera.

**Tabla 15: Cantidad de Generadores por Zona**

Tipo Generador	CENTRO-ORIENTE	ORIENTE	CENTRO-PONIENTE	PONIENTE
<b>PUNTUAL (Condominios)</b>	319	578	234	185
<b>CITÉ</b>	1	281	151	92
<b>COMPLEJOS</b>	96	78	72	68
<b>SIMPLES</b>				
<b>Administración Pública</b>	59	50	21	11
<b>Bodega</b>	1.113	1.619	366	269
<b>Comercio</b>	5.641	8.351	3.063	1.914
<b>Culto</b>	20	85	36	28
<b>Deporte</b>	3	20	9	9
<b>Educación</b>	94	250	160	148
<b>Estacionamiento</b>	10.882	6.572	410	552
<b>Habitacional</b>	2.714	12.648	6.838	5.247
<b>Hotel motel</b>	96	77	112	16
<b>Industria</b>	12	1.648	289	234
<b>Oficina</b>	10.947	2.591	634	297
<b>Otros no coincidentes</b>	23	80	37	26
<b>Salud</b>	14	67	24	7
<b>Sitio eriazo</b>	64	322	176	72
<b>Transporte y Telecom</b>	7	13	1	

Fuente: Elaboración propia. a partir de la Base de Roles y de bases complementarias

**Es importante señalar que dada la naturaleza y calidad de las bases de datos recibidas desde el Municipio, y a la consistencia entre ellas, la base de generadores consolidada como parte de esta Asesoría no representa un catastro de generadores ni posee la cantidad real de generadores existentes en la comuna, sino que corresponde a la mejor caracterización posible. Esto fue considerado en las etapas de modelación, y ejemplos de errores o imprecisiones de ellas se muestran en el Anexo 8.1.**

### 3.3 RECOLECCIÓN ANUAL EN 2013

La base de datos del Procesador de Basura de la Estación de Transferencia de KDM, disponibilizada por Municipio, contiene el registro de recolección de basura domiciliaria de la comuna de Santiago del año 2013. En efecto, cada vez que un camión deposita basura en KDM se genera un nuevo registro en la base de datos.

Cada registro contiene la patente del camión, código del camión, nombre del conductor, fecha y hora de descarga de basura, hora de entrada y salida de KDM, zona de la comuna, código del servicio (sector de la comuna), kilos de basura recolectados, peso del camión, entre otros.

Las próximas secciones analizan esta base de datos respecto a oferta de recolección y generación de basura.

#### 3.3.1 Oferta Ejecutada en 2013

En la comuna la recolección de basura se organiza a nivel de zonas y sectores. Como fuera señalado anteriormente, existen 4 zonas que a su vez se subdividen y forman un total de **35 sectores o servicios**, de los que se retiran desechos en distintos horarios y con diferente periodicidad. Además de los servicios regulares de estos 35 sectores, existen servicios de retiro de basura especiales (retiro de escombros y otros).

La base de datos solo contiene información de vehículos del Municipio, y en ella se identifican 35 patentes durante todo el 2013, seis de las cuales realizaron menos de diez servicios en el año y dos de ellas realizaron más de mil. La siguiente tabla entrega información de la distribución de los servicios entregados según peso del camión. Se muestran cuatro categorías de tipos de camiones, el rango de peso (tara mínima y máxima) de la categoría, el número de patentes por categoría y el número de servicios regulares y especiales realizados durante el año.

Tabla 16: Descripción general de los datos

Categoría	Tara Mín(kg)	Tara Máx(kg)	Nº de patentes	Nº Servicios Regulares	Nº Servicios Especiales	Nº Total Servicios
1	6.710	6.780	2	0	2	2
2	8.360	8.480	2	5	422	427
3	9.870	10.900	6	81	13	94
4	12.720	13.750	25	15.754	1.803	17.557

Fuente: Elaboración propia en base a registros de descarga de residuos de KDM de 2013

En total se realizaron 18.080 viajes a KDM en el año 2013, de los cuales 17.977 correspondieron a servicios regulares y 103 a servicios no regulares. Los camiones de categoría 1 son de tipo tolva, por lo que no se trata de basura domiciliaria correspondiente a algún servicio regular.

Asimismo, los camiones de categoría 2 corresponden a camiones de 6 metros cúbicos de capacidad destinados a la recolección de la basura proveniente del barrido en la zona centro-oriente, aunque como se observa en la siguiente tabla, son también usados (aunque en menor medida) en otro tipo de servicios.

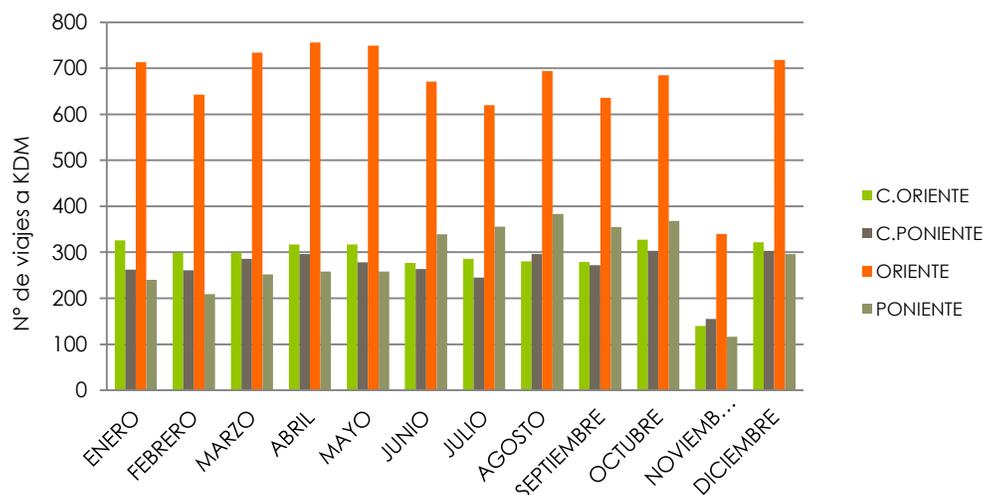
Tabla 17: Detalle oferta ejecutada por camiones de categoría 2 por día y jornada, total 2013

DIA	JORNADA	C.ORIENTE	C.ORIENTE	ORIENTE	PONIENTE
LUN	DIARIO MAÑANA	7			
	DIARIO NOCHE	5			
	DIARIO TARDE	63			
	NOCTURNO	2			8
MAR	DIARIO MAÑANA	8			
	DIARIO NOCHE	13			
	DIARIO TARDE	64			
	NOCTURNO	1			3
MIE	DIARIO MAÑANA	4			
	DIARIO NOCHE	10			
	DIARIO TARDE	49			
	NOCTURNO				4
JUE	DIARIO MAÑANA	6			
	DIARIO NOCHE	10			
	DIARIO TARDE	51			
	NOCTURNO				5
VIE	DIARIO MAÑANA	14			
	DIARIO NOCHE	15			
	DIARIO TARDE	54			
	NOCTURNO				9
SAB	DIARIO MAÑANA	1		1	
	DIARIO NOCHE	6			
	DIARIO TARDE	13			
DOM	DIARIO TARDE	1			
<b>Total general</b>		<b>397</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>29</b>

Fuente: Elaboración propia en base a registros de descarga de residuos de KDM de 2013

Como se mencionó anteriormente, la comuna se encuentra dividida geográficamente en 4 zonas: Centro-Oriente. Centro-Poniente. Oriente y Poniente. Se observa que los camiones de la categoría 2 realizan la mayoría de sus viajes en la zona Centro-Oriente en la jornada Diario Tarde. Sin embargo, durante el año 2013 dichos camiones prestaron servicios en otros 13 sectores o servicios.

El siguiente gráfico muestra la oferta ejecutada (n° de viajes) de servicios de recolección de basura registrados mensualmente a nivel de zona en 2013:

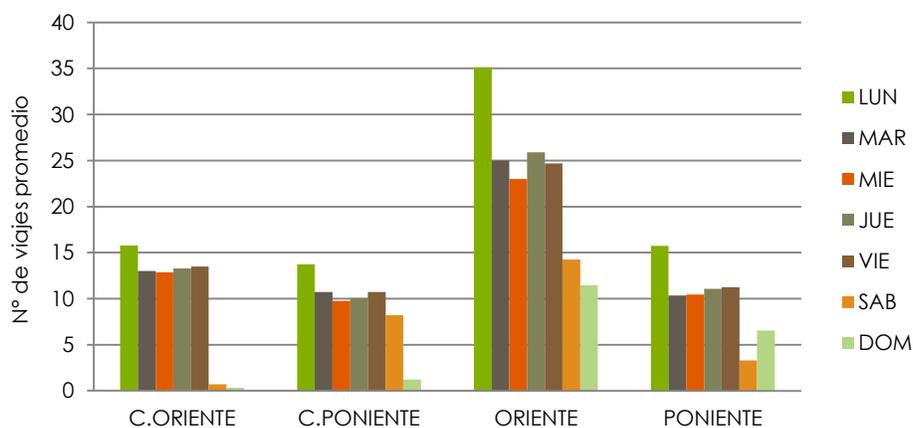
**Gráfico 1: Oferta ejecutada por zona y mes**

**Fuente:** Elaboración propia en base a registros de descarga de residuos de KDM de 2013

Los días 29 y 30 de julio, y entre el 7 y 20 de noviembre, no se registran servicios de recolección de basura por paro de trabajadores. Esto explica que el mes de noviembre presente una oferta ejecutada particularmente baja. Los efectos de la ausencia de registros durante los días de paro y registros anómalos en los días siguientes al paro se abordarán en análisis posteriores.

La Zona Oriente presenta el mayor número de servicios mensuales efectuados durante el año, duplicando a las otras zonas durante la mayoría de los meses del año. Por cierto, el gráfico previo considera en la oferta ejecutada de las zonas Oriente y Poniente los servicios realizados en jornada nocturna, por la Zona operacional nocturna.

Para observar cómo se distribuyen durante la semana los servicios entregados mensualmente, el siguiente gráfico muestra el número promedio de expediciones enviadas a cada zona para recolectar basura, por día de la semana.

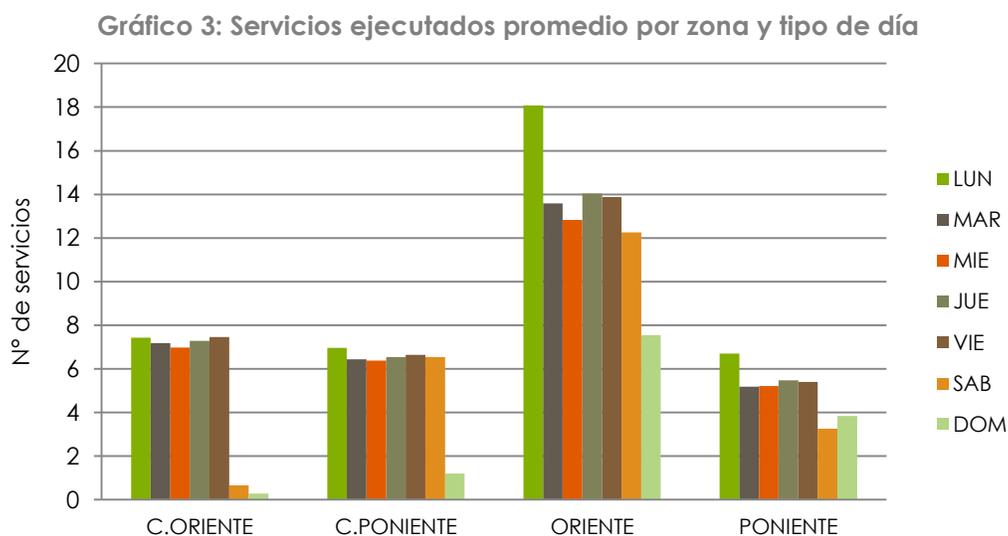
**Gráfico 2: Oferta ejecutada promedio por zona y tipo de día**

**Fuente:** Elaboración propia en base a registros de descarga de residuos de KDM de 2013

A priori es esperable que la cantidad de servicios efectivos en cada zona (gráfico anterior) tenga alguna proporcionalidad con la cantidad de generadores o con la cantidad de km viales de la respectiva zona. Por lo mismo como parte de la presente asesoría se desarrolló y calibró un modelo de generación de residuos, el cual se muestra más adelante.

En las 4 grandes zonas se observa servicios durante los siete días de la semana, aunque en diferentes proporciones (notar que presencia de servicios en las 4 zonas no implica que esto ocurra a nivel de los 35 sectores). En todas las zonas se observa que el día lunes se generan la mayor cantidad de expediciones de la semana y que de martes a viernes la oferta de servicios es similar. Los sábados y domingos se observan ofertas decrecientes, salvo en la zona Poniente, debido a que no se presta servicios nocturnos los días sábado (salvo excepciones). La oferta observada el día sábado corresponde principalmente a los servicios diarios.

Si observamos los servicios entregados por zona (independiente del número de viajes que se realice a cada sector) se observa una distribución similar a lo observado en el gráfico previo, aunque los valores son aproximadamente la mitad. Esto indica que en promedio cada servicio genera diariamente dos viajes a KDM. Otra diferencia es que los días lunes se asemejan en mayor medida a los días martes a viernes en las zonas Centro-Oriente y Centro-Poniente. Esto indica que los días lunes estas zonas requieren más recolección que de martes a viernes para cubrir la demanda. A su vez, el día sábado se asemeja a los días laborales en cuanto a número de servicios entregados para las zonas Centro-Poniente y Oriente.

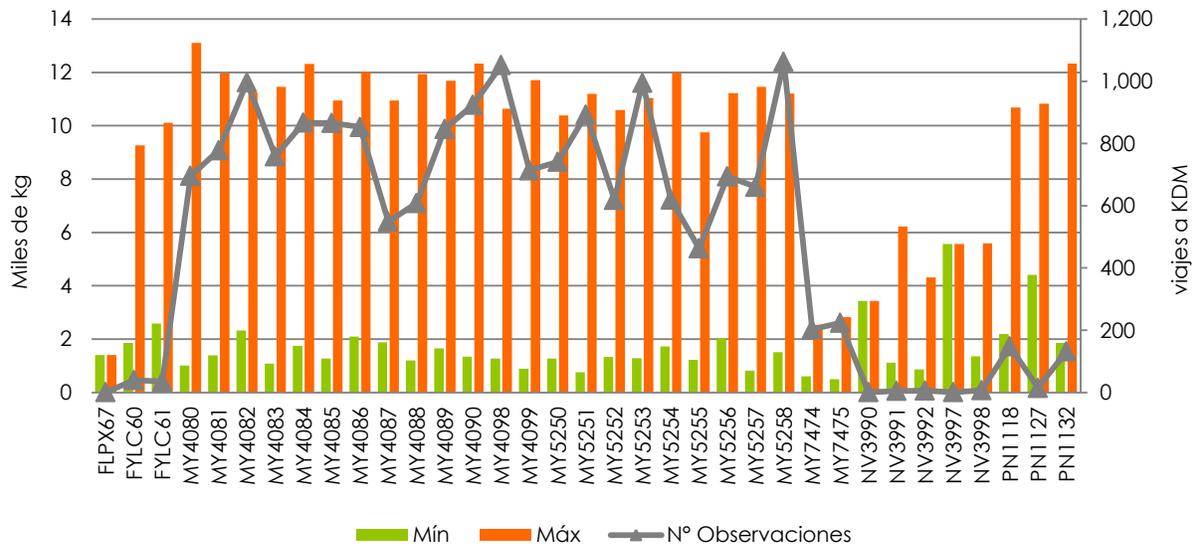


**Fuente: Elaboración propia en base a registros de descarga de residuos de KDM de 2013**

De acuerdo a lo señalado por la Dirección de Mantenimiento, el único día que no tiene recolección nocturna la zona Poniente es el día sábado para domingo, por lo que los prácticamente cuatro servicios en promedio identificados corresponden a servicios diurnos.

El siguiente gráfico muestra el mínimo y máximo peso (en kg) de basura retirada por las 35 patentes registradas durante el año 2013, además del número de servicios realizados por cada una. Se aprecian patentes con muy pocos viajes a KDM, lo que es natural considerando que la gráfica incluye todas las categorías de camión, incluyendo los camiones tolva y otros de apoyo, que en rigor no entregan servicios de recolección de residuos domiciliarios.

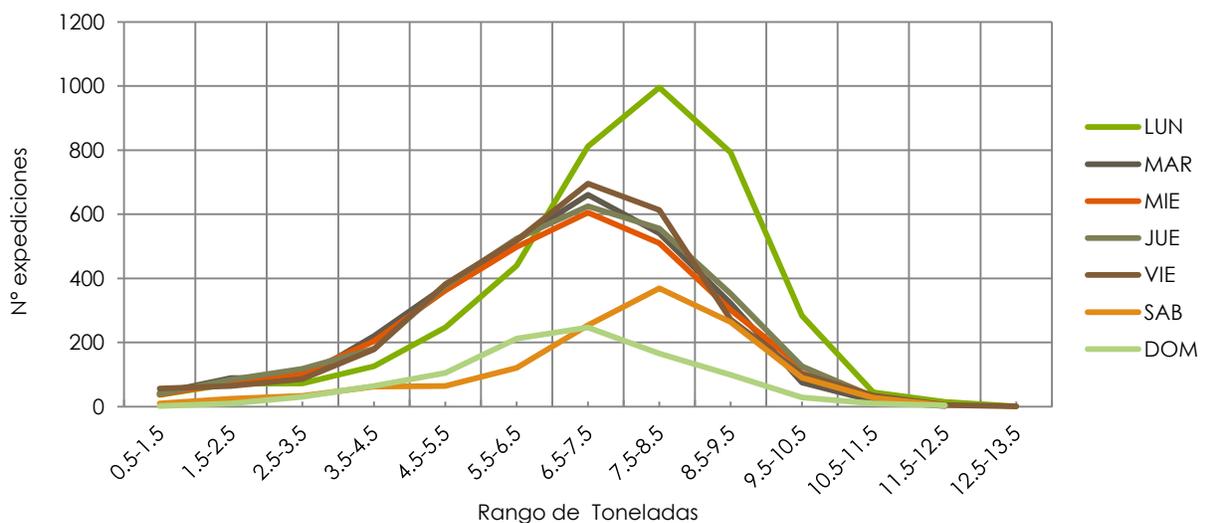
**Gráfico 4: Carga máxima y mínima por patente**



Fuente: Elaboración propia en base a registros de descarga de residuos de KDM de 2013

La mayoría de las patentes han llegado al procesador de basura con capacidad disponible. En efecto, si se considera que el promedio de carga de los camiones que llegan a KDM es de 6.800 kg, de los 18.080 servicios ejecutados durante el 2013, más de 3.000 contenían una carga inferior a los 5.000 kg por camión. Esto se evidencia en la gráfica siguiente, que muestra la alta dispersión de la carga en cada tipo de día, y las diferencias entre las modas de los tipos de día.

**Gráfico 5: Histograma de cargas por viaje a KDM y tipo de día**

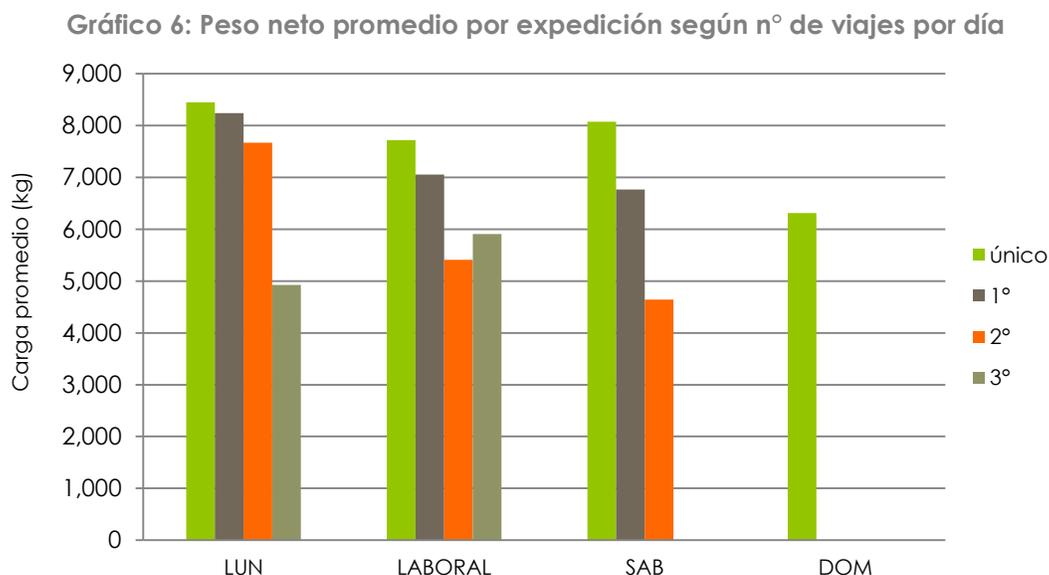


Fuente: Elaboración propia en base a registros de descarga de residuos de KDM de 2013

El gráfico muestra gran similitud entre los días martes a viernes y diferencias con el día lunes, tanto en la oferta entregada como en la cantidad promedio de basura por expedición. Por lo anterior, de cambiar la oferta de recolección el día lunes se debe otorgar un tratamiento distinto al día lunes respecto de los otros días laborales.

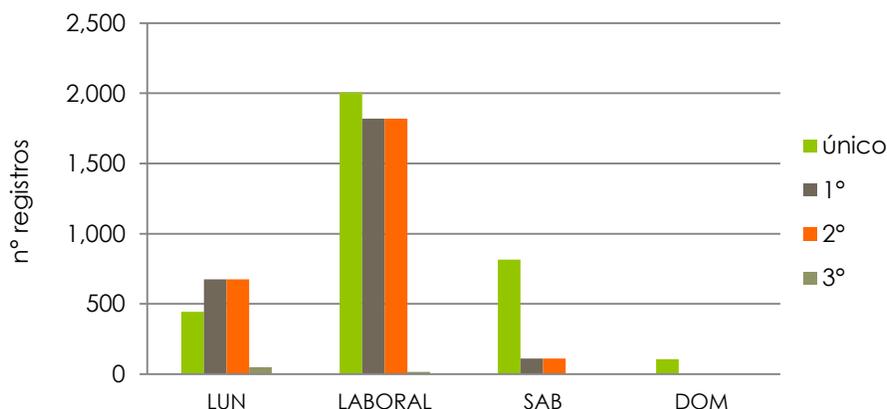
El día sábado existe un menor número de expediciones, aunque la carga promedio por camión es similar a la observada el día lunes. Esto puede deberse a que en algunas zonas se realiza un menor número de viajes el día sábado. El día domingo se observa una carga semejante por camión a los días martes a viernes.

El siguiente gráfico analiza los servicios que funcionaban en el primer semestre de 2013 en jornada Diurna de Mañana (servicios del 1 al 21) y la carga promedio por camión según número de viajes realizados a KDM. Cuando solo se realiza un viaje, se utiliza la etiqueta "único". Se utilizan las etiquetas 1°, 2° y 3° para identificar los casos en que se hace más de un viaje y cada etiqueta índice señala si se trata del primer, segundo o tercer viaje, respectivamente. Notar que los casos en que la etiqueta es 1° implican que se hizo al menos un segundo viaje, pero no necesariamente un tercer viaje.



**Fuente: Elaboración propia en base a registros de descarga de residuos de KDM de 2013**

Se observa que en todos los casos, cuando la recolección se realiza con un único viaje, la carga promedio es mayor. El día domingo solo se observan viajes únicos y el día sábado no existen registros en que se haya recolectado basura mediante 3 viajes. Además, al aumentar el número de viajes realizados se reduce la carga promedio del viaje. La excepción a esto ocurre de martes a viernes, aunque el promedio de carga del tercer viaje corresponde a un número reducido de casos estadísticamente no representativos. La siguiente tabla muestra la cantidad de registros con los que se calculó la tabla anterior:

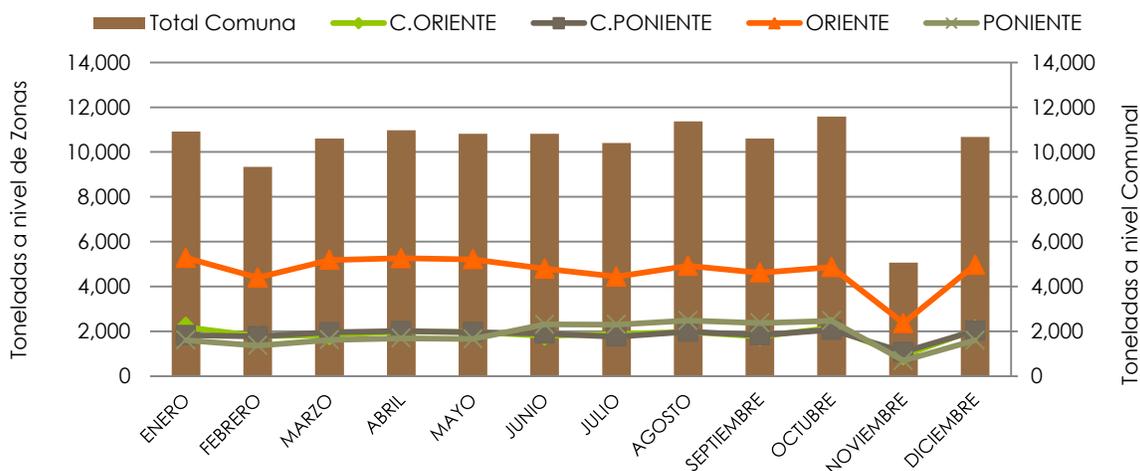
**Gráfico 7: Número de registros según n° de viajes por día**

Fuente: Elaboración propia en base a registros de descarga de residuos de KDM de 2013

Se observa que los días lunes es más común que se realice más de un viaje para recolectar basura, aunque hay viajes únicos por servicio. De martes a viernes se observa el caso contrario, pues es más probable realizar solo un viaje para recolectar la basura. Los días sábados la situación observada de martes a viernes se agudiza, pues la gran mayoría de las veces se recolecta la basura con un único viaje.

### 3.3.2 Generación de Residuos EN 2013

En esta sección se analiza la generación de basura de la comuna de Santiago. Aunque las características de operación de la oferta (recolección) tienen directa relación con la generación de desechos, analizar la generación permite identificar posibles diferencias entre oferta y demanda, y detectar patrones de la generación de basura que resulten relevantes para la posterior modelación. El siguiente gráfico muestra los residuos (Ton) retirados mensualmente en la comuna, en cada zona:

**Gráfico 8: Basura Total retirada mensualmente (Ton)**

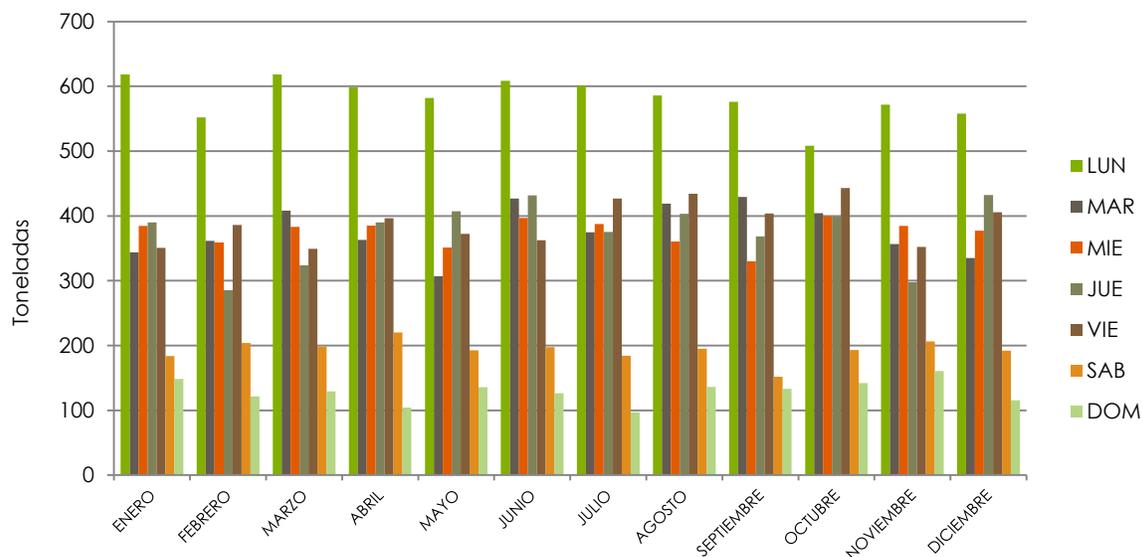
Fuente: Elaboración propia en base a registros de descarga de residuos de KDM de 2013

Se observa que el mes de octubre presentó la máxima generación de basura, con 11.6 mil toneladas de las 123 mil toneladas anuales. La zona Oriente concentra los mayores volúmenes de basura, produciendo más del doble de basura que las otras zonas (en concordancia con lo observado en el análisis de oferta). El mes de noviembre presenta niveles de basura menores debido a la ausencia de registros entre el 7 y 20 de noviembre por paro de actividades.

Como se explicó anteriormente, existen servicios regulares que retiran desechos de los 35 sectores en que se divide la comuna, y servicios no regulares y de otra especie que no se encuentran asociados directamente a estos sectores. Para la modelación de la generación de basura no se considera información de servicios no regulares o de otra especie, puesto que no son parte de los servicios de recolección abordados en esta Consultoría. Cabe señalar que dentro de la base de datos de KDM estos servicios retiran menos del 1% de la basura total.

Pensando en la posterior necesidad de modelar la basura generada, es relevante observar la generación de basura diaria en kg. El siguiente gráfico muestra el promedio diario de basura recolectada, por mes y tipo de día de la semana.

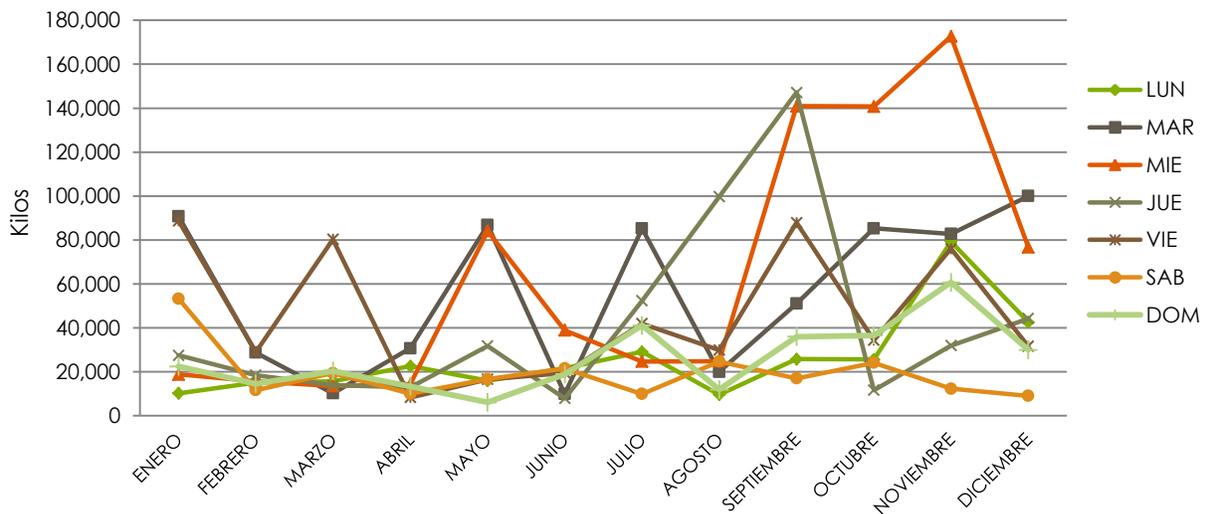
**Gráfico 9: Promedio de residuo recolectados por mes y tipo de día**



**Fuente: Elaboración propia en base a registros de descarga de residuos de KDM de 2013**

Al observar el promedio de basura diario generado por mes y día desaparece el efecto del paro (noviembre), puesto que los días sin operación no son considerados. Se observan importantes diferencias en la recolección de basura por día de la semana, efecto que se replica a lo largo del año.

Los días lunes se generan (recogen) cerca de 580.000 kg de basura a nivel comunal, mientras que de martes a viernes se generan volúmenes promedio de basura entre los 370.000 y 400.000 kg aproximadamente. Los sábados se recolectan cerca de 195.000 kg y los domingos 130.000 kg en promedio. A continuación se muestra la desviación estándar de residuos generados (en kg) por día y mes:

**Gráfico 10: Desviación estándar de residuos generados por mes y día**

**Fuente: Elaboración propia en base a registros de descarga de residuos de KDM de 2013**

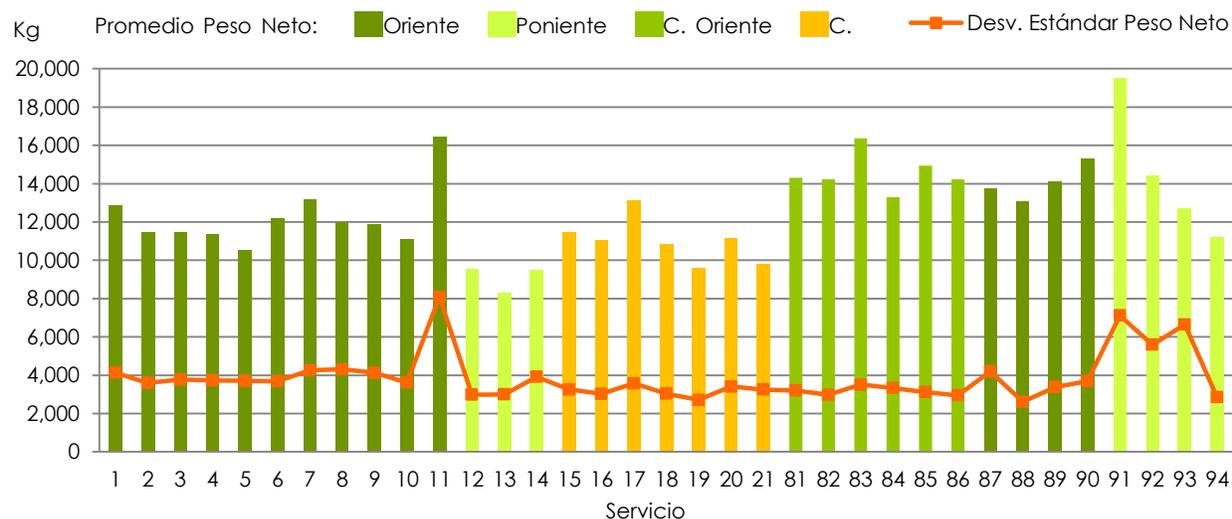
Se observa una mayor desviación estándar en los meses y tipos de días con feriados. Los días sábados y domingo son aquellos con una menor desviación estándar. Por ejemplo, algunos feriados son: viernes 29 de marzo, miércoles 1 de mayo, martes 21 de mayo, martes 16 de julio, jueves 15 de agosto, miércoles 18 y jueves 19 de septiembre.

Otro aspecto relevante para la modelación es la generación de residuos a nivel espacial. Como se fuera señalado previamente, la comuna se encontraba dividida en 35 sectores o servicios. La siguiente gráfica muestra la generación diaria promedio de basura por servicio, además de la desviación estándar.

Se observan diferencias de más de un 100% en la generación de basura bajo la zonificación de principios del 2013. También meceré ser comentada la importante desviación estándar que presenta la generación a nivel de sectores, que podría explicarse por:

- Servicios no entregados o parcialmente hechos en días específicos, que a su vez provoca basura acumulada que es recogida al día siguiente (doble impacto).
- Eventos o fechas especiales que generen o conlleven mayor cantidad de basura

Se concluye entonces la necesidad de filtrar la información base, de aquella data anómala que por razones exógenas o endógenas genere distorsiones no deseables en los resultados de generación de basura.

**Gráfico 11: Promedio y desviación estándar de kg de basura diaria por servicio**

**Fuente:** Elaboración propia en base a registros de descarga de residuos de KDM de 2013

Durante el año 2013 se hizo modificaciones a la zonificación y al funcionamiento de ciertos servicios. Para evitar cualquier alteración en la modelación producto de estos cambios, se omitirá el uso de algunos periodos o se adaptará datos que permitan mantener la consistencia que requiere la información. A continuación los periodos de tiempo a utilizar por servicio:

**Tabla 18: Zonas y periodos de utilización de datos según servicio de recolección**

ZONA	Servicios	DATOS
<b>ORIENTE</b>	1 a 3	Enero-Mayo
<b>ORIENTE</b>	4 a 11	Enero-Diciembre
<b>PONIENTE</b>	12 a 14	Junio-Diciembre
<b>C.PONIENTE</b>	15 a 21	Enero-October
<b>C.ORIENTE</b>	81 a 86	Enero-Diciembre
<b>ORIENTE</b>	87 a 90	Enero-Mayo
<b>PONIENTE</b>	91 a 94	Enero-Diciembre

**Fuente:** Elaboración propia en base a las reuniones con los Jefes de Zona

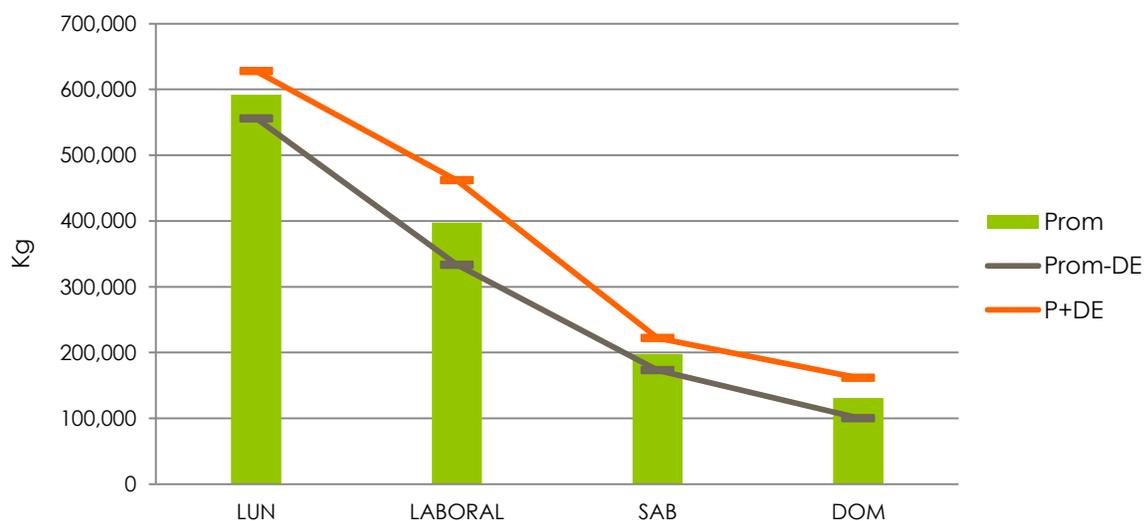
Para la modelación, la información proveniente de la base de datos se agrupa para observar la generación de basura diaria por ruta-fecha. Es necesario limpiar la base de datos de cierta información anómala, no representativa de la generación de residuos en un día normal. Algunos de los datos que se omitirán en la modelación son: servicios en días feriados, servicios de retiro de escombros, servicios anómalos registrados al término de días de paro, entre otros. Con esto se han eliminado sobre 2.500 registros (de un total de 18.080). Luego, se realiza el siguiente proceso:

- A la nueva base de datos con registros de zona consistentes, se le quitan registros de días feriados y días de comienzo y fin del paro de noviembre (06-11 y 20-11). También se quitan servicios irregulares, como aquellos de remoción de escombros o camiones tolva.

- Luego se procede a limpiar la base de datos de los efectos del paro en días posteriores a su finalización y de otras fechas con comportamiento anormal. Para esto se organiza la base de datos por ruta-fecha, se determina el promedio y desviación estándar de kg de basura generados a nivel de servicio y tipo de día, considerando todas las fechas en que hay registros. Se construye una banda de dos desviaciones estándar centrada en el promedio de kg de basura producidos por día, para cada servicio.

El siguiente gráfico muestra lo señalado para cada servicio, pero utilizando la información de todos los servicios, a modo de ejemplo:

**Gráfico 12: Promedio y banda de recolección de residuos por tipo de día**



**Fuente:** Elaboración propia en base a registros de descarga de residuos de KDM de 2013

Cuando los kg de basura recogidos en un servicio-fecha se encuentran fuera de la banda de dos desviaciones estándar del tipo de día correspondiente, se considera esta información como dato anómalo y es omitido en la base de datos para modelación. La siguiente tabla muestra el del número de datos dentro y fuera de la banda:

**Tabla 19: Análisis para la limpieza de datos**

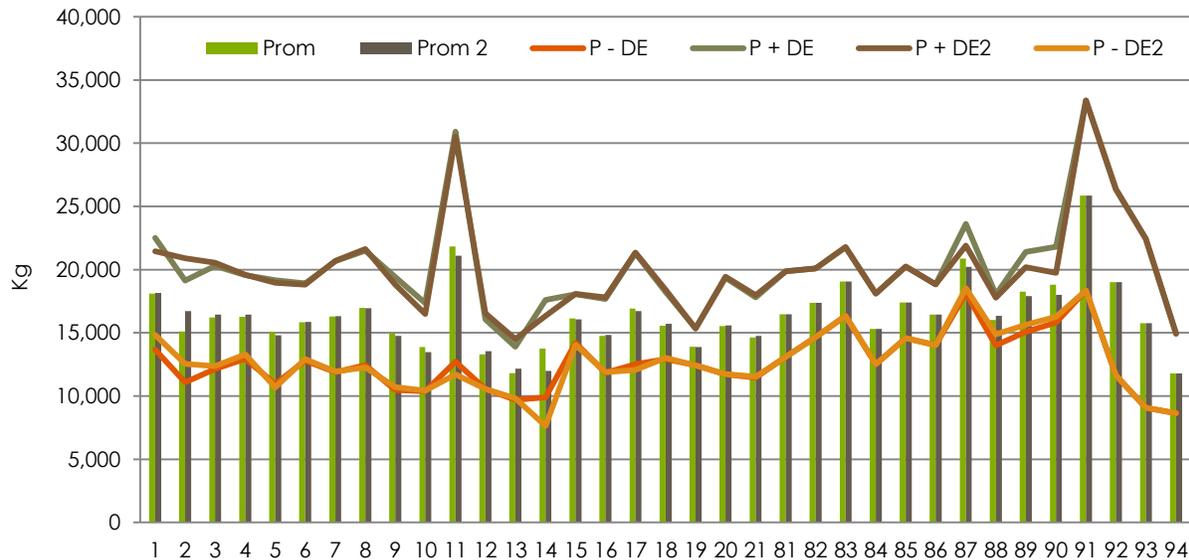
Tipo Ruta	Dentro Banda	Fuera Banda
Regular	10.376	3.282
<b>% Total</b>	<b>76%</b>	<b>24%</b>

**Fuente:** Elaboración propia en base a registros de descarga de residuos de KDM de 2013

De la tabla anterior se concluye que los datos usados para realizar la modelación de la generación corresponden a los 10.376, correspondientes a los servicios regulares que estén dentro de la banda. El siguiente gráfico muestra las diferencias de promedio y desviación estándar de datos antes y después (índice 2) de realizado el procedimiento de limpieza, para los días lunes y de martes a viernes:

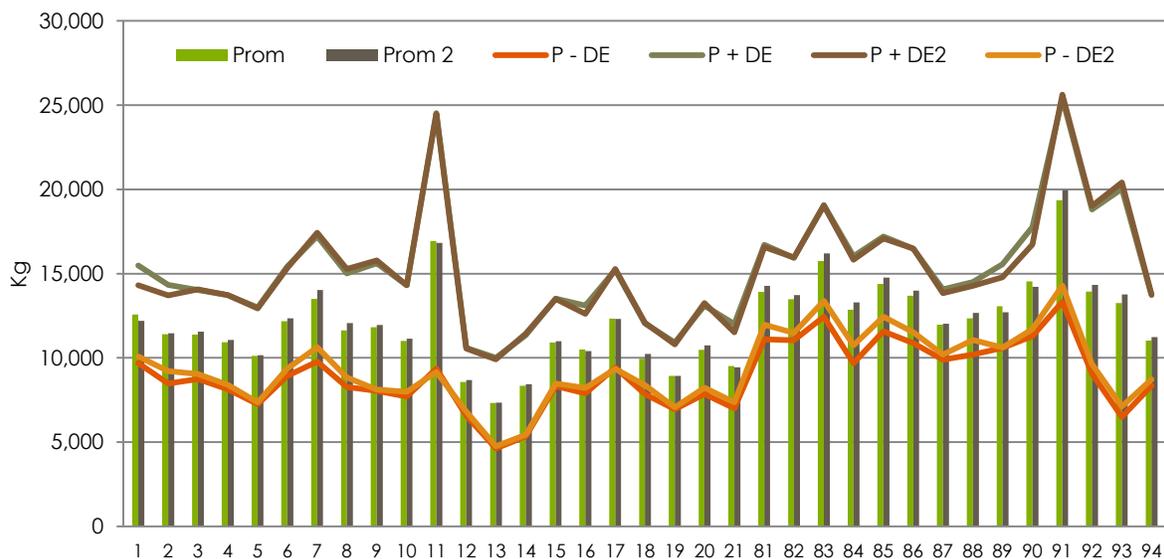
Como se observa, los promedios y desviación estándar no se ven fuertemente alterados al aplicar este procedimiento. Solo se ha eliminado datos extremos (muy sobre o debajo del promedio), lo que permite restar información anormal que sea fuente de error para el modelo.

**Gráfico 13: Promedio y desviación estándar de residuos por servicio, tipo de día Lunes**



Fuente: Elaboración propia en base a registros de descarga de residuos de KDM de 2013

**Gráfico 14: Promedio y desviación estándar de residuos por servicio, de Martes a Viernes**



Fuente: Elaboración propia en base a registros de descarga de residuos de KDM de 2013

### 3.3.3 Caracterización del Problema de Recolección

Hasta aquí ya se han podido identificar, y en algunos casos analizar en profundidad, tanto aspectos operacionales puros, como relacionados con la recolección/generación de basura en la Comuna de Santiago, que evidencian la complejidad del problema a modelar. Es así como a modo de ejemplo:

- Se constató la imposibilidad o inconveniencia de que los camiones recolectores entren o circulen por determinadas calles, cuestión que derivó en los conceptos de “recolección por alcance” y “recolección sin acceso”.
- Se identificó la necesidad de que el área de estudio se extienda más allá de los límites propios de la comuna, cuestión que dio origen a una red complementaria de calles externas.
- Consideraciones de seguridad han derivado en la necesidad de circular dos veces (una por cada calzada o vereda) en determinados ejes, así como la restricción casi total de acceder o salir marcha atrás en determinada vialidad.
- Se identificaron calles por las cuales ya sea temporal o permanentemente no se genera basura, o donde no es posible circular (vías exclusivas, reversibles, Ciclorecreovías, etc.).
- Se evidenció la variabilidad intrínseca de la cantidad basura recogida diariamente, y cómo ella se comporta en los diferentes tipos de días y meses, siendo especialmente sensibles los días lunes, a los servicios de recolección que se entregan en fin de semana.
- Se debió trabajar en detalle y profundidad sobre una serie de bases de datos con información imprecisa e incompleta, para construir una base de generadores, que a pesar de todo el esfuerzo no podría considerarse un catastro de generadores.

En el próximo capítulo continuarán apareciendo variables y características propias del problema de recolección, estén o no ellas incluidas posteriormente en la modelación. Es así como en el plano laboral aparecerán cuestiones y problemáticas propias de las jornadas de trabajo, como su extensión, los descansos y los tiempos muertos, verificando que ellas son diferentes según se trate de cargadores o conductores.

En el plano operacional quedará en evidencia la importancia, tanto en la construcción y cumplimiento de los itinerarios de recolección, de cuestiones básicas como variabilidad de los tiempos de viaje, los movimientos prohibidos (permanentes y temporales), y la capacidad y holgura de los camiones, para atender de manera apropiada una generación creciente de basura, que debe recogerse en contextos viales complejos.

También se abordarán en el siguiente capítulo aspectos relacionados con la generación de basura, como las implicancias de tener o no contenedores en las calles, la importancia de asumir o no que la Ordenanza se respeta en cuanto a los horarios en que los vecinos sacan la basura a la calle, las diferentes costumbres entre residentes y comerciantes, y sus implicancias para la recolección. Particularmente interesante será constatar que en pocos pero muy importantes casos, la basura no se recoge en la misma calle en la que está registrado el rol del generador que la produce, aunque los efectos de esta distorsión atenten contra la optimalidad y exactitud de las soluciones del modelo matemático de diseño de recolección de basura.

## 4 DESARROLLO SOLUCIÓN DEL MODELO

El problema de optimización asociado a la recolección de residuos domiciliarios puerta a puerta responde a la necesidad de recorrer una ciudad (grafo) a través de todas sus calles (arcos). Es por ello que el tipo de problema, en su forma general, corresponde a la clase Ruteo por Arcos. A su vez, la restricción particular del problema de capacidad de transporte de los camiones, lo incluyen en la clase de problemas conocido como CARP (Capacitated Arc Routing Problem).

Entonces, en su base el modelo corresponde a la subclase de problemas CARP en donde, adicionalmente, las características propias del problema de la ciudad de Santiago van definiendo las restricciones y los costos de la operación del servicio a considerar.

Teniendo definido el problema a resolver, las características de tamaño y tipo definirán las metodologías a emplear para resolver el problema. En este caso, considerando la revisión bibliográfica de problemas de este tipo y el tamaño de problema a resolver, se concluyó que no es posible resolverlo por métodos exactos. Es por ello, que se debe utilizar estrategias de métodos heurísticos, como los definidos en los algoritmos empleados.

Bajo esta idea de métodos heurísticos, las estrategias de clusterización y permutación son frecuentemente utilizadas en los algoritmos de ruteo de gran tamaño, como se indica en la revisión bibliográfica. En el caso de la metodología de permutación, responde a una estrategia de selección de vecindario para el método Simulated Annealing, el cual corresponde a la familia de métodos de Exploración y Selección. En este caso, la estrategia de selección de arcos indicada en el modelo busca que el siguiente vecindario cumpla con características de factibilidad y preferencias, con el fin de guiar la exploración del espacio de soluciones.

No obstante lo anterior, el problema de optimización requerirá como cuestión fundamental, un grafo atributado con las características topológicas, operacionales y la demanda de basura a ser recogida. En efecto, si bien la Red Vial puede convertirse de manera simple en un grafo atributado con las condiciones topológicas, será necesario construir el resto de los atributos con una serie de modelos complementarios, tales como:

- Modelo de Generación de Basura;
- Modelo de Tiempos de Circulación, y;
- Modelo de Tiempos de Operación

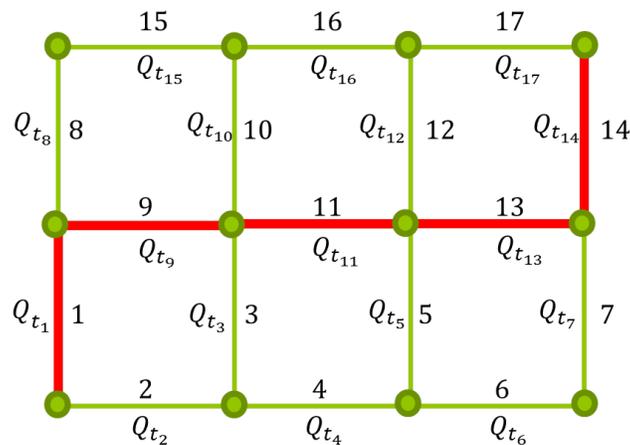
Finalmente, las soluciones del modelo de optimización se incorporan en un modelo general de optimización de recursos (camiones, cargadores y conductores), a objeto de obtener las planificaciones semanales de los principales recursos del proceso de recolección.

#### 4.1 MODELAMIENTO DE LA GENERACIÓN DE BASURA

La basura es generada por diversas fuentes, las que comprenden domicilios simples, condominios, edificios habitacionales, comercio, oficinas, entre otros, los cuales presentan comportamientos disímiles respecto al horario, composición y cantidad de desechos.

Dado que estas variables condicionan el problema de la recolección, es relevante realizar una buena estimación de ellas. Cada vez que un camión recolector opera, recorre un conjunto de arcos, los cuales generan una cierta cantidad de basura, como se muestra en la siguiente figura:

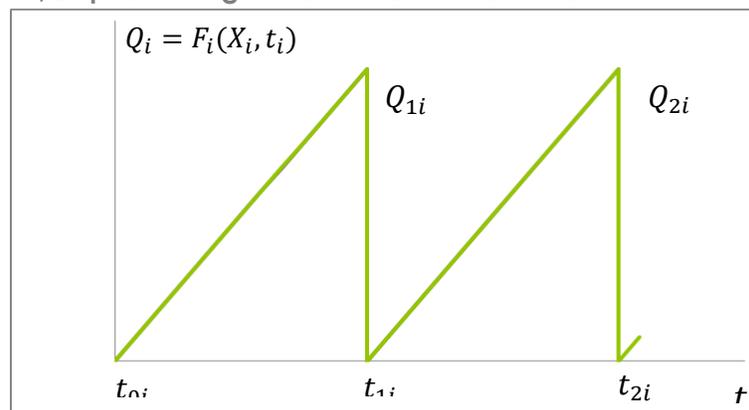
Figura 38, Esquema de ruta de recolección de basura



Fuente: Elaboración propia

La red de la figura anterior está formada por 17 arcos enumerados como se ve en la figura. Los arcos marcados en rojo representan la ruta que sigue el camión, es decir, recorre los arcos 1, 9, 11, 13 y 14, mientras que  $Q_{t_i}$  son los residuos en el arco  $i$  en el momento  $t$ . Es claro que el camión recoge toda la basura generada en el arco hasta el instante  $t \leq t_{0i}$ , siendo  $t_{0i}$  la hora de pasada del camión por el arco  $i$ . La basura en un arco  $i$  que pertenezca a la red es una función que podría representarse gráficamente de la siguiente forma:

Figura 39, Esquema de generación-acumulación de basura en el arco  $i$

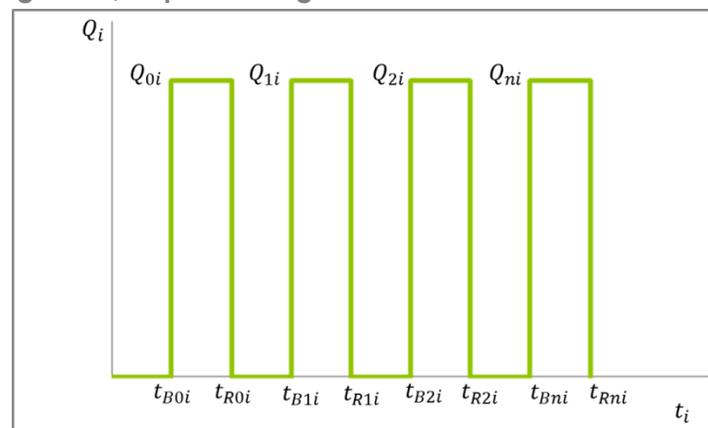


Fuente: Elaboración propia

Donde  $X_i$  es un vector de atributos del arco, y  $t_i$  es el tiempo transcurrido desde la pasada del último camión. La función  $Q_i = F_i(X_i, t_i)$ , puede presentar cualquier forma. Esta formulación reconoce el hecho que la generación de basura es continua en el tiempo y se inicia inmediatamente después de la recolección.

La formulación anterior requiere información sobre la generación de basura por unidad de tiempo en cada arco de la red, la cual es inexistente debido al alto costo que supone realizar una medición de esa magnitud. Para abordar el problema de mejor forma se realiza una simplificación que consiste en discretizar el espacio temporal y asumir que la generación de basura se produce en determinados momentos del día, por lo tanto, su comportamiento sería como el de la figura:

**Figura 40, Esquema de generación de basura en el arco i**



**Fuente: Elaboración propia**

Como se puede ver en la figura, la simplificación consiste en asumir que la basura aparece en las calles en un instante  $t_{Bni}$ , es recogida en el instante  $t_{Rni}$  y permanece en la calle en el arco  $i$  un tiempo  $t_{ni} = t_{Rni} - t_{Bni}$  hasta la pasada del camión. Los  $n$  instantes pueden variar por arco y la cantidad de basura puede variar entre arcos y también entre instantes.

Con esta información es necesario encontrar una función que logre explicar la cantidad de basura  $Q_{ni}$  cuyas variables independientes sean características del arco  $i$ , es decir:

$$Q_{ni} = F(X_{ni})$$

Una simplificación del modelo anterior consiste en asumir que las características de los arcos no varían durante el día por lo tanto el modelo teórico estaría dado por:

$$Q_{ni} = F_n(X_i)$$

Lo anterior asume que las características de los arcos no varían durante el día pero influyen de diferente forma en los diferentes instantes  $n$ .

### 4.1.1 Formulación de un Modelo de Generación de Basura

En apartados anteriores se mostró la información disponible para la comuna de Santiago. Con esta información se plantea realizar un modelo lineal de generación de basura como el que se muestra a continuación:

$$Q_z = \alpha + \sum_i^n x_{zi}$$

En donde  $Q_z$  es la cantidad de basura (kilógramos) recolectada en la zona  $z$ , y  $x_{zi}$  equivale a las características  $i$  de la zona  $z$

Si bien en el modelo teórico la basura podría generarse en distintos momentos del día, esto no puede ser implementado debido a la inexistencia de información sobre generación de basura en el tiempo, ni es parte de lo requerido en las Base de Licitación<sup>7</sup>. Los datos de KDM contienen la recolección a nivel día, por lo tanto, se estimará un modelo de generación a nivel diario.

Dado que base de datos de KDM contiene la recolección por zona y día, surge la interrogante respecto al comportamiento de cada día en particular y la conveniencia de agrupar los datos y tratarlos como un mismo tipo de día. En análisis previos se observó que la cantidad de residuos recolectada en los días lunes es notoriamente superior al resto de los días laborales. El fin de semana también presenta un comportamiento distinto a los días laborales, mostrando una menor cantidad de basura que los días laborales.

Para saber si los días son agrupables se realiza un test-t de igualdad de medias para los distintos tipos de día considerando un 95% de nivel de confianza. En la siguiente tabla se muestran los resultados:

**Tabla 20: Test-t de Comparación de Medias**

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
	Test-t	Test-t	Test-t	Test-t	Test-t	Test-t	Test-t
<b>Lunes</b>	-	4,26	3,89	4,07	4,12	13,90	18,18
<b>Martes</b>	-4,26	-	-0,49	-0,33	-0,15	11,65	17,48
<b>Miércoles</b>	-3,89	0,49	-	0,17	0,34	12,62	18,72
<b>Jueves</b>	-4,07	0,33	-0,17	-	0,17	12,72	19,01
<b>Viernes</b>	-4,12	0,15	-0,34	-0,17	-	11,81	17,63
<b>Sábado</b>	-13,9	-11,65	-12,62	-12,72	-11,81	-	12,00
<b>Domingo</b>	-18,18	-17,48	-18,72	-19,01	-17,63	-12,00	-

Fuente: Elaboración propia en base a registros de descarga de residuos de KDM de 2013

<sup>7</sup> En rigor el modelamiento y la optimización comienza a partir la definición de los horarios en que la basura aparece en la calle según su tipo de generador, aspecto que según las propias Bases de Licitación debe acordarse con el Mandante.

El valor crítico del test para un 95% de confianza es 1,96. En la tabla se puede apreciar que el lunes es estadísticamente distinto al resto de los días, mientras que martes, miércoles, jueves y viernes son estadísticamente iguales entre sí. El fin de semana es estadísticamente distinto y menor al resto de los días de la semana, además, el sábado y el domingo también son distintos entre sí.

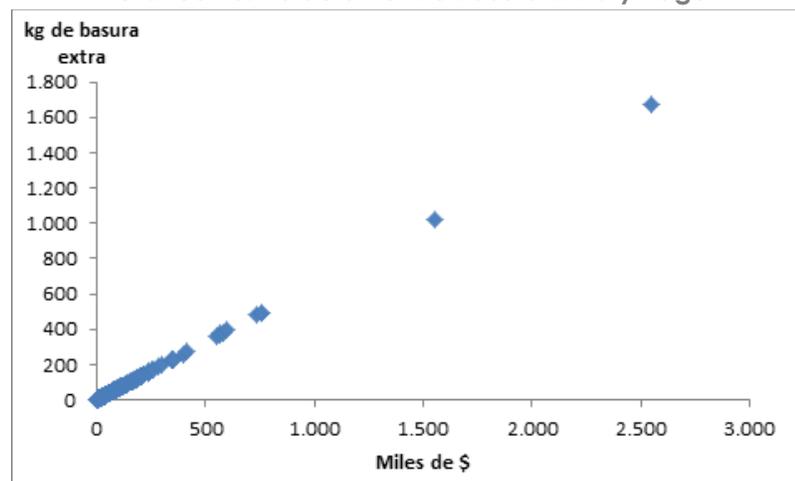
El modelo de generación se estimará bajo el supuesto de que la recolección es igual a la generación, lo cual es cierto sólo de martes a viernes, toda vez que la recolección se realiza en forma diaria y sus volúmenes son similares; sin embargo, este supuesto no es consistente el día lunes. Dado que la basura recolectada actualmente los días lunes, es el resultado de la generación del lunes y de la basura recolectada (o no) en fin de semana, no se estimará un modelo de lunes ya que hacerlo condiciona la solución a las condiciones operacionales actuales.

Para el fin de semana no se estimará un modelo particular, si no que se asumirá que la generación se comporta como en laboral pero con una menor cantidad de generadores "activos" ya que algunos tales como comercio, oficinas y colegio, no funcionan o lo hacen parcialmente.

#### 4.1.1.1 Construcción de la cantidad de basura generada

Como parte de la información que entregó la contraparte se encuentra el Registro de quienes pagan derechos de aseo adicionales. De acuerdo a lo señalado por el Municipio, los derechos de aseo adicionales son pagados por quienes generan una cantidad superior a 60 litros de basura diaria, y el pago es proporcional a la cantidad de basura adicional generada. El registro contiene el monto pagado y el volumen de basura adicional a los 60 litros, sin embargo existen unos pocos registros que no cuentan con la información sobre el volumen de basura. El siguiente gráfico muestra la relación entre la cantidad generada y el pago, para aquellos registros que si tenían la información disponible.

Gráfico 15: Relación entre Basura Extra y Pago



Fuente: Elaboración propia a partir de la Base de Pagos de Derechos de Aseo

Como se puede ver en el gráfico, la relación entre el aseo extra y el precio es lineal, por lo que se puede realizar una regresión para imputar la generación de basura extra (por sobre los 60 litros), de los registros que, pagando derechos adicionales, no posean esa información.

Los resultados de la regresión se muestran en la siguiente tabla, donde se aprecia el buen ajuste y una constante no significativa para un 95% de confianza. Los registros de observaciones del modelo fueron 136, y la base completa contiene 317, por lo que se imputó un volumen extra a los restantes 181 registros.

**Tabla 21: Regresión Aseo Extra**

<i>Estadísticas de la regresión</i>		
Coeficiente de correlación múltiple	0,9998	
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,9996	
R <sup>2</sup> ajustado	0,9996	
Error típico	4,298	
Observaciones	136	
	<i>Coeficientes</i>	<i>Estadístico t</i>
Intercepción	0,5538	1,16
Variable X 1	0,6560	607,25

**Fuente: Elaboración propia a partir de la Base de Aseo Extra**

Como resultado de la regresión se obtuvo una tarifa de 0.65 kg por cada \$1.000. o equivalentemente. 1.524 \$/kg. que llevado a unidad de volumen sería 228 \$/lt (suponiendo una densidad de 150 kg/m<sup>3</sup>).

Como se mencionó anteriormente, existe un grupo de 7 generadores en los cuales la cantidad de basura recolectada fue informada por los Jefes de Aseo de las zonas respectivas, que fueron agregados a la Base de Generadores Complejos:

**Tabla 22: Generadores Complejos adicionales**

<b>GENERADOR</b>	<b>Basura (Litros)</b>
<b>Asistencia Publica Central (Posta Central por Diagonal Paraguay)</b>	3.000
<b>Torre Entel</b>	3.850
<b>Mall del Centro</b>	22.850
<b>Aguas Andinas</b>	2.310
<b>Consejo de Defensa del Estado</b>	200
<b>Mall Chino Alameda Norte-Oriente</b>	1.500
<b>Instituto de Inteligencia</b>	1.440

**Fuente: Reuniones con Jefes de Zona**

Dado que la basura de los generadores que pagan aseo extra y la de los generadores reportados es un valor conocido, no tiene sentido estimar un modelo para calcularla, por esta razón la basura generada por quienes pagan aseo extra se eliminó de la base de recolección y los generadores fueron eliminados de la base de roles, es decir, esta cantidad no será parte del modelo predictivo, aunque será considerada en la solución de recolección. Considerando lo anterior la cantidad de basura a ser modelada es la siguiente:

$$Q'_{zd} = Q_{zd} - Q_{zde}$$

Donde  $Q'_{zd}$  es la cantidad de basura  $Q'$ , en el sector o servicio  $z$  y el día  $d$ ,  $Q_{zd}$  es la basura que llega a KDM y  $Q_{zde}$  es la basura generada por quienes pagan servicio de aseo extra. Cabe destacar que esta cantidad recoge los 60 litros de basura base más la basura extra.

Cabe destacar que el aseo extra se encuentra medido en litros y la basura que llega a KDM está en kilogramos. Para realizar la conversión se utilizará una densidad de 150 (kilogramos de basura/m<sup>3</sup>).

En efecto, la cantidad, composición y densidad de la basura que llega a KDM es muy distinta de la basura generada, debido por ejemplo a la compactación y a la recuperación de materiales tales como papeles, cartones, botellas y metales, que se realizan en la cadena de gestión. En la tabla siguiente se muestra un ejemplo de las variaciones de densidad encontradas en distintas etapas del manejo.

**Tabla 23: Densidad de la Basura según su estado**

ETAPA	Densidad
Basura suelta en recipientes	150 kg/m <sup>3</sup>
Basura compactada en camiones	500 kg/m <sup>3</sup>
Basura suelta descargada en vertedero	400 kg/m <sup>3</sup>
Basura recién depositada en vertedero	600 kg/m <sup>3</sup>
Basura estabilizada en vertedero: (2 años después del vertido)	900 kg/m <sup>3</sup>

Fuente: Tchobanoglous. 1993

La densidad de 150 kg/m<sup>3</sup> coincide con la señalada por la propia el propio Municipio en su Informe de Gestión de Aseo 2012, que señala una densidad de 0.146 Ton/m<sup>3</sup>.

#### 4.1.1.2 Cantidad de viviendas en Edificios (Generadores Puntuales) y Cités

El Municipio dispuso el registro de roles de la comuna de Santiago, lo que constituye el universo de generadores de basura de la comuna. En el apartado anterior se menciona que de este universo se eliminan quienes pagan aseo extra debido a que la generación de basura de estos es conocida, por lo tanto, no tiene sentido realizar un modelo. Adicionalmente, los establecimientos que pagan servicios de aseo particular también fueron retirados de la base de roles debido a que no constituyen un grupo de interés para el estudio.

La base de roles debería contener todos los generadores de la comuna; sin embargo, como complemento a la información se recibió una base de edificios y una base de cités, Estas bases fueron incluidas en la base de roles teniendo la precaución de no repetir registros.

La base de edificios posee incompleta respecto al número de viviendas o número de pisos o ambos. Para imputar un valor de viviendas se estimaron promedios por sector o servicio, de pisos y de viviendas/piso, con aquellos registros de edificios que tenían información completa. Por lo tanto, en ausencia del número de viviendas se imputó un valor multiplicando el número de pisos y el promedio de viviendas/piso de la zona en la cual se encuentre el registro. Teniendo en cuenta estas consideraciones se puede encontrar el número de viviendas por zona asociado a la base de edificios.

**Tabla 24: Promedio de Viviendas/Piso y Viviendas por Zona, en Edificios de Viviendas**

Sector/Servicio	Viviendas/piso	Viviendas
1	12,2	13.369
2	11,6	13.140
3	12,0	14.369
4	11,5	3.955
5	19,4	2.910
6	15,5	2.393
7	16,5	3.723
8	10,5	610
9	15,8	5.242
11	17,6	1.923
12	16,2	3.005
13	12,9	258
15	12,9	2.161
16	11,7	3.578
17	15,5	7.547
18	10,1	2.542
19	15,8	4.055
20	17,1	5.821
21	16,2	3.833
81	13,7	20.868
82	10,4	10.669
83	11,9	1.946
84	13,9	361
85	12,7	10.735
86	13,1	12.767
87	13,6	15.820
88	13,0	13.843
89	13,7	20.332
90	15,5	15.895
91	12,0	4.672
92	10,7	4.879
93	9,9	1.083
94	11,7	7.973

**Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de Edificios**

Estas viviendas fueron agregadas a la base de roles, considerando que corresponden a uso habitacional. Otra información entregada por el Municipio corresponde al registro de los cités dentro de la comuna. La siguiente tabla muestra el número de cités por sector/servicio.

El número de viviendas se obtuvo considerando un promedio de 15 viviendas/cité, el cual está basado en el estudio "*Ciudad Horizontal. un espacio dinámico, alternativas para la reconversión de pequeños bolsones urbanos*" desarrollado por la Universidad Central el año 2005. Al igual que los edificios, estas viviendas son agregadas a la base de Roles como uso habitacional.

**Tabla 25: Cités por servicio/sector y número de viviendas**

Servicio/Sector	Cités	Viviendas
1	29	435
2	30	450
3	7	105
4	49	735
5	27	405
6	16	240
7	43	645
8	34	510
9	13	195
10	3	45
11	19	285
12	2	30
13	2	30
14	12	180
15	26	390
16	12	180
17	10	150
18	7	105
19	21	315
20	35	525
21	39	585
81	1	15
87	3	45
88	2	30
89	4	60
90	2	30
91	7	105
92	15	225
93	13	195
94	42	630

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.1.1.3 Modelamiento de la generación de basura

El modelo planteado para reproducir la generación de basura es una regresión lineal considerando como variable independiente a la basura generada en cada sector/servicio y como variable independiente a los generadores de cada sector, los cuales se encuentran caracterizados por uso. La siguiente tabla muestra los usos considerados:

**Tabla 26: Usos de los Roles**

USOS
SITIO ERIAZO
COMERCIO
HABITACIONAL
ESTACIONAMIENTO
OFICINA

BODEGA
HOTEL MOTEL
INDUSTRIA
EDUCACIÓN
TRANSPORTE Y TELECOMUNICACIONES
OTROS NO COINCIDENTES
ADMINISTRACIÓN PUBLICA
SALUD
CULTO
DEPORTE

Fuente: Elaboración propia usando la información de la Base de Roles

Para explicar la generación de residuos se estimará un modelo para los días martes a viernes. El día lunes recibirá un tratamiento especial dado que la basura recolectada en lunes depende de la recolección en fin de semana.

Para calibrar el modelo se usará el promedio de basura diaria por zona, lo que implica tener solamente 35 datos. Lo anterior para reducir la posibilidad de auto-correlación, ya que los datos usados no corresponden a series temporales, sino por un corte transversal compuesto por el promedio de carga recolectada por sector/servicio.

En la siguiente tabla se muestra el mejor modelo preliminar obtenido. La información mostrada considera sólo las variables que resultaron estadísticamente significativas:

Tabla 27: Modelo Preliminar de Generación (con constante)

Source	SS	df	MS	Number of obs = 35		
Model	65499174.6	3	21833058.2	F( 3, 31) = 5.06		
Residual	133841640	31	4317472.26	Prob > F = 0.0057		
Total	199340815	34	5862965.14	R-squared = 0.3286		
				Adj R-squared = 0.2636		
				Root MSE = 2077.9		
BASURA	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
COMERCIO	2.86196	.9221645	3.10	0.004	.981193	4.742727
INDUSTRIA	12.04295	6.117608	1.97	0.058	-.4339974	24.51989
EDUCACION	99.26492	28.60874	3.47	0.002	40.917	157.6128
_cons	7313.619	1173.264	6.23	0.000	4920.731	9706.506

Fuente: Elaboración propia

La tabla que describe el modelo contiene la siguiente información:

- Columna Basura: contiene los regresores que resultaron estadísticamente significativos. En este caso Comercio. Industria. Educación y \_cons. Donde \_cons representa la constante específica del modelo.
- Columna Coef: Contiene los coeficientes de los regresores.
- Std. Err.: es el error estándar del coediciente

- $t$ : es el valor del test  $t$ . si es superior en valor absoluto a 1.96. el coeficiente es estadísticamente distinto de cero con determinado nivel de confianza. en este caso 95%
- Columna  $P > |t|$ : es el valor  $p$  (p-value). del test. en este caso si es menor a 0.05 se considera. se rechaza el test. es decir. es significativamente distinto de cero
- Columnas 95% Conf. Intervalo: esta columna contiene el intervalo de confianza del coeficiente

En el sector superior derecho de la salida del software se entregan algunos parámetros generales del modelo, los cuales se detallan a continuación:

- Number of obs.: Número de observaciones
- $F(3, 31)$ : valor del test  $F$ . en el interior aparecen los coeficientes estimados y los grados de libertad
- $Prob > F$ : valor  $p$  del test
- R-squared: coeficiente de determinación
- Adj R-squared: coeficiente de determinación ajustado
- Root MSE: es la raíz del error cuadrático medio

En el sector superior izquierda de la tabla se presenta la tabla ANOVA, cual contiene:

- Source: es la fuente de datos. la cual puede ser el modelo. los residuos o el total
- SS: es la suma de cuadrados. es decir. la suma de los cuadrados de la diferencia entre el promedio y el dato
- df: son los grados de libertad
- MS: es la media de los cuadrados. en este caso es la división entre SS y df

Como se puede ver en la tabla anterior, el modelo estimado posee un bajo ajuste, pero los coeficientes de las variables explicativas son todos significativos. Un problema de este modelo es el peso relativo que tiene la constante respecto de los regresores, lo cual implica que todas las zonas están generando una enorme cantidad de basura que no puede ser explicada con la cantidad de generadores, la que además es igual para todos los sectores.

Considerando la naturaleza de los datos modelados, además del objetivo final del modelo, no tiene sentido asignar una cantidad fija de basura a cada sector. Para evitar esto se estimaron modelos sin constante específica, sin embargo, para capturar el efecto de generación no asociada a un tipo de generador en especial, se introdujo como regresor la longitud de los arcos que componen el sector. Los resultados del modelo se muestran a continuación:

Tabla 28: Modelo de Generación sin constante y con regresor de longitud de los arcos

Source	SS	df	MS	Number of obs = 35		
Model	4.5727e+09	6	762115787	F( 6, 29) =	97.24	
Residual	227278859	29	7837202.05	Prob > F =	0.0000	
Total	4.8000e+09	35	137142102	R-squared =	0.9526	
				Adj R-squared =	0.9429	
				Root MSE =	2799.5	

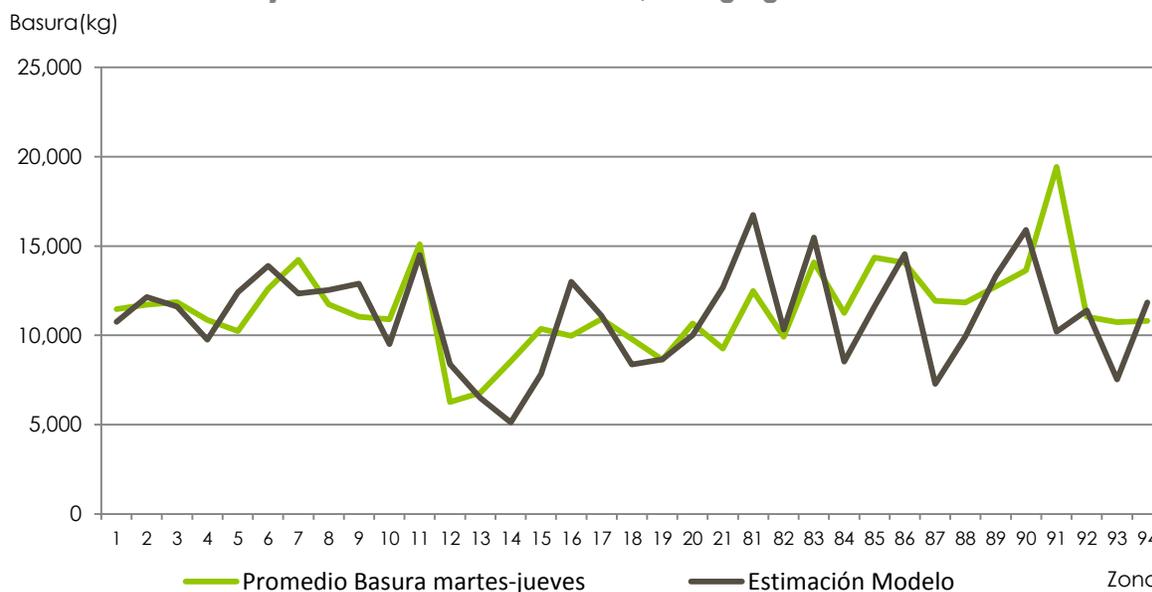
  

BASURA	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
COMERCIO	3.606166	1.44344	2.50	0.018	.654001	6.558332
INDUSTRIA	25.74381	9.929458	2.59	0.015	5.435783	46.05183
OFICINA	1.559255	.7309941	2.13	0.042	.0642038	3.054305
EDUCACION	155.9496	38.52827	4.05	0.000	77.15041	234.7487
HABITACIONAL	.1554302	.0898461	1.73	0.094	-.0283257	.3391862
Dist_total	253.6472	123.9049	2.05	0.050	.2331584	507.0611

Fuente: Elaboración propia

Si bien el  $R^2$  no es directamente comparable con un modelo con constante, el ajuste que se tiene es importante. En el siguiente gráfico se puede ver el ajuste del modelo en cada uno de los sectores o servicios:

Gráfico 16: Ajuste Modelo de Generación, desagregado a nivel de servicio



Fuente: Elaboración propia a partir del Modelo de Generación sin constante y con regresor de longitud de los arcos

El gráfico anterior muestra que la predicción empeora en el caso de los servicios con numeración superior a 80, los cuales como se ha dicho anteriormente representan servicios de recolección nocturnos. **Debido a esto se estimaron modelos separados para los sectores diurnos y nocturnos, con el objeto de responder si efectivamente se trata de sectores con características distintas que pudieran justificar modelos de generación diferentes entre ellos. Siendo**

**redundante, los modelos se calibran con la información diaria, por lo que en ningún caso se están sesgando los análisis al separar los servicios o sectores por horario de atención.**

Los resultados se presentan en las siguientes tablas:

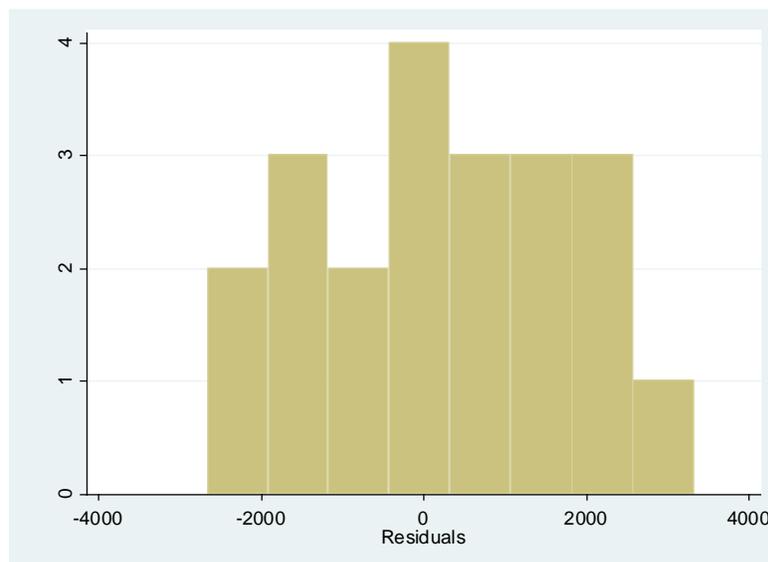
**Tabla 29: Resultado Modelo de generación de basura, Laboral – Diurno**

Source	SS	df	MS	Number of obs = 21		
Model	2.4003e+09	5	480065691	F( 5, 16) =	141.40	
Residual	54321482.7	16	3395092.67	Prob > F =	0.0000	
				R-squared =	0.9779	
				Adj R-squared =	0.9710	
				Root MSE =	1842.6	
BASURA	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
COMERCIO	2.271074	1.091629	2.08	0.054	-.0430756	4.585225
INDUSTRIA	26.6803	6.713421	3.97	0.001	12.44848	40.91212
EDUCACION	131.2188	38.72297	3.39	0.004	49.12975	213.3078
HABITACIONAL	.1957008	.0971044	2.02	0.061	-.0101512	.4015529
Dist_total	293.8147	90.63422	3.24	0.005	101.6788	485.9507

Fuente: Elaboración propia

Los residuos del modelo anterior se muestran en la siguiente figura:

**Gráfico 17: Residuos Modelo de generación de basura, Laboral - Diurno**



Fuente: Elaboración propia

Para ver si los residuos son normales se aplica un test de Shapiro-Wilk. Los resultados se ven en la siguiente tabla:

**Tabla 30: Test de Shapiro-Wilk sobre los Residuos Modelo de Generación, Laboral - Diurno**

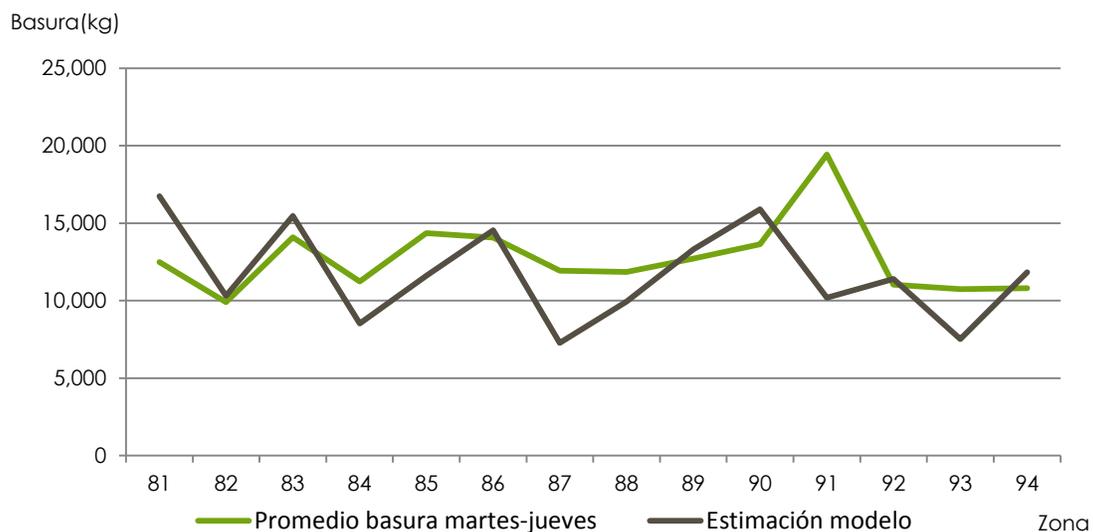
Variable	Obs	W	V	z	Prob>z
residuos8	21	0.97583	0.592	-1.059	0.85516

Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver en la tabla anterior el P-value (Prob>z) es superior a 5% por lo tanto la hipótesis de normalidad no se rechaza. La normalidad de los residuos implica que los errores siguen una distribución aleatoria a pesar de que el modelo no cuenta con constante específica y por tanto se puede afirmar que no existe sesgo en la estimación.

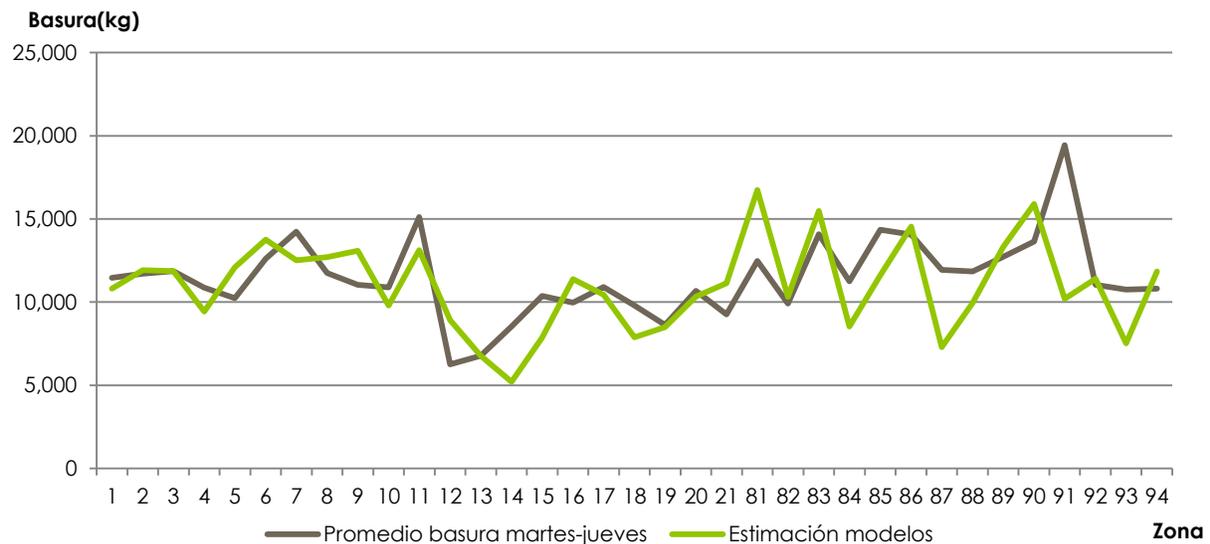
**El mejor modelo nocturno encontrado coincide con el modelo diario, por lo tanto, se usó el modelo diurno para estimar la basura en los arcos que pertenezcan a zonas atendidas por servicios diurnos, y el modelo diario para estimar la basura en los arcos que pertenezcan a las zonas atendidas por servicios nocturnos.**

A continuación se muestra un gráfico del ajuste en los sectores/servicios nocturnos:

**Gráfico 18: Ajuste Modelo (diario) en sectores de Servicios Nocturnos**

Fuente: Elaboración propia a partir de los Modelos Finales de Generación

El siguiente gráfico muestra el ajuste obtenido entre el promedio de basura generada por zona en día tipo laboral (martes a viernes) y las estimaciones realizadas con los modelos.

**Gráfico 19: Generación promedio por zona, real y estimada (martes-jueves)**

Fuente: Elaboración propia a partir de los Modelos Finales de Generación

Como puede verse en los gráficos anteriores, las distorsiones disminuyen, pero persisten en los sectores nocturnos.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los modelos estimados, donde las cifras corresponden a las tasas de generación y el número en paréntesis representa el test-t del coeficiente.

**Tabla 31: Síntesis de Modelos Finales [kg/día-generator]**

Regresor	Modelo zonas diurnas	Modelo zonas nocturnas
Comercio	2.27 (2.08)	3.61 (2.50)
Oficina	-	1.56 (2.13)
Educación	131.22 (3.39)	155.95 (38.52)
Industria	26.68 (3.97)	25.74 (2.59)
Habitación	0.20 (2.02)	0.15 (1.73)
Distancia [kg/día-km]	293.81 (3.24)	253.65 (2.05)
<b>Coefficiente de Determinación</b>	<b>0.97</b>	<b>0.95</b>

Fuente: Elaboración propia a partir de los Modelos Finales de Generación

Al comparar los modelos en términos de sus regresores, el único que no aparece significativo en el modelo diurno son las oficinas, lo cual es plenamente consistente con la localización principal de ellas, pues como fuera ilustrado en acápite respectivo, ellas se concentran justamente en la zona que es atendida por servicios nocturnos. El resto de los factores son significativos en los modelos para zonas atendidas tanto por servicios diurnos y como nocturnos.

Como puede verse en la tabla anterior, el comercio es significativo en ambos modelos, pero en las zonas atendidas por servicios nocturnos la tasa de generación es 1.6 veces mayor. En los modelos nocturnos aparece el factor oficina como significativo, sin embargo, la generación de las oficinas equivale a 0.43 veces la generación del comercio.

El regresor que representa la distancia total de los arcos o calles del sector o servicio arroja una cifra aparentemente alta, sin embargo distorsiona esa apreciación el hecho de que la unidad de longitud es el kilómetro.

Otro punto interesante de analizar corresponde a la relación que existe entre las variables, por ejemplo, la basura generada por un colegio en las zonas de atención diurnas equivale a 656 hogares, una industria equivale a 26 hogares y un comercio equivale a 11 hogares. En la siguiente tabla se muestran los resultados de los modelos normalizados por la tasa de generación por vivienda.

**Tabla 32: Coeficientes Normalizados contra la Generación por Hogar**

<b>Coefficiente</b>	<b>Modelo Diurno</b>	<b>Modelo Nocturno</b>
<b>Comercio</b>	11	24
<b>Oficina</b>	-	10
<b>Educación</b>	656	1.040
<b>Industria</b>	133	172
<b>Habitación</b>	1	1
<b>Distancia (km)</b>	1.469	1.691

**Fuente: Elaboración propia a partir de los Modelos Finales de Generación**

La distancia se mide en km, por lo tanto el modelo diurno muestra que en un km la generación de basura endógena equivale a la de 1.469 hogares. En el caso del servicio nocturno, esta tasa corresponde a 1.691 hogares.

Dado que el modelo se utilizó para distribuir la basura generada, la cual es un dato conocido, se calcularon factores de ajuste para llevar la predicción del modelo a la realidad. En acuerdo con la contraparte técnica los factores de ajuste se calcularon con respecto a la media más la desviación estándar de los datos. Esto con el objeto de reducir la posibilidad de que la basura en las calles que componen una ruta sea mayor a la capacidad operacional del camión-jornada.

En la siguiente tabla se muestran las estimaciones realizadas por el modelo, la media y desviación estándar de los kg de basura por sector/servicio y los respectivos factores de ajuste.

Tabla 33: Factores de Ajuste aplicables a nivel de arco – sector/servicio

Sector/Servicio	Promedio de Basura (kg)	Desviación estándar Basura (kg)	Media + desvest (kg)	Estimación modelo (Kg)	Factor de ajuste
1	12.281	1.097	13.378	11.629	1,15
2	11.884	1.135	13.019	12.090	1,08
3	12.079	1.005	13.085	12.087	1,08
4	10.954	1.642	12.596	9.531	1,32
5	10.326	1.481	11.807	12.179	0,97
6	12.859	1.371	14.230	14.004	1,02
7	14.387	1.509	15.895	12.669	1,25
8	12.000	1.522	13.522	12.959	1,04
9	11.827	2.078	13.905	13.871	1,00
10	11.006	1.784	12.790	9.916	1,29
11	16.005	3.632	19.637	14.016	1,40
12	8.633	878	9.511	11.286	0,84
13	6.957	1.256	8.214	6.951	1,18
14	8.743	1.424	10.167	5.422	1,88
15	10.739	1.285	12.024	8.228	1,46
16	10.669	1.106	11.775	12.081	0,97
17	12.683	1.070	13.753	12.226	1,12
18	10.031	815	10.847	8.132	1,33
19	8.759	846	9.605	8.613	1,12
20	10.838	1.203	12.041	10.493	1,15
21	9.356	1.020	10.375	11.246	0,92
81	14.398	1.082	15.480	18.650	0,83
82	13.874	943	14.818	14.288	1,04
83	16.387	1.221	17.607	17.775	0,99
84	13.367	1.170	14.537	10.652	1,36
85	14.927	980	15.907	12.181	1,31
86	14.394	1.168	15.562	14.867	1,05
87	11.939	866	12.805	7.285	1,76
88	12.987	660	13.648	11.086	1,23
89	13.051	924	13.975	13.644	1,02
90	14.462	1.169	15.631	16.733	0,93
91	20.914	2.617	23.531	11.681	2,01
92	12.873	2.642	15.514	13.241	1,17
93	11.189	3.761	14.951	7.971	1,88
94	11.137	1.083	12.220	12.165	1,00

Fuente: Elaboración propia a partir de los Modelos Finales de generación de basura y de los registros de descarga de residuos de KDM de 2013

En los Anexos se encuentra una estimación de los resultados de generación de basura a nivel de arco y zona para los modelos finales.

## 4.2 MODELO DE DISEÑO ÓPTIMO DE RUTAS

### 4.2.1 Formulación Matemática

A continuación se describe la formulación matemática del problema, definiendo los objetivos y restricciones del modelo matemático.

**Grafo:** Representación de la Red Vial en el que cada intersección de calles es un nodo,

**Notaciones:**

$G = G(N_{RV}, N_T, N_K, N_S, A_R, A_{NR})$  := Grafo dirigido de la Red Vial de la comuna de Santiago

$N_{RV}$ : Nodos de la Red Vial

$N_T$ : Nodo que representa el Terminal de Camiones

$N_K$ : Nodo que representa a KDM

$N_S$ : Conjunto de Nodos que representan las Sedes

$N = N_{RV} \cup N_T \cup N_K \cup N_S$  := Conjunto de nodos del Grafo  $G$

$A_R$ : Conjunto de Arcos Requeridos, donde existen residuos a ser retirados. Se utiliza para diferenciar los arcos de paso que se encuentran en el grafo, de aquellos que tienen residuos que retirar.

$A_{NR}$ : Conjunto de Arcos No Requeridos

$A_f = \{(nn) \mid n \in N\}$ : Arcos loop ficticios para representar eventos en nodos, como descansos, colación, toma y deje de camión en Terminal, y descargas en KDM.

$A = A_R \cup A_{NR} \cup A_f$  := Conjunto de arcos que definen el Grafo  $G$

$A(i, j)$ : Arco que representa el camino (conjunto de arcos) entre el nodo  $i$  y el nodo  $j$

$H$ : Subconjunto de  $A$ , tal que el arco se atributa como horizontal

$V$ : Subconjunto de  $A$ , tal que el arco se atributa como vertical

$K$ : Conjunto de Camiones disponibles para operar.

$C$ : Capacidad de cada camión

$H_i = \{H_{i_1}, H_{i_2}, \dots, H_{i_{|K|}}\}$ : Conjunto de horarios permitidos para inicio de rutas.

Para cada  $a \in A$ , se definen:

$$h(a): \text{Horizontalidad del arco } a = \begin{cases} 1 & , \text{ si } a \in H \\ 0 & , \text{ si } a \in V \end{cases}$$

$km(a)$ : Kilómetros del arco  $a$

$tv(a)$ : Tiempo de viaje del arco  $a$

Para cada  $a \in A_R$ , se definen:

$g_1$ : Tipo de generador con horario de aparición en el modelo de generación, el cual se dividirá en dos subtipos  $g_{1,1}$  y  $g_{1,2}$  que se diferencian por la hora en que aparecen.

$cg(a)$ : Carga del arco  $a = cg_{1,1}(a) + cg_{1,2}(a) + cg_2(a)$ , donde  $cg_1$  y  $cg_2$  son las cargas por tipo de generador.

$hg_{1,i}(a)$ : Hora de generación de del tipo de generador  $g_{1,i}$ .

$tg(a)$ : Tipo de generadores en arco, donde  $tg(a) = \begin{cases} 1 & , \text{si } cg_1(a) > 0 \\ 0 & e. o. c \end{cases}$

$ts(a)$ : Tiempo de servicio del arco  $a$ .

$Ady(A) = [Ady(m, n)]$ : Matriz de adyacencia de arcos en  $A$ , donde

$Ady(m, n) = \begin{cases} 1 & , \text{si desde el arco } m \text{ se puede pasar al arco } n \\ 0 & e. o. c \end{cases}$

$AdyZ(A) = [AdyZ(m, n)]$ : Matriz de adyacencia de arcos por zona, donde

$AdyZ(m, n) = \begin{cases} 1 & , \text{si } m \text{ y } n \text{ pertenecen a la misma Zona} \\ 0 & e. o. c \end{cases}$

$P(A) = [P(m, n)]$ : Penalización sobre la secuencia de arcos  $m, n$ , que busca evitar muchas vueltas en las rutas, donde:

$P(m, n) = \begin{cases} p & , \text{si } h(m) + h(n) = 1 \\ 0 & e. o. c \end{cases}$

$It_k$ : Secuencia de arcos que definen el Itinerario del vehículo  $k$ .

$It_k(i)$ : Arco en la  $i$ -ésima posición de  $It_k$

$E_{i'}^k \subset It_k$ : Expedición  $i'$  del vehículo  $k$ , compuesta por una secuencia de arcos del vehículo tal que inicia en una sede y termina en KDM, o inicia en KDM y termina en KDM.

$J_k \subset It_k$ : Jornada de los cargadores del camión  $k$ , compuesta por una secuencia de arcos del vehículo tal que inicia en una sede u termina en la misma sede.

$J_v^k \subset J_k$ : Tramo  $v$  de la jornada de cargador del camión  $k$ , compuesta por una secuencia de arcos de  $It_k$

$Td$ : Máximo tiempo antes de un descanso.

$Tj$ : Máximo tiempo de jornada para cargadores y conductores.

$Tea_k(a)$ : Tiempo de espera por atención del arco  $a$ , en el itinerario del camión  $k$ .

TC: Tiempo asociado a la colación en la jornada del trabajador.

**Variables:**

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & , \text{ si el vehículo } k \text{ pasa por el arco } (ij) \\ 0 & \text{ e. o. c} \end{cases} \quad , (ij) \in A, k \in K$$

$$y_{ijk} = \begin{cases} 1 & , \text{ si el vehículo } k \text{ sirve el arco } (ij) \\ 0 & \text{ e. o. c} \end{cases} \quad , (ij) \in A, k \in K$$

$$hi_k \in Hi$$

**Restricciones:**

R1: Todo vehículo inicia y finaliza en el terminal:

$$\sum_{j \in N \setminus N_T} x_{N_T j k} = \sum_{i \in N \setminus N_T} x_{i N_T k} = 1 \quad , \forall k \in K$$

R2: Secuencialidad de arcos:

$$\sum_{i \in N} x_{ijk} - \sum_{i \in N} x_{jik} = 0 \quad , \forall j \in N, \forall k \in K$$

R3: Todo arco requerido debe ser servido sólo por un vehículo:

$$\sum_{k \in K} y_{ak} = 1 \quad , \quad \forall a \in A_R$$

R4: Todo arco servido, debe ser recorrido:

$$y_{ak} \geq x_{ak} \quad , \forall a \in A_R$$

R5: Toda secuencia de arcos en  $It_k$  debe ser entre arcos adyacentes:

$$Ady(It_k(i), It_k(i+1)) = 1 \quad , \forall i \in It_k, \forall k \in K$$

R6: Todo arco servido por un vehículo debe pertenecer a la misma zona:

$$AdyZ(It_k(i), It_k(j)) = 1 \quad , \forall i, j \in It_k \cap A_R, \forall k \in K$$

R7: La carga de camión no puede superar su Capacidad:

$$\sum_{a \in E_i^k} cg(a) y_{ak} \leq C \quad , \forall E_i^k \in It_k, \forall k \in K$$

R8: Descansos para el equipo:

$$\sum_{a \in J_i^k} (tv(a) * x_{ak} + ts(a) * y_{ak}) \leq Td \quad , \forall J_i^k \in J_k, \forall k \in K$$

R9: Jornada del conductor del camión:

$$\sum_{a \in It_k} (tv(a) * x_{ak} + ts(a) * y_{ak}) \leq TJ - TC \quad , \forall k \in K$$

R10: Jornada cargadores:

$$\sum_{a \in J_k} (tv(a) * x_{ak} + ts(a) * y_{ak}) \leq TJ - TC \quad , \forall k \in K$$

### Función Objetivo:

- Costo de Arco:

$$c(a) = \begin{cases} km(a) & , si a \in \{A \setminus A_f\} y a \notin a \in \{A(n, N_K) \setminus n \in N\} \\ tv(a) & , si a \in \{A(n, N_K) \setminus n \in N\} \\ 0 & , si a \in A_f \end{cases}$$

- Costo de Ruta:

- o Tiempo de exposición de la basura del arco  $a$  para el subtipo de generador  $h$

$$Tea_{k,h}(a) = \begin{cases} Si hi_k - hg_{1,h}(a) + \sum_{i \in It_k}^{It_k(i)=a} (tv(i) * x_{ik} + ts(i) * y_{ik}) > 0, p_1 * \left| hi_k - hg_{1,h}(a) + \sum_{i \in It_k}^{It_k(i)=a} (tv(i) * x_{ik} + ts(i) * y_{ik}) \right| \cdot tg(a) \\ Si hi_k - hg_{1,h}(a) + \sum_{i \in It_k}^{It_k(i)=a} (tv(i) * x_{ik} + ts(i) * y_{ik}) \leq 0, p_2 * \left| hi_k - hg_{1,h}(a) + \sum_{i \in It_k}^{It_k(i)=a} (tv(i) * x_{ik} + ts(i) * y_{ik}) \right| \cdot tg(a) \end{cases}$$

Donde  $p_1$  y  $p_2$  son los ponderadores de los tiempos de espera,  $p_1$  si el camión pasa después de que la basura es sacada y  $p_2$  si el camión pasa antes.

- o Costo por tiempo de espera del arco  $a$ :

$$cte_k(a) = (cg_{1,1}(a))^{q_c} \cdot (Tea_{k,1}(a))^{q_t} + (cg_{1,2}(a))^{q_c} \cdot (Tea_{k,2}(a))^{q_t}$$

Donde  $q_c$  y  $q_t$  son las potencias de la carga y del tiempo de espera, buscando por ejemplo que no sea lo mismo 10 kg esperando 2 hora, que 2 kg esperando una 10 horas.

- o Costo por tiempo de espera de la ruta del camión  $k$

$$Cte(k) = \sum_{a \in It_k} cte_k(a)$$

- o Costo por extensión de ruta del camión  $k$

$$Km(k) = \sum_{a \in It_k} c(a)$$

- o Penalización por virajes en la ruta del camión  $k$

$$Pv(k) = \sum_{i=1}^{|It_k|-1} P(i, i+1)$$

- o Costo total de ruta

$$C(k) = \alpha \cdot Cte(k) + \beta \cdot \gamma \cdot Km(k) + Pv(k)$$

El producto  $\beta \cdot \gamma$  debería representar el costo de operación por kilómetro (al menos debería incluir combustible + mantenimiento), y su dimensión es de \$/km. Si  $\gamma$  es el rendimiento (lt/km), entonces  $\beta$  debe representar el costo por litro, pero incluir los costos de mantenimiento.

El  $\alpha$  debería ser el costo de que 1 kg de basura espere 1 hora, y su dimensión es de \$/kg-hr.

- Costos de Solución:

- o Costos de rutas

$$CR = \sum_{k \in K} C(k)$$

- o Penalización por uso bajo capacidad

$$PBC = \sum_{k \in K} \sum_{E_i^k \in I_k} \left( C - \sum_{a \in E_i^k} cg(a) y_{ak} \right)$$

- o Penalización por desequilibrio entre jornadas

$$PDJ = \max_{k \in K} \max_{J_k \in I_k} \left( \sum_{a \in J_k} (tv(a) * x_{ak} + ts(a) * y_{ak}) \right) - \min_{k \in K} \min_{J_k \in I_k} \left( \sum_{a \in J_k} (tv(a) * x_{ak} + ts(a) * y_{ak}) \right)$$

#### **FUNCIÓN OBJETIVO:**

$$F.O: \min(p_{CR} \cdot CR + p_{PBC} \cdot PBC + p_{PDJ} \cdot PDJ)$$

## 4.2.2 Metodología Solución

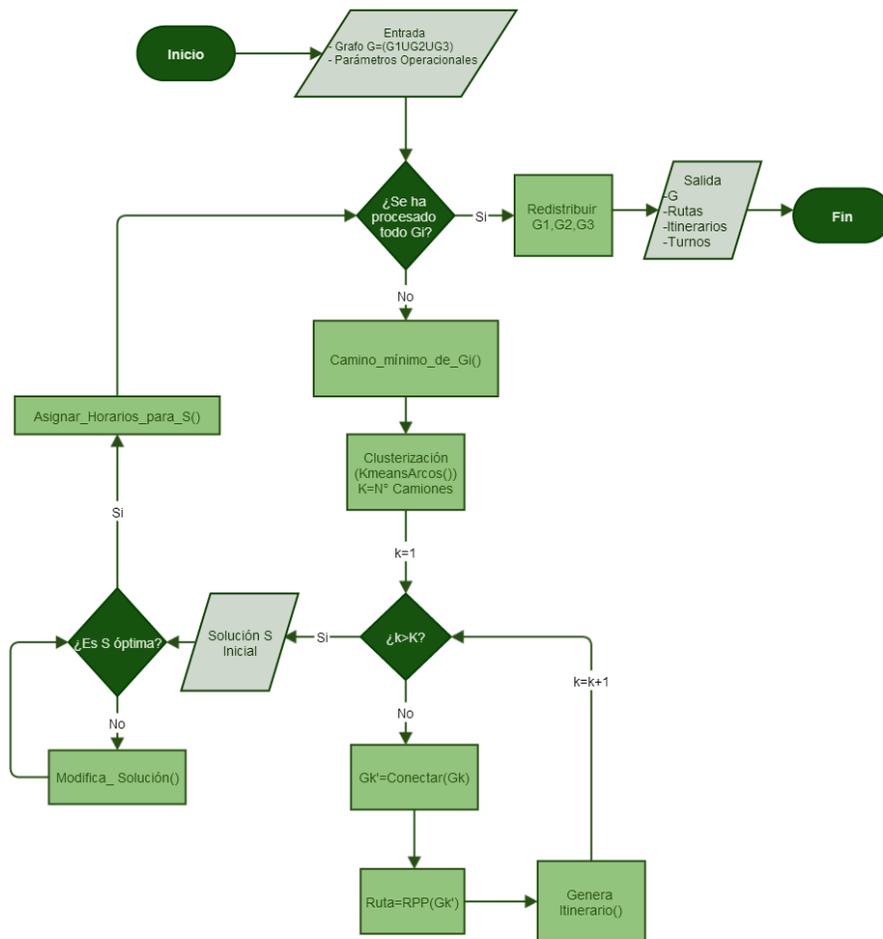
### 4.2.2.1 Introducción

La Formulación del problema antes descrito, representa el problema conocido como Capacitated Arc Routing Problem, CARP, el cual pertenece a la familia de problemas NP-Hard **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, lo que implica en términos simples, que no es posible resolverlo por métodos exactos a partir de un cierto tamaño, el cuál varía de acuerdo a la complejidad del grafo.

En el trabajo realizado por C. Vázquez **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** para la recolección de residuos en la Provincia de Huelva, España, se indica la necesidad de métodos heurísticos cuando el grafo representa la red vial de una ciudad. A su vez, en el trabajo de B. Dussault **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, para el problema de barrido de calles y nieve, la máxima instancia resuelta por métodos exactos, fue de 50 nodos.

Dado lo anterior, y teniendo en cuenta que el grafo que representa la red de la comuna de Santiago tiene un tamaño de 3.200 nodos y 9.700 arcos, la metodología propuesta para resolución del problema de ruteo óptimo formulado, consiste en un conjunto de heurísticas y resolución de sub-problemas por etapas.

Figura 20: Diagrama de Flujo Metodología de Solución



#### 4.2.2.2 Etapas y Sub-problemas

Las etapas que se definen para resolver el problema son las siguientes:

- **Etapa 0:** Subdivisión inicial del Grafo en subgrafos, asociados a una subdivisión inicial de la basura a recoger en jornadas distintas, para reducir el tamaño del problema, y con esto, que pueda ser resuelto por bloques  $G = G_1 \cup G_2 \cup G_3$
- **Etapa 1:** Generar datos necesarios para la resolución de los sub-problemas de las siguientes etapas. En esta etapa se resolverá la Obtención de Camino Mínimo entre todos los arcos del grafo, mediante el Algoritmo de Camino Mínimo, Dijkstra Adaptado.
  - o Dijkstra Adaptado; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**: El algoritmo consiste en buscar, para cada arco del grafo, el camino de mínimo costo a todos los otros arcos del sistema, considerando que el costo del camino incluye, el costo de paso por el arco, que se definió en la etapa de formulación, y la penalización por virajes con el fin de generar rutas lógicas y maniobrables desde el punto de vista operacional. Asimismo, los caminos encontrados deben ser factibles, es decir, que sea posible de realizar según la Red Vial, reduciendo tramos de caminos repetidos, con el fin de que

cada camino sea único y óptimo. A modo de ejemplo, se entrega el detalle del algoritmo:

**Algoritmo 1: Camino Mínimo, Dijkstra Adaptado** ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

**Entrada** :  $A \setminus A_f, c(a), \text{Ady}(A), P(A)$

**Salida** : Matriz de Camino Mínimo  $D(a, b)$ , Matriz de Predecesores  $Pre(a, b)$

**Para**  $a \in A \setminus A_f$

**Para**  $b \in A \setminus A_f$

$D(a, b) = \infty$

$Fix(b) = \text{Falso}$

**Fin Para**

**Para** cada  $b \in \text{Ady}(a)$

$D(a, b) = P(a, b)$

$Pre(a, b) = a$

**Fin Para**

$i = 1;$

**Mientras**  $i \leq |A \setminus A_f|$

$b = \text{argmin}\{D(a, x) \mid Fix(x) = \text{Falso}\}$

$Fix(b) = \text{Verdadero}$

**Para** cada  $z \in \text{Ady}(b)$

**Si**  $D(a, b) + c(b) + P(b, z) \leq D(a, z)$  **Entonces**

$D(a, z) = D(a, b) + c(b) + P(b, z)$

$Pre(a, z) = b$

**Fin Si**

**Fin Para**

$i = i + 1$

**Fin Mientras**

**Fin Para**

- **Etapa 2:** Construcción de una solución Inicial. Para esta etapa se utilizará el método conocido por "Cluster First – Route Second", el cual fue propuesto por Marks y Stricker en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, y ha sido utilizado en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, siendo reportado como uno de los métodos recomendados para el tratamiento de grafos y el ruteo por arcos.

La idea detrás de esta etapa es tener en cuenta que se desea encontrar  $|K|$  rutas, equivalentes a la cantidad de vehículos disponibles para realizar el ruteo. Entonces, el agrupar arcos de manera geográfica, en  $|K|$  grupos, y luego realizar el proceso de ruteo, permite generar una buena solución inicial, ya que se reduce el tamaño del problema y se relajan restricciones, permitiendo asegurar el encontrar solución y en corto tiempo de máquina, como se muestra en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

**Clusterización:** Para el proceso se utilizará el método Kmeans con Arcos, como el que se utiliza en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en el cual se obtienen  $|K|$  arcos representativos, llamados centroides, para los cuales se agruparán los arcos según su cercanía al centroide.

La selección de  $|K|$  arcos centroides se realizará usando la heurística "Vecino más Lejano", la cual consiste en seleccionar el arco con carga más lejano al Terminal, luego elegir el arco más lejano a éste, y así sucesivamente hasta completar  $|K|$  arcos. Luego, se continuará agrupando los arcos según cercanía. Posteriormente, y de manera iterativa, se recalculan los centroides y se repite el proceso de agrupamiento, hasta que no ocurran más movimientos, o se complete una cantidad de iteraciones.

---

#### Algoritmo 2: Kmeans Arcos

---

**Entrada** :  $G, A \setminus A_f, D(a, b), Pre(a, b), k = |K|, Iter\_max$

**Salida** :  $C_1, C_2, \dots, C_k$  clusters de arcos.

$c_1 = \operatorname{argmax}(D(N_k N_k, b), b \in A \setminus A_f);$

$C_1 = [c_1]$

$c'_1 = [];$

**Para**  $i = 2; i \leq k$

$c_i = \operatorname{argmax}(D(c_{i-1}, b), b \in A \setminus (A_f \cup c_{i-1}));$

$c'_i = []$  ;

$C_i = [c_i];$

**Fin Para**

$i = 0;$

$convergencia = 0$

**Mientras**  $convergencia = 0$  &  $i \leq Iter\_max$

**Para**  $a \in A \setminus A_f$

$h = \operatorname{argmin}(D(a, c_j) \setminus j \in 1, \dots, k)$

$C_h = C_h \cup a$

$x_a = (\operatorname{lat}(h(a)) + \operatorname{lat}(t(a)))/2$

$y_a = (\operatorname{long}(h(a)) + \operatorname{long}(t(a)))/2$

**Fin Para**

**Para**  $h = 1; h \leq k$

---

$$\bar{x}_a = \frac{(\sum_{a \in C_h} x_a)}{|C_h|}$$

$$\bar{y}_a = \frac{(\sum_{a \in C_h} y_a)}{|C_h|}$$

$$c'_h = \operatorname{argmin}(\sqrt{(x_a - \bar{x}_a)^2 + (y_a - \bar{y}_a)^2} \setminus a \in C_h)$$

**Fin Para**

**Si**  $\sum_{h \leq k} |D(c_h, c'_h)| < \epsilon$ , entonces  
*convergencia* = 1

**Fin Si**

**Para**  $h = 1; h \leq k$

$$c'_h = c_h$$

**Fin Para**

$i = i + 1$

**Fin Mientras**

**Ruteo:** El sub-problema a resolver para cada cluster se reduce a encontrar una ruta que pase por todos los arcos con carga (arcos requeridos), partiendo y terminando la ruta en el Terminal. Este problema es conocido como "Rural Postman Problem (RPP)", el cual es una generalización del problema "Chinese Postman Problem (CPP)", que se atribuye al matemático chino Kwan Mei-Ko, quien lo formula en el año 1962. Ambos problemas pertenecen a la familia de problemas NP-Complejos, sin embargo, existen condiciones necesarias y suficientes para la existencia de una solución, las cuales son consecuencia del trabajo de Leonard Euler sobre Grafos Eulerianos, y que permiten resolver el RPP y CPP mediante transformación del grafo.

La primera condición es que el subgrafo inducido por el cluster, sea fuertemente conexo, y el algoritmo **Conectar(G)** basado en el procedimiento indicado en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, realizará esta tarea.

**Algoritmo 3:** SCC(G) Componentes Fuertemente Conexas

**Entrada** :  $G(V, A)$

**Salida** :  $r\_indice$  Componentes conexas y raíces.

**Para**  $v \in V$

$$r\_indice(v) = 0$$

**Fin Para**

$C = \emptyset$

$indice = 1$

$c = |V| - 1$

**Para**  $v \in V$

**Si**  $r\_indice(v) = 0$  **Entonces**  
*visitar(v)*

**Fin Si**

**Fin Para**

**Función** *visitar(v)*

*root = verdadero*

//Variable local

*r\\_indice(v) = indice*

*indice = indice + 1*

```

Para  $(v, w) \in A$ 
  Si  $r\_indice(w) = 0$  Entonces
     $visitar(w)$ 
  Fin Si
  Si  $r\_indice(w) < r\_indice(v)$  Entonces
     $r\_indice(v) = r\_indice(w)$ 
     $root = falso$ 
  Fin Si
Fin Para
Si  $root$  Entonces
   $indice = indice - 1$ 
  Mientras  $C \neq \emptyset \wedge r\_indice(v) \leq r\_indice[top(C)]$ 
     $w = pop(C)$ 
     $r\_indice(w) = c$ 
     $indice = indice - 1$ 
  Fin Mientras
   $r\_indice(v) = c$ 
   $c = c - 1$ 
Si No
   $push(C, v)$ 
Fin Función

```

---

#### Algoritmo 4: Conectar( $G$ )

---

**Entrada:**  $G, A \setminus A_f, D(a, b), Pre(a, b)$

**Salida:**  $G'(V, A')$

$G_C = G(V, A_R)$

$r\_indice = SCC(G_C)$

$pq = \emptyset$

**Para**  $v \in G_C$

**Para**  $w \in G_C$

**Si**  $r\_indice(v) \neq r\_indice(w)$  **Entonces**

$push(pq, vw)$

**Fin Si**

**Fin Para**

**Fin Para**

**Mientras**  $|pq| > 0$

$(v_1 v_2) = pop(pq)$

**Si**  $r\_indice(v_1) \neq r\_indice(v_2)$  **Entonces**

**Si**  $EsUnica(G_C, (v_1 v_2))$  **Entonces**

$Agregar(G_C, (v_1 v_2))$

**Fin si**

$r\_indice = SCC(G_C)$

**Fin Si**

**Fin Mientras**

$G'(V, A') = G_C$

---



La segunda condición es que la cantidad de arcos que entran en un nodo sea igual a la cantidad de arcos que salen de él, por lo que en el algoritmo **RPP(G')** se realizará la agregación de arcos necesario y se ruteará basado en los algoritmos MST y RPP presentados en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** respectivamente.

#### Algoritmo 5: RPP (G)

**Entrada** :  $G_C, A_R, D(a, b), Pre(a, b), c(a), Ady(A)$

**Salida** :  $R(G)$ , Ruta asociada al tour en  $G_C$

**Para**  $v \in V$

$$\delta(v) = \sum_{a \in A} Ady(a, v) - \sum_{a \in A} Ady(v, a)$$

**Fin Para**

$$E = \{v \in V \mid \delta(v) > 0\}$$

$$D = \{v \in V \mid \delta(v) < 0\}$$

**Mientras**  $E \neq \emptyset$

$$b = (e, d) = \operatorname{argmin}\{c(a) \mid a = (e, d), e \in E, d \in D\}$$

$$n = \min(\delta(e), -\delta(d))$$

$$\operatorname{add}(A, n(e, d))$$

\\Agregar n arcos (e,d) a  $G_C$

$$\delta(e) = \delta(e) - n$$

$$\delta(d) = \delta(d) + n$$

Actualizar  $E, D$

**Fin Mientras**

$$G_T = G_C$$

$$a = (N_T, N_S)$$

$$\operatorname{tour} = [a]$$

Eliminar  $(N_T, N_S)$  de  $G_T$

**Mientras**  $|A_{G_T}| > 0$

*seleccionar\_siguiente*( $a, G_T$ )

$$\operatorname{tour} = [\operatorname{tour}, b]$$

Eliminar  $b$  de  $G_T$

**Fin Mientras**

**Retorna**  $R(G) = \operatorname{tour}$

**Función** *seleccionar\_siguiente*( $a, G$ )

$$b = \min(c(e) + cte(e) + P(a, b) \mid Adj(a, b) = 1)$$

**Si**  $G_T - b$  es conexo  $\vee (Adj(a, x) = 0 \mid \forall x \in G - \{b\})$  **Entonces**

**Retorna**  $b$

**Si No**

*seleccionar\_siguiente*( $a, G - \{b\}$ )

**Fin Si**

**Fin Función**

La última etapa del proceso de ruteo será la **Generación de Itinerarios**, método constructiva que incorporará los viajes a KDM, los descansos y colación, necesarios para completar tanto Expediciones como Jornadas, respetando restricciones de carga y penalizando por Sobre-Jornada, con el fin de generar una solución a partir de la cual comenzar a mejorar y optimizar.

En efecto, finalmente se decidió penalizar y no restringir la jornada, a objeto de no limitar el espacio de búsqueda del modelo matemático. El resultado es similar, pues la penalización por exceso de jornada fue lo suficientemente alta como para desincentivar el exceso de jornada, y realista desde la perspectiva del costo adicional que ello implica.

---

**Algoritmo 6:** Genera\_Itinerario(R,h)
 

---

**Entrada** :  $G, R, Par_{tc}, h$  (horario en que inicia ruta R)  
 $Par_{tc}$  es un parámetro para seleccionar el tipo de carga al camión, donde  $Par_{tc} = 1$  si se desea ir a KDM con máxima carga;  $Par_{tc} = 0$  si se desea ir a KDM con carga distribuida

**Salida** :  $IT(R)$ , Itinerario de la ruta R

$$SC = \sum_{a \in R} cg(a) * y_{ak}$$

$$NC_2 = SC/C$$

$$C_2 = SC/[NC_2]$$

$$Cmax = (1 - Par_{tc}) * C + Par_{tc} * C_2$$

$$t_1 = 0$$

$$pos_{act} = 0$$

$$C_{act} = 0$$

$$t_{act} = h$$

$$It_k = [(N_T, N_T)]$$

$$H_{It_k} = [t_{act}]$$

$$t_{act} = t_{act} + t_{Toma} \quad //t_{Toma} \text{ es tiempo de toma de camión (parámetro)}$$

$$J_k = (0,0) \quad // \text{ (posición inicial, posición final) en } It_k$$

**Para** ( $i = 1; i \leq |R|$ )

**Si**  $i = 1$

$$It_k = [It_k; a]$$

$$H_{It_k} = [H_{It_k}; t_{act}]$$

$$t_{act} = t_{act} + tv(a)$$

$$It_k = [It_k; (N_S, N_S)]$$

$$H_{It_k} = [H_{It_k}; t_{act}]$$

$$t_{act} = t_{act} + t_{sube} \quad //t_{sube} \text{ es tiempo de subida de cargadores al camión (parámetro)}$$

$$pos_{act} = 3$$

$$t_1 = t_{act} - h$$

**Si No**

**Si**  $t_1 + tv(a) + ts(a) * y_{ak} > Td$

$$b = tail(It_k(pos_{act}))$$

$$It_k = [It_k; (b, b)]$$

$$H_{It_k} = [H_{It_k}; t_{act}]$$

$$t_{act} = t_{act} + td \quad //td \text{ tiempo de descanso}$$

$$pos_{act} = pos_{act} + 1$$

$$t_1 = 0$$

**Si**  $C_{act} + cg(a) * y_{ak} > Cmax$

$$b = tail(It_k(pos_{act}))$$

$$It_k = [It_k; (b, N_K)]$$

$$It_k = [It_k; (b, N_K); (N_K, N_K); (N_K, b)]$$

$$\begin{aligned}
 H_{It_k} &= [H_{It_k}; t_{act}; t_{act} + tv((b, N_K)); t_{act} + tv((b, N_K)) + \\
 & \quad t_{atencion}(t_{act})] \\
 t_{act} &= t_{act} + tv((N_K, b)) \\
 t_1 &= tv((b, N_K)) + t_{atencion}(t_{act}) + tv((N_K, b)) \\
 pos_{act} &= pos_{act} + 3 \\
 C_{act} &= 0
 \end{aligned}$$

**Fin Si**

$$\begin{aligned}
 C_{act} &= C_{act} + cg(a) * y_{ak} \\
 It_k &= [It_k; a] \\
 H_{It_k} &= [H_{It_k}; t_{act}] \\
 t_{act} &= t_{act} + tv(a) + ts(a) * y_{ak} \\
 t_1 &= t_1 + tv(a) + ts(a) * y_{ak} \\
 pos_{act} &= pos_{act} + 1
 \end{aligned}$$

**Fin Si**

**Fin Para**

$$\begin{aligned}
 It_k &= [It_k; (N_S, N_S)] \\
 H_{It_k} &= [H_{It_k}; t_{act}] \\
 t_{act} &= t_{act} + t_{baja} + t_{colacion} \\
 pos_{act} &= pos_{act} + 1 \\
 J_k &= (3, pos_{act}) \\
 It_k &= [It_k; (N_S, N_K); (N_K, N_K)] \\
 H_{It_k} &= [H_{It_k}; t_{act}; t_{act} + tv((N_S, N_K)); t_{act} + tv((N_S, N_K)) + t_{deje} + t_{colacion}] \\
 P_{sobrecorrida} &= (H_{It_k}[size(H_{It_k})] - H_{It_k}[1]) - Tj + (H_{It_k}[pos_{act}] - H_{It_k}[3]) - Tj \\
 C(R_k) &= \alpha \cdot Cte(k) + \beta \cdot Km(k) + Pv(k) + \delta \cdot P_{sobrecorrida}
 \end{aligned}$$

#### Algoritmo 7: Ruteo( $G_K$ )

**Entrada** :  $G_K$   
**Salida** :  $It_k, J_k$ , Itinerario de Ruta y Jornadas de Trabajo

$$\begin{aligned}
 G_{RK} &= G_K(N, A_R) \\
 G_{RK}^c &= Conectar(G_{RK}) \\
 R_{(G_{RK}^c)} &= RPP(G_{RK}^c) \\
 Genera\_Itinerario & \left( R_{(G_{RK}^c)} \right)
 \end{aligned}$$

#### Algoritmo 8: Solucion()

**Entrada** :  $G, k$   
**Salida** :  $S$ , Solución

$$\begin{aligned}
 Solucion &= (R_k, It_k, H_{It_k}, C(R_k) / k \in K) \\
 FO_{Solucion} &= \sum C(R_k)
 \end{aligned}$$

- **Etapa 3:** Mejorar Solución. En esta etapa se busca modificar a partir de la solución ya encontrada, buscando factibilidad y optimalidad. Para ello, se utilizará el algoritmo metaheurístico conocido como **Simulated Annealing (SA)**, el cual se basa en los procesos de enfriamiento de metales, buscando la estabilidad en el estado energético de los materiales. El objetivo de SA es realizar una búsqueda extensiva por movimientos estocásticos a través de todo el espacio de soluciones, para ello, y con el fin de escapar de mínimos locales, en base a la temperatura del estado en revisión se decide realizar una búsqueda en el vecindario de una solución en curso, esta etapa se conoce como **Búsqueda Local**.
- El algoritmo que se utilizará para realizar la búsqueda local será **Swap de Arcos**, variante de aquellos utilizados en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y [9]. El algoritmo seleccionará dos clusters vecinos,  $C_i$  y  $C_j$  de manera aleatoria y un conjunto de arcos de ambos  $A_i$  y  $A_j$ , respectivamente, para luego permutar su pertenencia a cada cluster, es decir se modificará las configuraciones de cada cluster como:  $C'_i = C_i \setminus A_i \cup A_j$ ;  $C'_j = C_j \setminus A_j \cup A_i$ . Luego, se generará nuevas rutas para estos dos clusters, de acuerdo a la etapa de Ruteo antes definida.

En esta etapa, se habrá generado una Solución Óptima (heurística), sin embargo, los horarios de inicio de cada ruta, fueron prefijados para lograr encontrar soluciones a partir de las cuales empezar a mejorar. En la siguiente etapa se buscará mejorar tal asignación.

---

#### Algoritmo 9 : (SA) Simulated Annealing

---

```

Entrada      :  $G, S$ 
Salida      :  $S^*$ , Solución

 $tmax = par_{tmax} = 1000$            //Parámetro a calibrar
 $INC = tmax * 0,05$                  //Parámetro a calibrar
 $A = A_0 = 50$                        // Parámetro a calibrar
 $K = K_0 = 20$                        // Parámetro a calibrar
 $TR = TR_0 = 0,2$                    // Parámetro a calibrar
 $q = tmax$ 
 $t = 0$ 
 $C = 1$ 
 $Solucion^* = Solucion( )$ 
 $Solucion_{actual} = Solucion^*$ 
Mientras  $q \geq TR$ 
     $Obj = q$ 
     $c_a = 0$ 
     $c_k = 0$ 
    Mientras  $c_a \leq A \vee c_k \leq K$ 
         $Permutar( )$ 
    Fin Mientras
    Si  $t = INC * C$  Entonces
         $q = q * 0,9$                  // Parámetro a calibrar
         $C = C + 1$ 
    Fin Si
     $t = t + 1$ 
Fin Mientras

```

$S^* = \text{Solucion}^*$

**funcion** *Permutar*( )

$k_1 = \text{aleatorio}(K)$

$k_2 = \text{aleatorio}(K, (G_k, G_{k_1}) \text{ sean adyacentes})$

$n_1 = |A_{k_1}| * 0,25$  // Parámetro a calibrar

$n_2 = |A_{k_2}| * 0,25$  // Parámetro a calibrar

$(a_{k_1}) = \text{Seleccionar } n_1 \text{ arcos de } A_{k_1} \text{ que sean adyacentes 1-1}$

$(a_{k_2}) = \text{Seleccionar } n_2 \text{ arcos de } A_{k_2} \text{ que sean adyacentes 1-1}$

$G'_{k_1} = G(N, A_{k_1} - (a_{k_1}) + (a_{k_2}))$

$G'_{k_2} = G(N, A_{k_2} - (a_{k_2}) + (a_{k_1}))$

$R_1 = \text{Ruteo}(G'_{k_1})$

$R_2 = \text{Ruteo}(G'_{k_2})$

$\text{Solucion}_{\text{parcial}} = \text{Solucion}(G_k, R_1, R_2)$

*Compara*()

**Fin Funcion**

**funcion** *Compara*()

$Obj = FO_{\text{Solucion}_{\text{actual}}} - FO_{\text{Solucion}_{\text{parcial}}}$

**Si**  $Obj > 0 \vee \exp\left(\frac{Obj}{q}\right) \geq \text{aleatorio}(0,1)$  **Entonces**

$\text{Solucion}_{\text{actual}} = \text{Solucion}_{\text{parcial}}$

$c_a = c_a + 1$

**Si**  $FO_{\text{Solucion}^*} > FO_{\text{Solucion}_{\text{actual}}}$  **Entonces**

$\text{Solucion}^* = \text{Solucion}_{\text{actual}}$

**Fin Si**

**Fin Si**

$c_k = c_k + 1$

**Fin Funcion**

- **Etap 4:** Asignación de Horarios para  $S$ . El algoritmo de asignación consiste en buscar la mejor distribución de horarios a cada ruta, dentro del conjunto de horarios  $Hi$ . Para realizar la selección se asignará de manera aleatoria horarios dentro del conjunto y se evaluará la Función de Costos de cada una de las asignaciones, deteniendo el proceso hasta que se encuentre un nivel estable y de menor costo global.

**Algoritmo 10 :** *Asignar\_Horarios*()

**Entrada** :  $G, S, Hi$

**Salida** :  $S$ , Solución

$Sol^* = S$

$Sol^*_{\text{ant}} = S$

$Sol = S$

$\text{estable} = 1$

$\epsilon = 10^{-5}$  // Parámetro a calibrar

$iter_{\text{max}} = 10^{20}$  // Parámetro a calibrar

$cont = 0$

**Mientras**  $\text{estable} > \epsilon \wedge cont < iter_{\text{max}}$

Asignar de manera aleatoria cada  $Hi_j$  a cada  $R_j$  de  $S$

**Para**  $j = 1; j \leq k$   
     *Genera\_Itinerario*( $R_j, Hi_j$ )

**Fin Para**  
      $Sol = Solucion(S)$

**Si**  $FO_{Sol^*} > FO_{Sol}$  **Entonces**  
      $Sol_{ant}^* = Sol^*$   
      $Sol^* = Sol$

**Fin Si**  
      $estable = |FO_{Sol^*} - FO_{Sol_{ant}^*}|$   
      $cont = cont + 1$

**Fin Mientras**  
      $S = Sol^*$

---

- **Etapa 5:** Reasignación de  $G$ . La última etapa del proceso será una revisión de los resultados obtenidos para cada subgrafo  $G_i$ , buscando establecer la existencia de posibilidad de redistribución de servicios o rutas que apunten a una mejora de costos o de la operatividad del sistema global de rutas.

#### 4.2.2.3 Sub-referencias Bibliográficas del Modelo

- [1] P. Lacomme, C. Prins, W. Ramdane-Cherif (2004), *Competitive Memetic Algorithms for Arc Routing Problems*. Annals of Operations Research, 131:159-185.
- [2] C. Vásquez (2012), *Planificación y Optimización de Flotas de Vehículos para la Recogida de Residuos Urbanos*". Universidad Complutense de Madrid, Memoria Master en Ingeniería de Sistemas y Control.
- [3] B. Dussault (2012), *Modeling and Solving Arc Routing Problems in Street Sweeping and Snow Plowing*". University of Maryland, Dissertation PhD. <http://hdl.handle.net/1903/13620>
- [4] B. Golden, R. Wong (1981). *Capacitated arc routing problems*. Networks, 11(2):305–315.
- [5] H. Marks, R. Stricker (1971). *Routing for Public Service Vehicles*. ASCE Journal of the Urban Planning and Development Division 97, pp. 16-178.
- [6] A. Haghani (2000). *Calvert County Snow Emergency Decision Support System*. The State Highway Administration Maryland Department of Transportation. Final Report.
- [7] L. Xu (2011). *Graph Planning for Environmental Coverage*. The Robotics Institute, Carnegie Mellon University. Dissertation PhD.
- [8] A. Osterhues, F. Mariak (2005). *On Variants of the k-Chinese Postman Problem*. Universität Dortmund, Operations Research und Wirtschaftsinformatik, Vogelpothsweg 87, D 44 221
- [9] V. Maniezzo (2004). *Algorithms for Large Directed CARP Instances: Urban Solid Waste Collection Operational Support*. Technical Report UBLCS-2004-16



### 4.3 MODELO DE ASIGNACIÓN DE RECURSOS

De acuerdo a la modelación planteada, cada itinerario o tarea es realizada por un camión y un chofer, y en algunas de ellas con los cargadores, por lo que se entendió "recurso" de las dos formas según el escenario a modelar:

- Para la modelación de los Escenarios 1, 2, 3 y 4, se tratarán los recursos como cuadrilla, compuesta por un chofer y 3 cargadores.
- Para la modelación del Escenario 5, los recursos cargadores (3) y el chofer serán tratados de forma distinta, los cargadores podrán subirse a diferentes camiones durante el día.

#### Definiciones previas:

Sea  $W$  el conjunto de todas las tareas requeridas para operar el sistema y  $R$  el conjunto de tipos de recursos necesarios para dichas operaciones.

$HI_i$	: Hora de inicio de la tarea $i$ .
$HF_i$	: Hora de fin de la tarea $i$ .
$TD_i$	: Duración de la tarea $i$ .
$LI_i$	: Lugar donde debe iniciarse la tarea $i$ .
$LF_i$	: Lugar donde debe finalizar la tarea $i$ .
$r_i^k$	: Cantidad de recursos del tipo $k$ que requiere la tarea $i$ para poder ejecutarse.
$TMAX_k$	: Tiempo máximo que puede ser utilizado un recurso del tipo $k$ .

Donde:

$$i = \{1, 2, \dots, |W|\}$$

$$k = \{1, 2, \dots, |R|\}$$

Sea  $G(N, A)$  la red completa\*\*, donde:

$N$ : Conjunto de nodos.

$A$ : Conjunto de arcos.

$F$ : Conjunto de nodos fuente.

$S$ : Conjunto de nodos sumidero.

$$N = F \cup W \cup S$$

$$|F| = |S| = |R|$$

$$|A| = \binom{|N|}{2}$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{Si } HI_j - HF_i \geq 0 \wedge LI_i = LI_j \rightarrow \text{conexión } (i, j) \text{ factile.} \\ 0, & \text{e. o. c.} \rightarrow \text{conexión } (i, j) \text{ infactile.} \end{cases}$$

\*\* Notar que no es necesario construir la red completa, pero se plantea así pues el algoritmo de resolución desarrollado lo requiere.

**Variables:**

$$X_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{Si se asigna un recurso del tipo } k \text{ en la secuencia de tareas } (i, j). \\ 0, & \text{e. o. c.} \end{cases}$$

$Y_k$ : Número de recursos del tipo  $k$  requeridos para cubrir la operación

$TA_i^k$ : Tiempo acumulado de utilización de un recurso tipo  $k$  hasta la finalización de la tarea  $i$

$$TA_i^k = TD_i + \sum_{j/(i,j) \in A} X_{ij}^k \cdot TA_j^k$$

**Función Objetivo:**

Determinar la cantidad mínima de recursos necesarios para cubrir la operación.

$$Z = \min \sum_{k \in R} Y_k$$

**Restricciones:**

R1: El flujo de cada tipo de recurso que ingresa a cada nodo tarea debe ser igual a la cantidad que sale desde el nodo (conservación del flujo).

$$\sum_{j/(j,i) \in A} X_{ji}^k - \sum_{j/(i,j) \in A} X_{ij}^k = 0 ; \quad \forall i \in W, k \in R$$

R1.1: Para cada nodo fuente: el flujo que sale debe ser igual a la cantidad mínima requerida de cada recurso y no puede ingresar flujo.

$$\sum_{j/(i,j) \in A} X_{ij}^k = Y_k ; \quad \forall i \in F, k \in R$$

$$\sum_{j/(j,i) \in A} X_{ji}^k = 0 ; \quad \forall i \in F, k \in R$$

R1.2 Para cada nodo sumidero: el flujo que entra a debe ser igual a la cantidad mínima requerida de cada recurso y no puede salir flujo.

$$\sum_{j/(j,i) \in A} X_{ji}^k = Y_k ; \quad \forall i \in S, k \in R$$

$$\sum_{j/(i,j) \in A} X_{ij}^k = 0 ; \quad \forall i \in S, k \in R$$

R2: No pueden asignarse secuencias infactibles.

$$X_{ij}^k \leq a_{ij}; \quad \forall (i,j) \in A, k \in R$$

R3: A cada nodo tarea se debe asignar la totalidad de los recursos requeridos

$$\sum_{i/(i,j) \in A} X_{ij}^k = r_j^k \quad ; \quad \forall j \in W, k \in R$$

R4: Ningún recurso puede utilizarse más del tiempo máximo permitido.

$$TA_i^k \leq TMAX_k; \quad \forall i \in W, k \in R$$

**Naturaleza de las variables:**

$$X_{ij}^k \in \{0,1\}, \quad Y_k \in \mathbb{N}_0, \quad TA_i^k \in \mathbb{R}^+$$

## 4.4 DISEÑO GRAFOS

El diseño de los grafos se definió considerando como punto de partida la estructura de la red vial caracterizada previamente, además del consolidado de generadores.

A la estructura de la red vial se le realizaron los cambios necesarios, de manera que en el grafo se logren representar las distintas condiciones de operación existentes en la comuna a lo largo del día y de la semana. Es por lo anteriormente mencionado que se realizaron los siguientes procedimientos:

### 4.4.1 Asignación de Generadores a los Arcos

El grafo debe estar caracterizado con la cantidad de basura que se debe recoger de cada tipo de generador, por lo que a cada generador le fue asociado un arco de la red, para posteriormente estimar la cantidad de basura que genera, de acuerdo a las tasas de generación de basura para cada tipo de generador, obtenidas a partir del modelo de generación de basura.

Debemos recordar que tanto la red vial, como los generadores están georeferenciados. Sin embargo, debido a que dicha georeferenciación no provienen de la misma fuente, no todos los generadores están sobre un arco, por lo que se debió realizar un proceso de asignación espacial, en el que a cada generador le fuera asignado el arco más cercano, mientras coincidiera el nombre del eje.

En el caso de los generadores que fueran asociados a arcos por los que se debe circular 2 veces, es decir, una vez por cada calzada o pista, se realizó un procedimiento específico en el que se diferenciaron los generadores que están a un costado del eje y al otro, de acuerdo a la numeración de la dirección del rol que representado mediante cada generador.

Luego de este procedimiento, y dado que los generadores complejos producen una gran cantidad de basura, se verificó con los Jefes de Zona el eje por el cual efectivamente realizaban el retiro de basura de dichos generadores, pues durante las visitas a terreno el Consultor observó frecuentemente que a los generadores complejos se les retira su basura por una calle distinta a la que informó el Municipio como dirección (comercial).

A modo de ejemplo:

- La dirección de Falabella es Rosas, pero sacan y se les retira su basura por Manuel Rodríguez;
- La dirección de la Posta Central es Portugal, pero sacan y se les retira su basura por Diagonal Paraguay;
- La dirección de Aguas Andinas es Balmaceda, pero sacan y se les retira su basura por Teatinos;
- La dirección de la Universidad B.O'Higgins es Viel, pero sacan y se les retira su desde el interior del Parque O'Higgins;
- La dirección del Mall del Centro es Puente, pero sacan y se les retira su desde el interior del Parque O'Higgins;
- La dirección del INBA es calle Rosas, pero sacan y se les retira su basura por calle San Pablo.

**Debido a la cantidad de generadores, el ejercicio de verificación y corrección antes descrito se realizó exclusivamente para los generadores complejos, por lo que seguramente problemas del mismo tipo se encontrarán en el resto de generadores, siendo especialmente crítico en los generadores puntales, por la gran cantidad de basura que producen.**

Con respecto al eje San Diego-Bandera, que en los tramos Tarapacá-Moneda y Compañía-Santo Domingo se encuentra cerrado al tránsito por las obras de Metro, la basura generada en estos tramos se consideró dispuesta en las esquinas de los ejes por los que circulan los camiones recolectores.

Entre las intervenciones necesarias sobre la red vial se encuentra la eliminación de los arcos por los que no circulan los camiones. Esto implicó que todos los generadores que estaban asignados a alguno de estos arcos, les fue asignado al/algún arco por el que pasa camión que conecta con dicho arco.

Debemos recordar que algunos de los arcos por los que no circula camión son atendidos por alcance, es decir, que los cargadores entran a recoger la basura. En estos casos, se reasignaron sus generadores a arcos por lo que circula el camión, asociándoles un tiempo de caminata equivalente a 2 veces el tiempo que tarda en recorrer la distancia del arco por alcance, a una velocidad de 6 Km/hr. Este tiempo se asocia solo una vez al arco por el que pasa camión, independiente de la cantidad de generadores existentes en el arco por alcance.

Por otro lado, en los arcos por los que no circulan los camiones, y que no son atendidos por alcance, se considera que la basura está en un contenedor, ubicado en el arco colindante por el que sí circulan camiones, de modo que esta basura también fue asociada a un arco por donde pasa camión conectado directamente. Tanto en los arcos atendidos por alcance, como

en los que no, se encontraron casos en que están conectados directamente a 2 arcos por los que pasa camión, de modo que se distribuyó la basura de los generados en ambos arcos.

Es así como todos los generadores ubicados de arcos por los que no circulan camiones quedaron asociados a un arco por el que si circulan, con un porcentaje de la basura que corresponde al 100% si está conectado a solo un arco, y 50% si está conectado a 2 arcos.

En la construcción del grafo, también se consideró si los ejes estaban caracterizados como de doble pasada o no (recogiendo una vez por cada vereda).

- En el caso de los ejes de doble pasada con **doble calzada**, no se debe realizar ningún cambio al grafo, ya que existe un arco para cada sentido del eje.
- En el caso de los arcos que son **bidireccionales** y de doble pasada, tampoco se debe realizar un cambio. Sin embargo, los generadores localizados en ejes bidireccionales que no son de doble pasada, deben ser asociados a uno de los sentidos de tránsito, quedando el otro sentido como de circulación complementaria interna.
- Finalmente, en el caso de los arcos **unidireccionales**, fueron duplicados en el grafo, para representar ambas calzadas o pistas de la calle.

#### 4.4.2 Tipo de Disposición de la Basura

A cada generador, de acuerdo al tipo que fuere, le fue asignada una cantidad de basura de acuerdo al Modelo de Generación de basura. Esta basura puede estar en contenedores o a granel. Es así como la basura se encuentra dispuesta de la siguiente manera:

##### Basura Contenedor:

- Generadores Puntuales
- Generadores Complejos
- Simples de Educación
- Simples de Industria
- Todos los generadores ubicados al interior y en los límites del cuadrante delimitado por los ejes San Pablo. Rafael Sotomayor. Agustinas y Matucana (Plan Piloto Yungay)
- Todos los generadores ubicados al interior y en los límites del cuadrante delimitado por los ejes Matta Sur. Vicuña Mackenna. Ñuble y Carmen (Plan Piloto Matta Sur)

##### Basura a Granel:

- Todos los generadores que no están en contenedor. ni que se recolectan por alcance.

La importancia de hacer esta distinción radica en que apriori se consideró que los tiempos de recolección medidos como tasa de unidad de tiempo por kg de basura, dependen de la forma en que ella se encuentra dispuesta. Por cierto, y como se verá más adelante, se verificó tal supuesto.

### 4.4.3 Operación Nocturna y Horarios de Salida de la Basura

#### 4.4.3.1 Operación Nocturna

Para caracterizar los generadores con un horario de salida de la basura, en primer lugar se consideró una clasificación espacial de los arcos que se atienden de noche y los que se atienden de día. En efecto, y a pesar de que no era parte del alcance de la Asesoría, para definir el área de recolección nocturna se realizó un análisis espacial con distintas variables recopiladas a lo largo del estudio, y otras que entreguen una visión integral de la problemática.

Para este análisis se consideró como cuestión principal, las actividades que se desarrollan en la Comuna, basados en que la zona atendida de manera nocturna debe estar determinada por la concentración tanto de viajes generados como atraídos.

Es así como la zona nocturna debería estar conformada por los arcos que concentren la mayor cantidad de comercios y oficinas, pues están asociados a un alto número de población flotante. Lo anterior se justifica en que zonas con estas características tienen asociados altos flujos vehiculares y peatonales durante el día, lo que implica velocidades bajas, que inciden directamente en la flota requerida para la recolección de basura. Asimismo, la recolección diurna en estas zonas implicaría que el cruce de calzada de los cargadores debería ser en los cruces peatonales, con las demoras que ello implica en la recolección.

Solo a modo ilustrativo, si comparamos las velocidades de circulación (sin operación de carga) nocturna estimadas en la zona centro oriente con las desarrolladas durante al día, los tiempos de circulación aumentan en al menos un 20%.

**Tabla 34: Velocidades (Km/Hr) en DLN en la Zona Centro Oriente**

Zona/Velocidad (Km/hr)	0:00-7:00	7:00-10:00	10:00-17:00	17:00-21:00	21:00-24:00
<b>CENTRO-ORIENTE</b>	16.50	13.05	14.07	13.82	14.81

Fuente: Elaboración Propia a partir de Base de Datos SITRACK

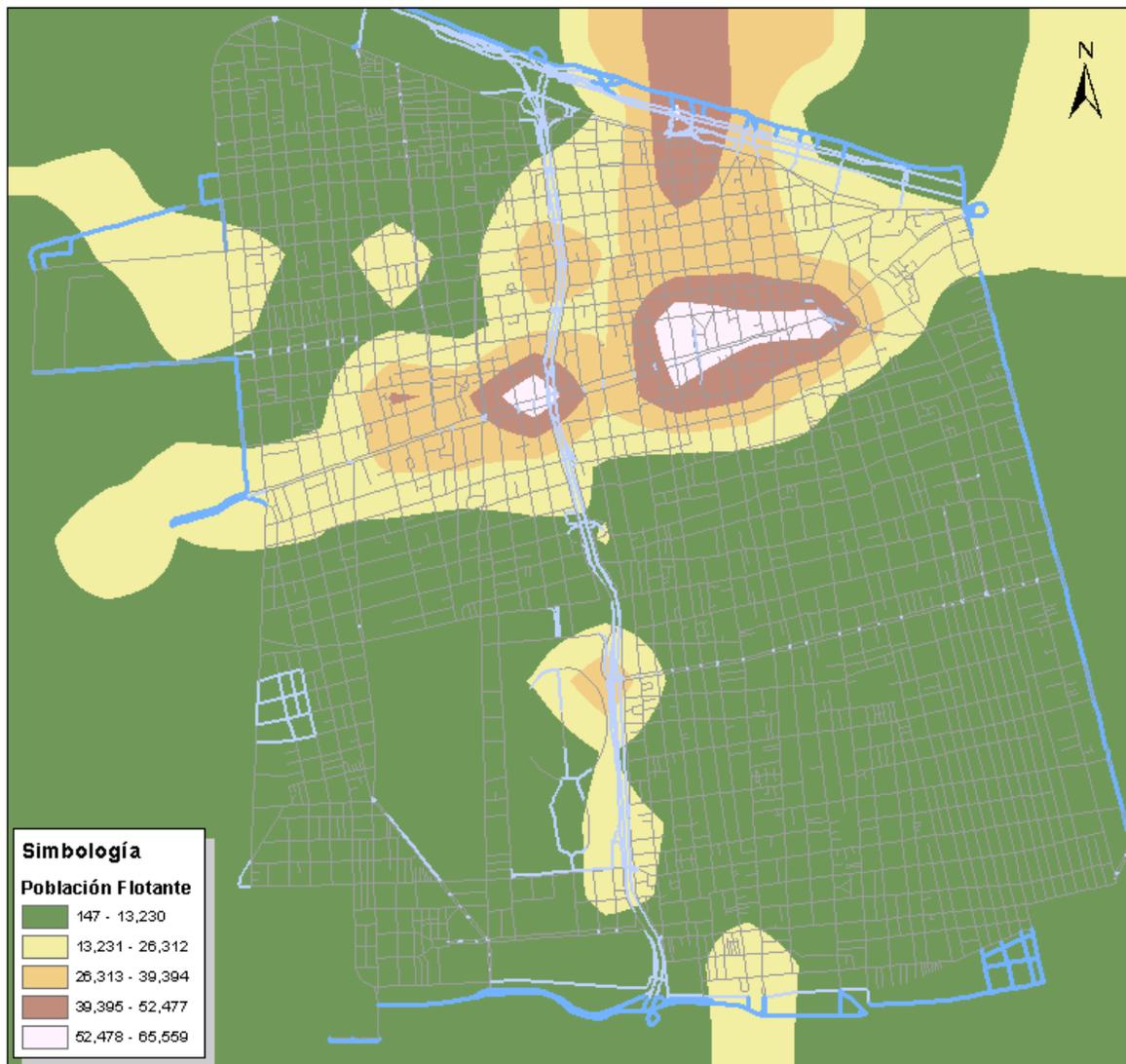
Otra cuestión relevante de considerar son las externalidades que genera la operación de recolección diurna en zonas de alta concentración de actividades, donde en principio se podrían señalar:

- Las incomodidades de peatones, tanto en las veredas como en los pasos peatonales
- 10 camiones operando en el triángulo central son en rigor 10 pistas de circulación bloqueadas en el centro de Santiago, con las implicancias en congestión, contaminación y en efectos de red que ello implica.

Para caracterizar la afluencia de población flotante de la comuna de Santiago, Cityplanning cuenta con la matriz de viajes en transporte público (buses y Metro) estimada para Septiembre del 2013, a partir de los registros bips de los usuarios de sistema, a nivel de parada. Es decir, para todas las paradas y estaciones de Metro de la comuna se sumaron tanto las subidas como las bajadas del sistema en una semana laboral, como una forma de representar el nivel de afluencia de cada eje.

Como esta información es a nivel de parada y por lo tanto puntual, se realizó un proceso de interpolación inversa a la distancia, de manera de zonificar la comuna de acuerdo a esta característica mediante un mapa de calor. El resultado de esta interpolación es el siguiente.

**Figura 41, Densidad de Afluencia de pasajeros del Transporte Público (buses y metro)**



**Fuente: Elaboración propia a partir de los registros de las tarjetas bips de los usuarios de sistema Transantiago**

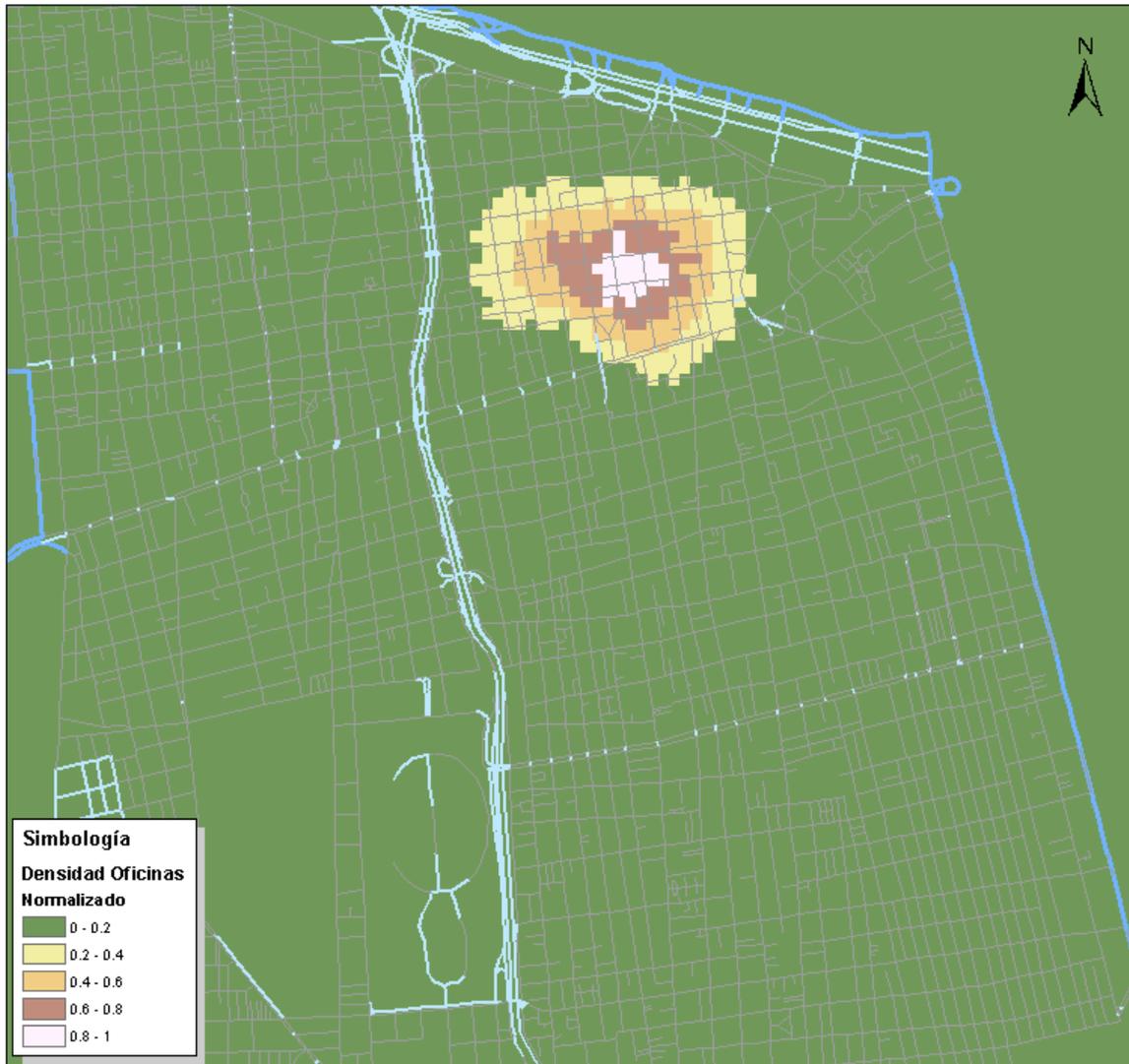
Para determinar el área geográfica en la que es apropiado recoger la basura de noche, es necesario identificar qué parte de las zonas de alta concentración de afluencia tienen también a una alta concentración de oficinas y comercios.

Figura 42, Densidad Normalizada (de 0 a 1) de Comercios



Fuente: Elaboración propia a partir de la Base de Generadores

Figura 43, Densidad Normalizada (de 0 a 1) de Oficinas



Fuente: Elaboración propia a partir de la Base de Generadores

Teniendo a la vista los distintos tipos de generadores considerados en este estudio, se concluye que los generadores complejos también sean considerados en este análisis, por ser en su mayoría comercios. También los recintos educacionales fueron considerados por atraer un gran volumen de personas, los cuales por cierto no necesariamente acceden a ellos en transporte público.

Figura 44, Densidad Normalizada (de 0 a 1) de Generadores Complejos



Fuente: Elaboración propia a partir de la Base de Generadores

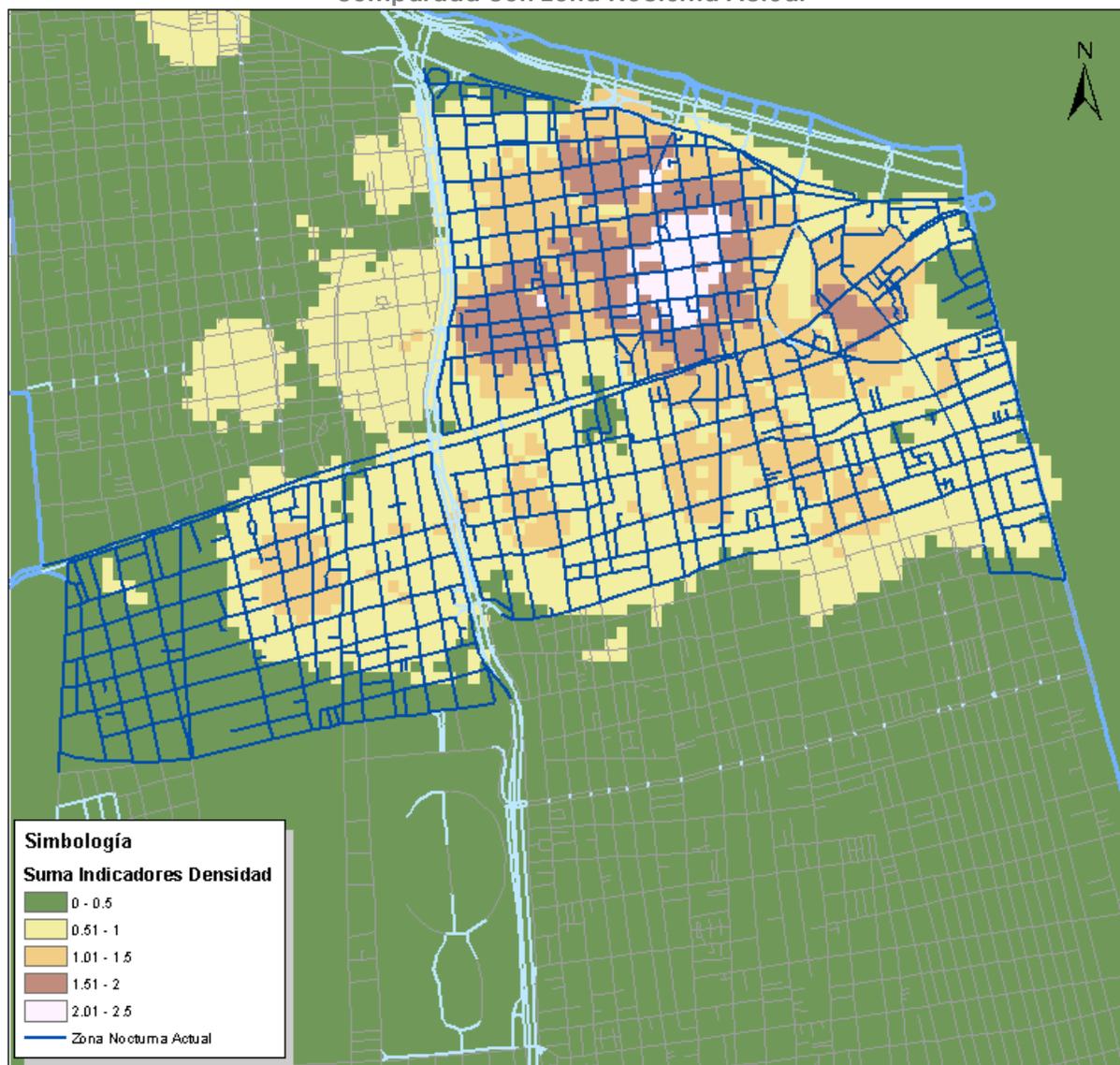
**Figura 45, Densidad Normalizada (de 0 a 1) de Establecimientos Educativos**

Fuente: Elaboración propia a partir de la Base de Generadores

El análisis normalizado de las densidades de los distintos tipos de generadores permite sumarlas, a objeto de tener una visión integral de dónde se generan las mayores concentraciones de servicios en la comuna.

De este modo, si se compara esta sumatoria de densidades con la zona nocturna actual, podemos concluir que esta última incluye las principales áreas de servicio de la comuna, por lo que no se identificaron razones de base para modificarla. Por el contrario, en cierta manera se valida la zona de operación nocturna actual, a partir del análisis realizado.

**Figura 46, Zonas de Mayor Concentración (suma de densidad normalizada) de Servicios, comparada con Zona Nocturna Actual**



Fuente: Elaboración propia a partir de la Base de Generadores y de los registros de las tarjetas bips de los usuarios de sistema Transantiago

Los generadores de esta zona nocturna fueron caracterizados por los siguientes horarios de salida de la basura, según lo planteado por el Municipio.

**Tabla 35: Horario de Salida de Basura – Zona Nocturna**

Tipo de Generador	Subtipo de Generador	Donde solo se atiende en Servicio Nocturno
<b>Simples</b>	Oficina + Comercio	20:00
	Habitación (incluye Cités) + Resto	20:00
<b>Puntuales</b>	Puntuales	10 minutos antes de que pase el camión
<b>Complejos</b>	Complejos	20:00

Fuente: Contraparte Técnica

#### 4.4.3.2 Operación Diurna y Nocturna

Se realizó un análisis por eje para identificar las calles que concentran la mayor cantidad de comercios, **que no perteneciesen a la zona nocturna recomendada en el punto anterior**, y que debido a múltiples razones requieren ser repasadas (recolección adicional a la diurna). Es así como se analizó a nivel eje la cantidad de comercios por km y la cantidad de basura generada por los comercios (kg/km). Luego se consideraron sólo los ejes que tuvieran más de 100 comercios, o bien, que el eje mida más de 2Km y que la basura comercial por km sea mayor a 150 kg/km. Lo anterior, por cierto, en la medida de que dichos comercios no se concentren en manzanas específicas. Este resultado fue comparado con los ejes en que, de acuerdo a lo reportado por los Jefes de Zona, actualmente se realiza repaso, habiendo coincidencia a excepción de los ejes Santa Elena y Chacabuco (entre Alameda y Agustinas), que fueron incorporados por decisión del Municipio. Como resultado del análisis anterior, los siguientes ejes fueron considerados con repaso en la noche.

Tabla 36: Ejes con Repaso Nocturno

EJE	FUENTE
CALLE FRANKLIN	Análisis Generadores Comercio
CALLE PLACER	Análisis Generadores Comercio
CALLE SAN DIEGO	Análisis Generadores Comercio
AVENIDA BRASIL	Análisis Generadores Comercio
CALLE ARTURO PRAT	Análisis Generadores Comercio
CALLE SAN FRANCISCO	Análisis Generadores Comercio
AVENIDA 10 DE JULIO HUAMACHUCO	Análisis Generadores Comercio
CALLE SAN PABLO	Análisis Generadores Comercio
AVENIDA MANUEL ANTONIO MATTA	Análisis Generadores Comercio
AVENIDA PORTUGAL	Análisis Generadores Comercio
CALLE COPIAPO	Análisis Generadores Comercio
CALLE CARMEN	Análisis Generadores Comercio
AVENIDA RICARDO CUMMING	Análisis Generadores Comercio
AVENIDA SANTA ROSA	Análisis Generadores Comercio
AVENIDA VICUNA MACKENNA	Análisis Generadores Comercio
CALLE LIRA	Análisis Generadores Comercio
CALLE NATANIEL COX	Análisis Generadores Comercio
CALLE VICTORIA	Análisis Generadores Comercio
CALLE SANTA ELENA	Propuesta Municipio
CALLE CHACABUCO	Propuesta Municipio

Fuente: Elaboración Municipio-Consultor

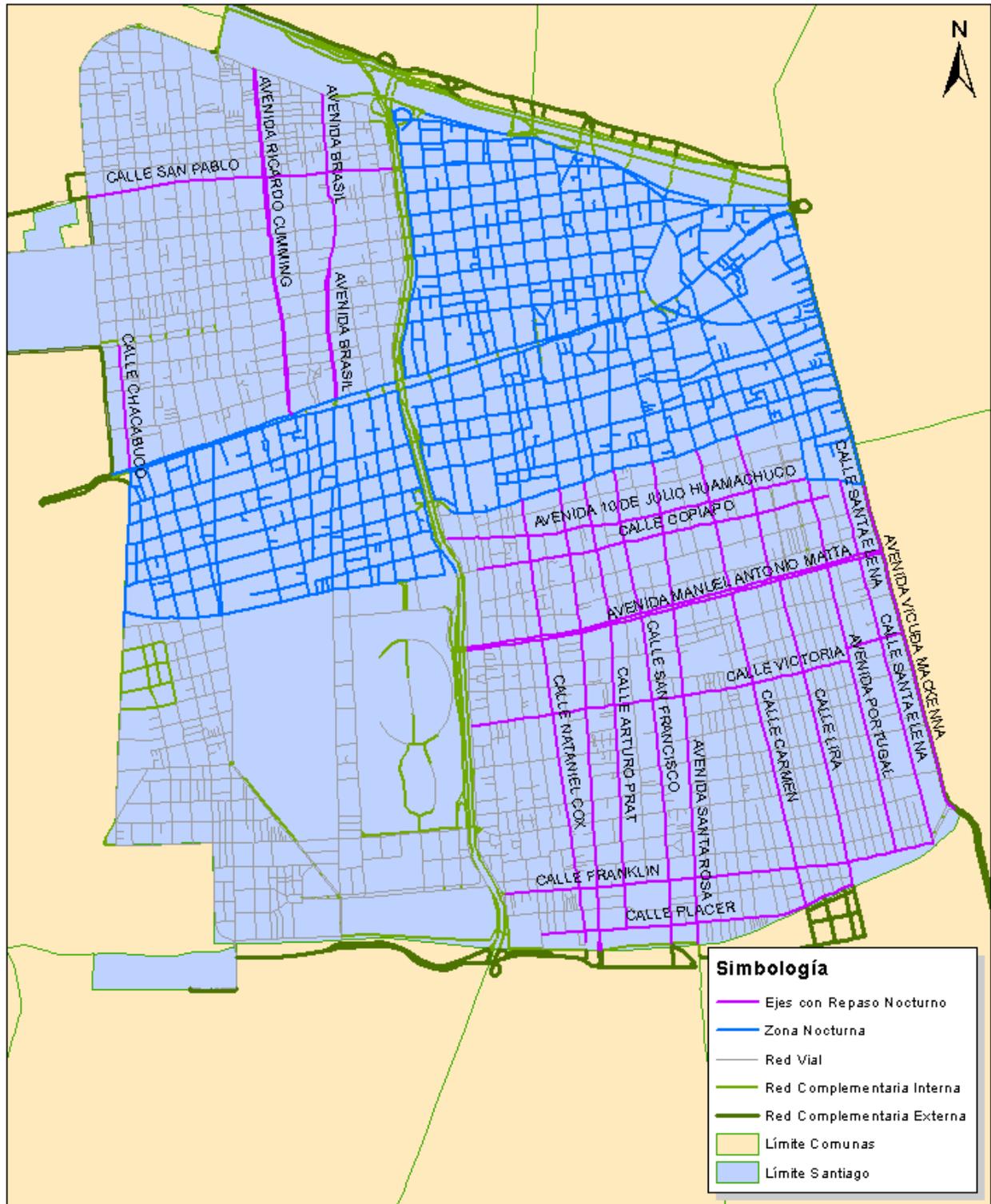
En estos ejes y de acuerdo a lo establecido con la Contraparte Técnica, se consideraron los siguientes horarios de salida de la basura a la calle, según el tipo de generador.

Tabla 37: Horario de Salida de Basura – Ejes Repaso Diurno y Nocturno

Tipo de Generador	Subtipo de Generador	Donde se atiende en Servicio Diurno y Nocturno
Simples	Oficina + Comercio	30% a las 07:10 y 70% a las 20:00
	Habitación (incluye Cités + Resto)	07:10
Puntuales	Puntuales	10 minutos antes de que pase el camión del <b>servicio diurno</b>
Complejos	Complejos	30% a las 07:10 y 70% a las 20:00

Fuente: Contraparte Técnica

Figura 47, Ejes de operación Diurna, con Repaso Nocturno



Fuente: Elaboración Municipio-Consultor

### 4.4.3.3 Operación Diurna

Finalmente, los generadores que se encuentran en arcos que se atienden solo en el periodo diurno, sacan la basura de la siguiente manera, de acuerdo a lo establecido por el Municipio.

**Tabla 38: Horario de Salida de Basura – Zona Diurna**

Tipo de Generador	Subtipo de Generador	Donde solo se atiende en Servicio Diurno
Simples	Oficina + Comercio	07:10
	Habitación (incluye Cités + Resto)	07:10
Puntuales	Puntuales	10 minutos antes de que pase el camión
Complejos	Complejos	07:10

Fuente: Contraparte Técnica

Con estas definiciones de horarios, se puede estimar para cada generador, de acuerdo al tipo o su ubicación, la cantidad de basura que genera tanto para la recolección diurna como nocturna.

Finalmente, con la definición de la hora de salida de la basura por generador, y el periodo de recolección según el arco en el que se ubica, es posible asignar a cada arco, la cantidad de basura por subtipo de generador y periodo del día (día o noche), que debe ser recolectada.

**Tabla 39: Basura por Zona, Tipo Generador y Jornada de Recolección en DLN**

ZONA	TIPO	BASURA JORNADA DIURNA (Kg)	BASURA JORNADA NOCTURNA (Kg)
CENTRO-ORIENTE	Complejo	0	12,111
	OFI-COM	0	45,297
	Puntual	0	5,735
	HAB-OTROS	0	30,768
<b>Total CENTRO-ORIENTE</b>		<b>0</b>	<b>93.911</b>
CENTRO-PONIENTE	Complejo	3.973	1,020
	OFI-COM	3.804	3,381
	Puntual	6.584	49
	HAB-OTROS	62.039	916
<b>Total CENTRO-PONIENTE</b>		<b>76.400</b>	<b>5.366</b>
ORIENTE	Complejo	1.930	4,391
	OFI-COM	7.442	22,694
	Puntual	8.224	12,380
	HAB-OTROS	112.735	40,126
<b>Total ORIENTE</b>		<b>130.331</b>	<b>79.592</b>
PONIENTE	Complejo	2.706	5,172
	OFI-COM	1.121	13,060
	Puntual	525	2,172
	HAB-OTROS	23.539	44,467
<b>Total PONIENTE</b>		<b>27.892</b>	<b>64.870</b>
<b>TOTAL GENERAL</b>		<b>234.624</b>	<b>243.738</b>

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.4.4 Especificación Condiciones de Operación

Para caracterizar la red es necesario contar también con los tiempos de viaje de cada uno de los arcos que la conforman, sin embargo, debido a la naturaleza del proceso de recolección de residuos, es necesario diferenciar estos tiempos según la tarea que esté realizando el camión.

Los desplazamientos que desarrolla el camión se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Desplazamientos en operación
- Desplazamientos sin operación (solo en circulación o desplazamiento)

Por lo tanto el tiempo total que consume el camión al recorrer el arco se puede escribir de la siguiente manera:

$$t_i^p = t_{id}^p + t_{ir}^p$$

Dónde:

$t_i^p$ : es el tiempo total en el arco  $i$  en el periodo  $p$

$t_{id}^p$ : es el tiempo de desplazamiento en el arco  $i$  en el periodo  $p$

$t_{ir}^p$ : es el tiempo de recolección en el arco  $i$  en el periodo  $p$

Un arco que se recorra realizando recolección tendrá ambas componentes, mientras que el resto tendrán sólo la primera.

Considerando la definición anterior el tiempo total en la ruta sería:

$$t_{tr} = \sum_p \sum_i t_i^p$$

Por lo tanto para conocer el tiempo total de operación en una ruta es necesario saber los tiempos de desplazamiento y los tiempos de recolección de los arcos que la componen.

#### Tiempos de Operación

Cuando un camión está operando, es decir, está realizando el proceso de recolección, su velocidad media de desplazamiento es baja dado que durante numerosos momentos debe estar detenido mientras los cargadores realizan el proceso de carga. Los tiempos en los cuales el camión está detenido dependen, en principio, de la cantidad de basura que tenga el arco, por lo que se propone un modelo con la siguiente forma funcional:

$$t_{ci} = \sum_j^n \beta_j \cdot q_{ij}$$

Dónde:

$t_{ci}$ : tiempo de carga en el arco  $i$

$q_{ij}$ : cantidad de basura del tipo  $j$  en el arco  $i$

$\beta_j$ : Tasa de demora (en tiempo) de carga por cada unidad de basura del tipo  $j$

Este tratamiento supone que existen diferentes tipos de basura, los cuales pueden clasificarse según el tiempo que implica cargarlas. El formular una tasa uniforme para cada tipo de basura asume que el tiempo de carga de un determinado tipo de basura no varía con los arcos.

Un problema que presenta el modelo anterior es que no considera los arcos donde se generan residuos pero el camión no puede circular. Para considerar esta situación sea agrega un término que considera el tiempo de caminata en los arcos que son recolectados por alcance:

$$t_{ci} = \frac{d_a}{v_c} + \sum_j^n \beta_j \cdot q_{ij}$$

En donde  $d_a$  es la distancia de alcance y  $v_c$  es la velocidad de caminata.

Para calibrar el modelo planteado es necesario contar con los tiempos de carga y la cantidad de basura de cada tipo en cada uno de los arcos.

### Tiempos de Desplazamiento (sin operación)

Los tiempos de desplazamiento sin realizar recolección corresponden a los tiempos de viaje que presentan los arcos (considerando la congestión), por lo que determinar los tiempos de desplazamiento equivale a encontrar la velocidad de circulación de los vehículos para todos los arcos de la red. Dado que la velocidad de los arcos varía durante el día, se propuso realizar una segmentación en periodos que minimizara la variabilidad.

Considerando las definiciones anteriores se tiene que la ecuación que define los tiempos de viaje total por arco es la siguiente:

$$t_i^p = t_{id}^p + t_{ir}^p = \frac{d_i}{v_{pi}} + \frac{d_{ai}}{v_{ci}} + \sum_j^n \beta_j \cdot q_{ij}$$

Dónde:

$d_i$ : distancia del arco  $i$

$v_{pi}$ : velocidad en el arco  $i$  en el periodo  $p$

$d_{ai}$ : distancia recolectada por alcance asociada al arco  $i$

$v_{ci}$ : velocidad de caminata en el arco  $i$  en el periodo  $p$

$\beta_j$ : tasa de demora en tiempo de carga por cada unidad de basura del tipo  $j$

$q_{ij}$ : cantidad de basura del tipo  $j$  en el arco  $i$

$n$ : tipos de basura

Para obtener el tiempo total de una ruta basta con agregar los arcos que la componen. Una simplificación que puede surgir de este hecho corresponde a los tiempos de viaje desde y hacia la estación de transferencia KDM. Dado que todas las rutas ingresan a la autopista en un determinado punto, realizan la descarga y luego se incorporan a la red en el mismo punto o en un punto cercano este tiempo puede asumirse como un valor conocido, por lo tanto la ruta completa queda definida por la ecuación:

$$t_i^p = t_{KDM} + \sum_{i=1}^I \frac{d_i}{v_{pi}} + \frac{d_{ai}}{v_{ci}} + \sum_j^n \beta_j \cdot q_{ij}$$

En donde  $t_{KDM}$  corresponde a los tiempos de ida y vuelta a la estación de transferencia.

#### 4.4.4.1 Tiempos de Desplazamiento o Circulación

Para encontrar la velocidad de circulación de los arcos se puede recurrir a información que se encuentre disponible. Una base de datos disponible y fácilmente accesible es la de Google, la cual para una ruta dada entrega el tiempo de viaje, lo cual puede ser utilizado para obtener las velocidades por arco.

Considerando que las velocidades de los arcos varían durante el día se propone dividir el día en periodos y tratar de forma distinta días laborales, sábados y domingos. La periodización propuesta se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 40: Periodización de la Modelación**

Día	Periodo	Hora
<b>Laboral</b>	1	0:00 - 7:00
	2	7:00 - 10:00
	3	10:00 - 17:00
	4	17:00 - 21:00
	5	21:00 - 24:00
<b>Sábado</b>	6	0:00 - 7:00
	7	7:00 - 11:00
	8	11:00 - 17:00
	9	17:00 - 21:00
	10	21:00 - 24:00
<b>Domingo</b>	11	0:00 - 9:00
	12	9:00 - 13:00
	13	13:00 - 17:00
	14	17:00 - 21:00
	15	21:00 - 24:00

Fuente: Elaboración propia

Luego del análisis de la información extraída desde Google (ver Anexo 8.2), sumado al desconocimiento del algoritmo de cálculo de sus velocidades, se descartó usar Google como fuente de información para esta asesoría.

Otra información disponible para calcular los tiempos de desplazamiento corresponde a los registros de GPS de los camiones recolectores, disponibilizados por SITRACK. En efecto, se recibió una base de datos que contiene los pulsos GPS de los camiones durante el periodo comprendido entre el 01 de enero de 2014 hasta el 14 de mayo de 2014. La información consiste básicamente en la posición y hora del camión cada 60 segundos. El total de datos es de 3.919.752 pulsos GPS. A continuación un extracto de la base de datos, del cual es posible identificar los campos (esta versión no incluye información de volumen teórico de la carga).

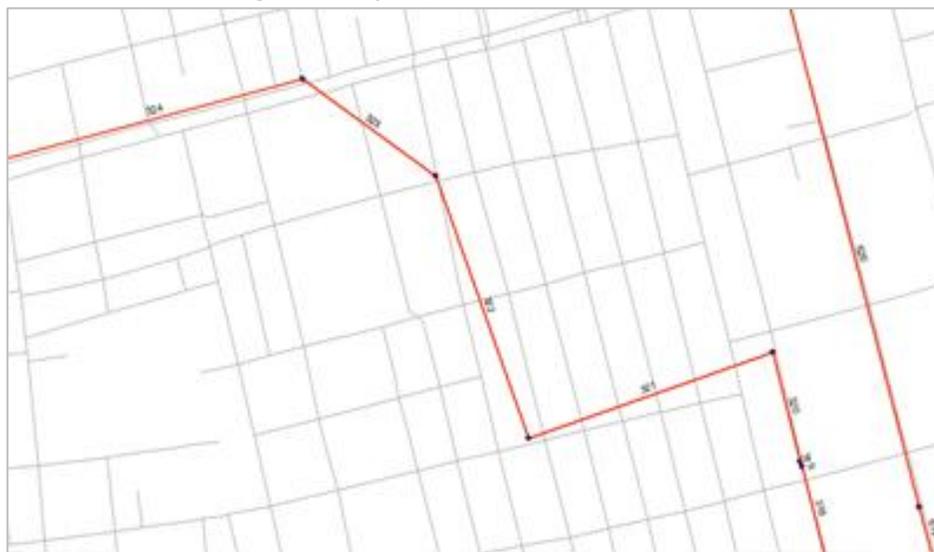
Tabla 41: Campos de la Base de Datos

Evento	Equipo	Nombre	Dominio	Fecha Posición	Latitud	Longitud	Ubicación	Velocidad	Rumbo	Canal
Reporte por tiempo	65885	315	MY5251	01-01-2014 0:01	-3.346.843.500	-7.062.831.000	General Gana 193. Santiago Central.Santiago.Santiago.Chile	0	SE	GPRS
Reporte por tiempo	65879	314	MY5250	01-01-2014 0:01	-3.346.856.000	-7.062.872.200	General Gana 167. Santiago Central.Santiago.Santiago.Chile	0	S	GPRS
Reporte por tiempo	66015	306	MY4085	01-01-2014 0:02	-3.346.828.500	-7.062.891.500	Padre Orellana 1884. Santiago Central.Santiago.Santiago.Chile	0	O	GPRS

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

De la inspección visual de los pulsos de GPS desplegados sobre una cartografía se observa que los cambios de sentido de tránsito del camión no aparecen registrados en la base de datos.

Figura 48, Ejemplo de trazado camión



Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

Los posibles eventos de la base de datos se identifican en la tabla siguiente, quedando en evidencia que no se registra como evento específico el cambio de sentido de circulación. Consultado al personal técnico de SITRACK (Sr. Julio Berríos), se confirmó que los eventos de cambio de dirección no quedan registrados como eventos, pero podrían registrarse si se configurasen los equipos y sistemas. Sin embargo, el tiempo para hacer esta reconfiguración y recopilar suficientes datos nuevos, excedía los plazos de este estudio, por lo que no fue posible aprovechar esta estrategia de reconfiguración.

**Tabla 42: Eventos Registrados Base de Datos de SITRACK**

<b>EVENTO</b>
<b>Batería baja</b>
<b>Computadora abordo</b>
<b>Conexión Antena GPS</b>
<b>Contacto OFF</b>
<b>Contacto ON</b>
<b>Desconexión Antena GPS</b>
<b>Desconexión de alimentación externa</b>
<b>Fin de Actividad(ECU)</b>
<b>Fin de detenido</b>
<b>Fin de sobrevelocidad</b>
<b>Fin de sobrevelocidad (ECU)</b>
<b>Inicio de Actividad(ECU)</b>
<b>Inicio de detenido</b>
<b>Inicio de sobrevelocidad</b>
<b>Inicio de sobrevelocidad (ECU)</b>
<b>Perdida señal GPS</b>
<b>Reconexión de alimentación externa</b>
<b>Recupero señal GPS</b>
<b>Reporte de Volumen</b>
<b>Reporte por distancia</b>
<b>Reporte por tiempo</b>
<b>Respuesta a pedido de posición</b>

**Fuente:** Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

El procedimiento adoptado para el uso de la información contenida en la base de datos de SITRACK fue el siguiente:

- i. Se recibió una base de datos con 3.919.752 registros
- ii. Se mantuvieron solo los registros que presentaran como eventos las siguientes categorías:
  - a. Reporte por tiempo
  - b. Reporte por distancia
  - c. Reporte por volumen
- iii. Luego del aplicar este filtro solo quedaron 3.053.423 registros
- iv. Los datos fueron agrupados por dominio (patente), fecha, hora, para luego ser ordenados temporalmente
- v. Con este ordenamiento se generaron bloques de trabajo agrupando puntos consecutivos que no tuviesen diferencias mayores a 1 minuto
- vi. A los puntos consecutivos se les calculó la distancia

Para clasificar los movimientos como operativos y no operativos se utilizaron los siguientes criterios:

- Si la velocidad, es decir, la distancia entre 2 pulsos GPS consecutivos dividido por el tiempo entre ellos, es superior a 6km/hr, se considera este desplazamiento como no operativo (circulación)

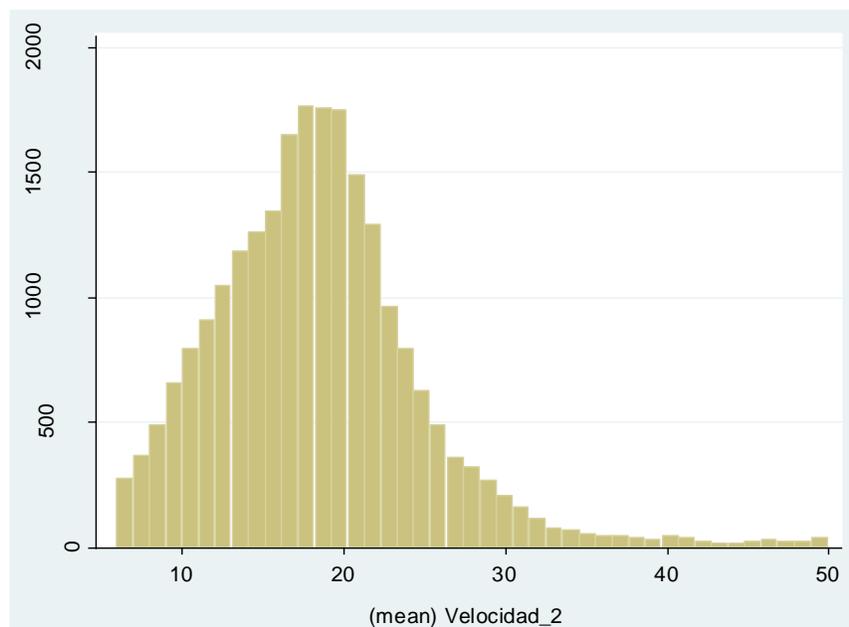
- Si la velocidad, es decir, la distancia entre 2 pulsos GPS consecutivos dividido por el tiempo entre ellos, es inferior a 6km/hr, se considera este desplazamiento como uno en el cual se realiza carga de basura
- Adicional a ambos filtros previos, se eliminaron todos los datos con velocidad superior a 50km/hr, debido a que corresponde al límite legal de velocidad en áreas urbanas, y no corresponde promover o aceptar dicho comportamiento.

El límite de 6 km/hr se basa en la velocidad de caminata, es decir, si el camión se desplaza a una velocidad superior a la velocidad de caminata de una persona, se asume que se está desplazando, y en caso contrario está realizando recolección de residuos.

A su vez, el valor de 6,0 km/hr corresponde a la velocidad de caminata para hombres menores a 55 años según Research on Road Traffic (R.R.L.), Londres, 1965, citado por el Manual de Vialidad Urbana del MINVU, edición 2009.

Considerando las dificultades que se presentaron en la asignación de los pulsos a los arcos, estos se trabajaron sin realizar esta asignación y lo que se obtienen son velocidades promedio cuyo histograma se muestra a continuación:

**Figura 21, Histograma de velocidades a nivel de Arcos**



**Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK**

Algunas estadísticas descriptivas de estas velocidades se muestran en la siguiente figura:

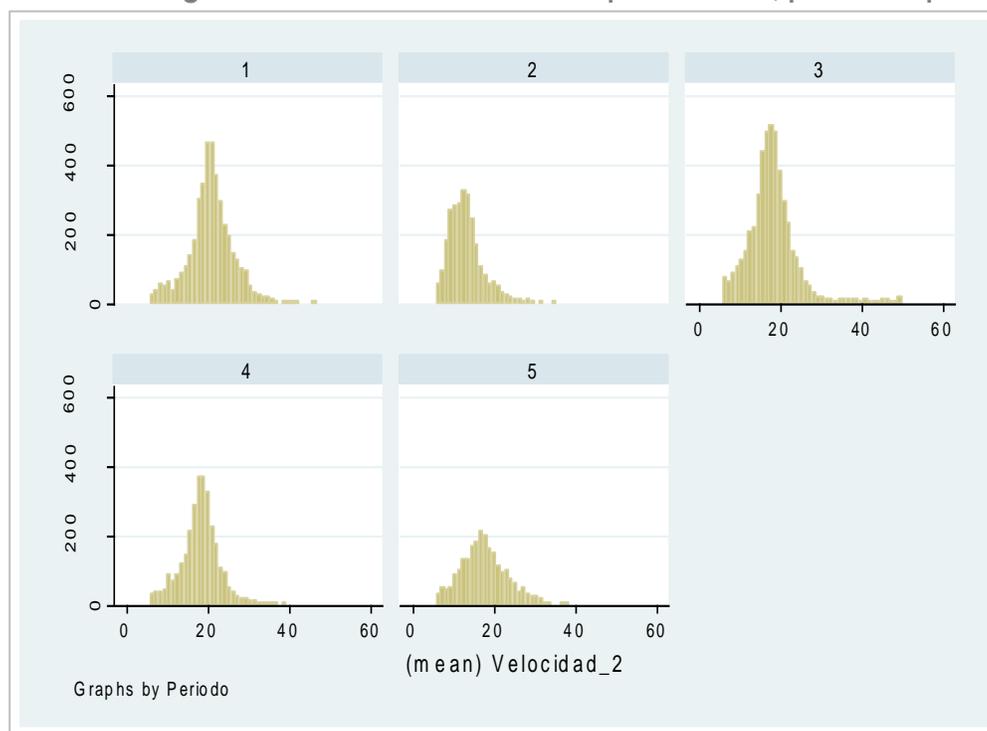
**Tabla 43: Estadísticas descriptivas de velocidades**

mean:	<b>18.4679</b>				
std. dev:	<b>6.38446</b>				
percentiles:	10%	25%	50%	75%	90%
	<b>10.7706</b>	<b>14.2055</b>	<b>18.1332</b>	<b>21.6788</b>	<b>25.917</b>

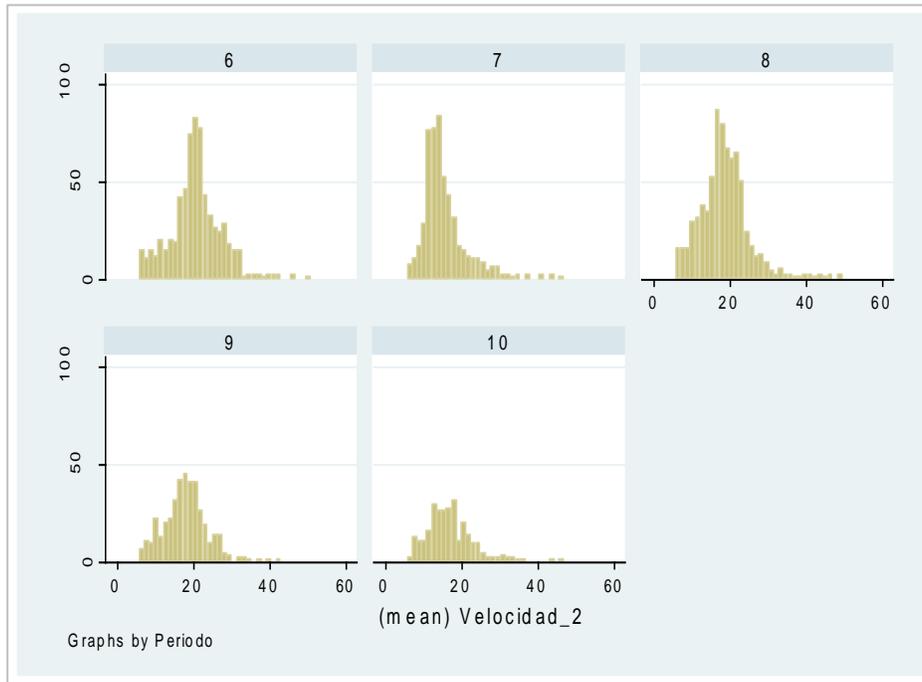
Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

En la tabla anterior se aprecia que la media de velocidades es de 18,4 km/h y la mediana es 18,1; cuestión indicativa de que la cola tiende a valores más altos. En el histograma se aprecia que el primer tramo está vacío debido al filtro aplicado (solo velocidades mayores a 6 km/hr).

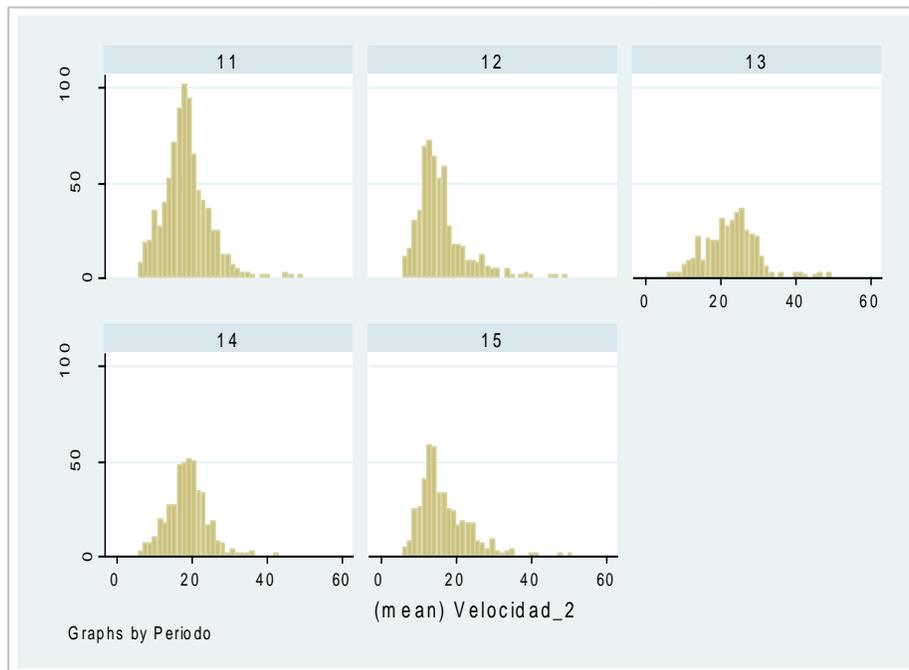
Al observar los percentiles se aprecia que el 90% de las velocidades son inferiores a 25,9 km/hr, lo cual parece razonable considerando que se trata de camiones desplazándose en vías urbanas. Por otro lado, solo el 90% de los datos presenta velocidades superiores a 10,8km/hr. Si se analizan los histogramas de los periodos propuestos en la periodización se tiene lo siguiente:

**Gráfico 22: Histogramas de Velocidades en día Tipo Laborales, para sus 5 periodos**

Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

**Gráfico 23: Histogramas de Velocidades en día Tipo Sábado, para sus 5 periodos**

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

**Gráfico 24: Histogramas de Velocidades en día Tipo Domingo/Festivo, para sus 5 periodos**

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

El siguiente cuadro muestra el promedio y algunos percentiles de las Velocidades obtenidas:

Tabla 44: Velocidades por periodo [km/hr]

TIPO DIA	Periodo	Velocidad Promedio	pct10	pct25	pct50	pct75	pct90	Desv. Estándar
DLN	1	21,2	14,3	18,3	21,0	24,1	28,1	5,9
DLN	2	13,8	8,9	10,5	13,0	15,6	19,9	4,8
DLN	3	18,7	11,5	15,1	17,9	20,9	25,2	6,7
DLN	4	18,6	12,1	16,0	18,6	21,0	24,1	5,3
DLN	5	18,2	11,0	14,1	17,6	21,5	26,1	6,2
SAB	6	21,0	12,1	17,5	20,7	24,3	29,2	6,7
SAB	7	16,0	10,7	12,3	14,4	17,7	24,0	5,9
SAB	8	18,9	11,1	15,2	18,5	22,0	25,9	6,5
SAB	9	18,3	10,6	14,8	18,3	21,2	25,7	5,6
SAB	10	17,2	10,2	13,1	16,5	20,5	24,4	6,1
DOM	11	18,7	11,3	15,3	18,4	21,8	26,0	5,8
DOM	12	16,0	9,9	12,1	14,5	17,8	24,6	6,2
DOM	13	22,9	14,0	18,5	23,3	27,0	29,8	6,8
DOM	14	19,1	12,5	16,1	19,1	21,9	25,3	5,0
DOM	15	16,8	10,2	12,6	15,1	19,9	24,9	6,3

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

Para aumentar la precisión de la estimación de velocidades de desplazamiento o tiempos de circulación, se analizaron los datos a nivel zona. La cantidad de datos de velocidad en cada zona se muestra en la siguiente tabla:

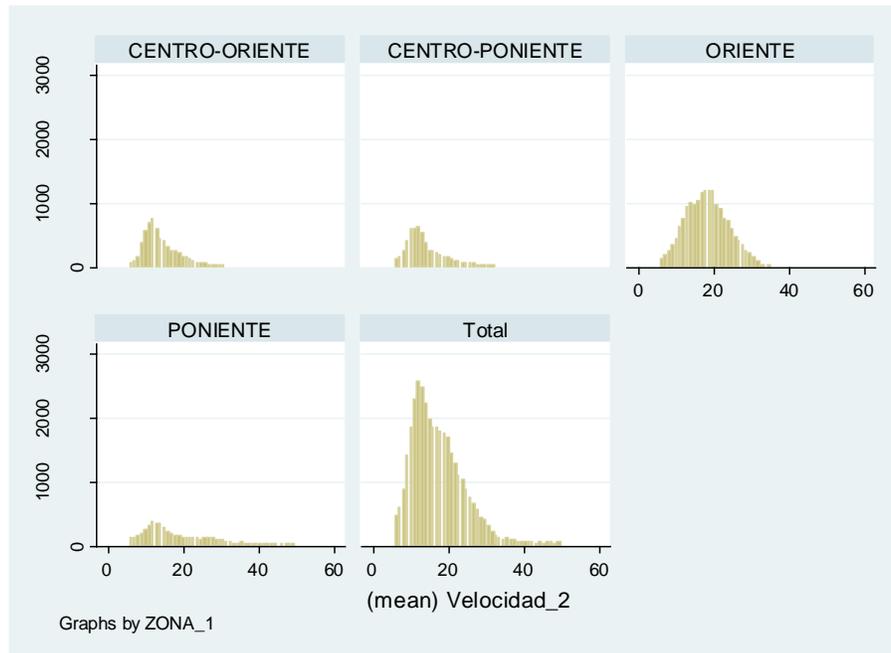
Tabla 45: Registros de velocidades por Periodo-Zona

Periodo	CENTRO-ORIENTE	CENTRO-PONIENTE	ORIENTE	PONIENTE	Total
1	17.443	4.462	42.022	10.364	74.291
2	3.246	16.305	26.451	5.519	51.521
3	6.315	26.380	62.561	10.224	105.480
4	4.804	4.921	26.899	980	37.604
5	10.843	1.436	18.362	5.003	35.644
6	3.875	750	7.299	2.274	14.198
7	762	4.017	7.746	1.170	13.695
8	803	3.948	9.329	1.540	15.620
9	686	720	3.197	115	4.718
10	1.763	163	2.516	269	4.711
11	4.079	1.824	9.768	1.054	16.725
12	1.042	4.575	8.891	1.793	16.301
13	649	947	2.756	234	4.586
14	836	812	3.311	71	5.030
15	3.098	342	3.990	2.044	9.474
<b>Total</b>	<b>60.244</b>	<b>71.602</b>	<b>235.098</b>	<b>42.654</b>	<b>409.598</b>

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

Los histogramas de velocidades en cada zona se muestran en las siguientes figuras:

**Gráfico 25: Histogramas de Velocidades por Zona**



Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

En las siguientes figuras se muestran algunos indicadores estadísticos de las zonas y del total:

**Tabla 46: Velocidad promedio y percentiles, Nivel Comunal**

mean:	<b>17.8465</b>				
std. dev:	<b>7.3084</b>				
percentiles:	10%	25%	50%	75%	90%
	<b>10.0733</b>	<b>12.4412</b>	<b>16.5188</b>	<b>21.7158</b>	<b>27.196</b>

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

**Tabla 47: Velocidad promedio y percentiles Zona Centro-Oriente**

mean:	15.1516				
std. dev:	5.84847				
percentiles:	10%	25%	50%	75%	90%
	9.66134	11.2853	13.547	17.6214	22.7222

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

**Tabla 48: Velocidad promedio y percentiles Zona Centro-Poniente**

mean:	15.309				
std. dev:	6.81063				
percentiles:	10%	25%	50%	75%	90%
	9.08137	10.7851	13.2029	18.0176	24.559

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

**Tabla 49: Velocidad promedio y percentiles Zona Oriente**

mean:	18.7877				
std. dev:	5.92854				
percentiles:	10%	25%	50%	75%	90%
	11.4817	14.4812	18.5201	22.5101	26.5375

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

**Tabla 50: Velocidad promedio y percentiles Zona Poniente**

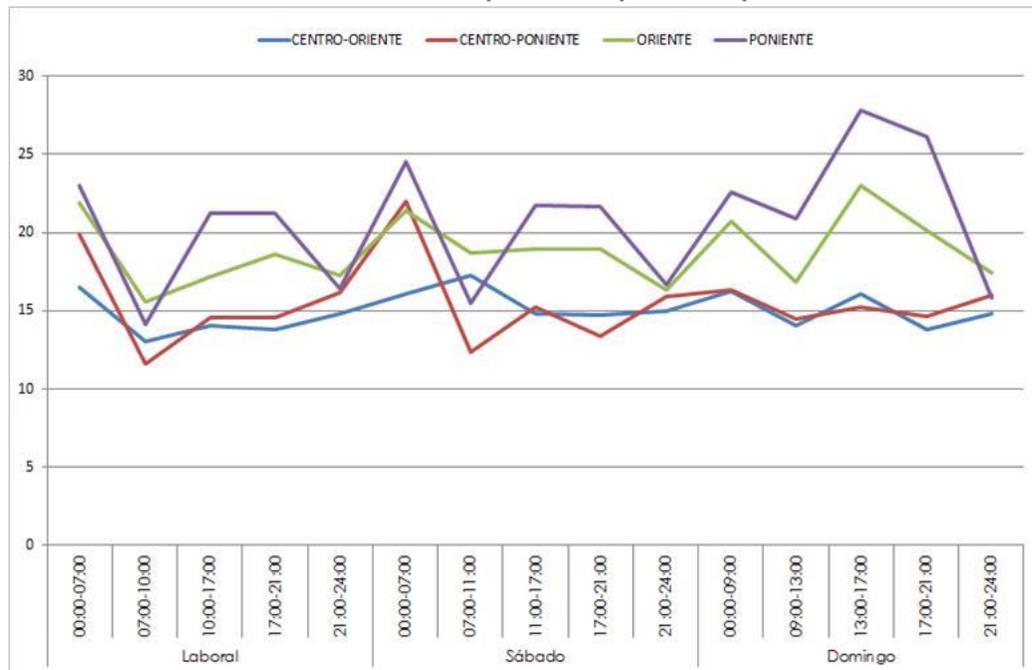
mean:	20.6531				
std. dev:	10.6462				
percentiles:	10%	25%	50%	75%	90%
	9.77298	12.5048	17.2233	27.0475	37.3586

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

Tal como en el caso general, también en las velocidades por zona-periodo la media es mayor a la mediana, lo que implica que los datos tienen una cola más pronunciada en las velocidades más altas.

Al observar los diferentes percentiles se puede notar que el 80% de los datos se encuentran entre 10 km/hr y 27 km/hr. En las siguientes Figura y Tabla se presentan de manera consolidada los promedios de velocidad por zona y periodo.

Gráfico 26: Velocidad promedio por Zona y Periodo



Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

Tabla 51: Velocidad promedio por Zona y Periodo

TIPO DÍA	Periodo	CENTRO-ORIENTE	CENTRO-PONIENTE	ORIENTE	PONIENTE	TOTAL
Laboral	1	16,51	19,84	21,92	23,03	20,32
	2	13,05	11,55	15,59	14,15	13,58
	3	14,08	14,53	17,16	21,24	16,75
	4	13,83	14,51	18,57	21,20	17,02
	5	14,81	16,15	17,24	16,43	16,16
Sábado	6	16,04	22,03	21,42	24,56	21,01
	7	17,25	12,33	18,67	15,45	15,93
	8	14,79	15,24	18,91	21,76	17,67
	9	14,74	13,34	18,99	21,61	17,17
	10	14,99	15,90	16,35	16,66	15,97
Domingo	11	16,27	16,28	20,70	22,60	18,96
	12	14,02	14,45	16,79	20,86	16,53
	13	16,10	15,26	23,02	27,85	20,56
	14	13,78	14,67	20,10	26,13	18,67
	15	14,83	15,98	17,46	15,84	16,03
<b>Total</b>		15,01	15,47	18,86	20,62	17,49

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

Fueron estas últimas velocidades por periodo y zona, las que transformadas en tiempos de viaje, se cargaron tanto en la red vial como en grafo. En efecto, los tiempos de circulación estimados fueron asignados a cada uno de los arcos, de acuerdo a la zona a la que pertenece. En el caso

de los arcos de las redes internas y externas complementarias, se asignó la velocidad máxima de las zonas, para cada tramo horario, tipo día.

Finalmente, se analizaron los arcos con algún tipo de restricción de circulación identificadas en la red vial, lo que en el grafo fue caracterizado con un tiempo de viaje 99.999 segundos, esto es, en los arcos que presentaran vías reversibles y exclusivas, en los periodos de días laborales normales correspondientes. El caso del eje San Diego-Bandera entre Tarpacá-Moneda y Compañía-Santo Domingo, se asignó un tiempo de viaje de 99.999 segundos, debido a los trabajos que se están realizando actualmente y cuya duración es aún considerable.

Como parte de la discusión metodológica con la Contraparte, se planteó corregir los tiempos de viaje a propósito de que las velocidades en rigor están subestimadas debido a que no consideran la distancia real sobre la red sino la distancia cartesiana entre los pulsos de GPS. Posteriormente el Consultor descartó ajustar al alza dichas velocidades, porque precisamente la intención de la Contraparte ha sido desde el inicio de la asesoría, que los tiempos de viaje fueran mayores al promedio, con el objeto de aumentar la probabilidad de cumplir los itinerarios.

Algunos indicadores de distribución de los datos por zona se muestran a continuación:

**Tabla 52: Velocidades Zona Centro-Oriente**

TIPO_DIA	Periodo	Velocidad Promedio	pct10	pct25	pct50	pct75	pct90	desv
DLN	1	16,51	10,44	12,08	15,10	19,57	24,39	6,16
DLN	2	13,05	9,05	10,04	11,64	14,13	19,02	5,06
DLN	3	14,08	9,58	10,89	12,41	15,26	20,83	5,57
DLN	4	13,83	9,30	10,93	12,56	15,14	19,22	5,21
DLN	5	14,81	9,34	11,22	13,72	17,06	21,20	5,36
SAB	6	16,04	10,31	11,80	14,49	19,09	24,77	6,08
SAB	7	17,25	11,41	12,87	16,19	19,50	23,02	6,33
SAB	8	14,79	8,85	10,65	12,44	17,94	24,09	6,77
SAB	9	14,74	9,07	11,06	12,87	17,11	22,51	5,80
SAB	10	14,99	9,00	10,94	13,73	17,04	22,19	6,23
DOM	11	16,27	10,26	11,66	14,67	19,36	24,29	6,12
DOM	12	14,02	10,05	11,01	12,67	14,81	18,15	5,81
DOM	13	16,10	10,94	12,37	14,33	18,34	24,51	5,95
DOM	14	13,78	9,21	11,49	12,85	14,81	18,98	4,82
DOM	15	14,83	9,41	10,52	13,08	17,81	22,48	5,57

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

Tabla 53: Velocidades Zona Centro-Poniente

TIPO_DIA	Periodo	Velocidad Promedio	pct10	pct25	pct50	pct75	pct90	desv
DLN	1	19,84	9,26	13,71	19,78	24,93	30,25	7,96
DLN	2	11,55	8,62	9,72	10,88	12,58	14,59	3,29
DLN	3	14,53	9,62	11,54	13,26	15,99	20,17	5,61
DLN	4	14,51	8,76	10,83	12,96	16,32	21,40	6,13
DLN	5	16,15	8,04	10,25	15,03	19,82	25,20	7,52
SAB	6	22,03	11,50	17,03	21,37	27,50	31,39	8,11
SAB	7	12,33	9,33	10,25	11,14	12,97	17,03	4,17
SAB	8	15,24	10,49	12,11	13,51	16,22	22,45	6,16
SAB	9	13,34	8,43	10,83	12,54	15,56	19,55	4,14
SAB	10	15,90	8,40	9,89	13,09	22,03	27,02	7,31
DOM	11	16,28	9,44	10,97	13,78	19,57	26,97	7,51
DOM	12	14,45	9,39	10,60	12,08	15,57	23,26	7,12
DOM	13	15,26	9,79	10,87	13,80	18,05	22,79	6,15
DOM	14	14,67	10,16	11,55	13,25	16,16	21,45	4,74
DOM	15	15,98	8,94	10,49	13,54	19,63	26,91	7,57

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

Tabla 54: Velocidades Zona Oriente

TIPO_DIA	Periodo	Velocidad Promedio	pct10	pct25	pct50	pct75	pct90	desv
DLN	1	21,92	14,94	18,09	21,96	25,80	29,00	5,74
DLN	2	15,59	9,60	11,53	14,06	18,89	24,01	5,68
DLN	3	17,16	11,75	13,94	16,86	20,04	22,78	4,84
DLN	4	18,57	12,92	16,10	18,59	20,89	23,80	4,54
DLN	5	17,24	9,64	12,60	16,51	21,12	25,58	6,27
SAB	6	21,42	13,28	17,30	21,67	25,72	29,04	6,29
SAB	7	18,67	11,62	13,16	17,14	23,98	28,03	6,47
SAB	8	18,91	12,21	14,52	18,61	22,87	26,25	5,73
SAB	9	18,99	11,18	15,76	19,07	22,04	25,87	5,67
SAB	10	16,35	9,34	12,04	15,16	20,45	24,52	5,98
DOM	11	20,70	13,66	16,22	20,54	24,85	28,47	5,93
DOM	12	16,79	11,06	12,38	14,37	20,96	26,45	6,26
DOM	13	23,02	16,76	19,74	23,22	26,36	29,52	5,61
DOM	14	20,10	13,76	17,42	20,10	23,05	25,81	4,97
DOM	15	17,46	9,77	12,19	17,16	21,53	25,54	6,44

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

Tabla 55: Velocidades Zona Poniente

TIPO_DIA	periodo	Velocidad Promedio	pct10	pct25	pct50	pct75	pct90	desv
DLN	1	23,03	11,33	13,44	17,95	31,90	43,55	12,07
DLN	2	14,15	7,56	9,70	12,72	16,88	22,88	6,28
DLN	3	21,24	10,20	13,74	19,15	27,18	35,90	9,99
DLN	4	21,20	10,25	13,15	19,08	27,58	36,63	9,85
DLN	5	16,43	9,41	10,78	13,04	19,54	29,60	8,47
SAB	6	24,56	11,63	13,79	21,19	33,58	44,60	12,38
SAB	7	15,45	8,19	10,19	12,47	19,46	27,58	8,09
SAB	8	21,76	10,35	13,77	19,09	28,17	39,02	10,86
SAB	9	21,61	10,76	15,12	19,70	26,88	38,16	9,98
SAB	10	16,66	8,84	11,15	12,79	17,11	31,61	9,46
DOM	11	22,60	10,19	13,39	18,53	30,99	39,90	11,66
DOM	12	20,86	9,82	12,09	17,92	27,13	40,77	11,31
DOM	13	27,85	15,12	21,12	27,19	34,97	42,85	9,94
DOM	14	26,13	13,53	19,06	25,61	31,82	42,10	10,18
DOM	15	15,84	10,03	11,21	12,27	15,58	29,04	8,63

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

#### 4.4.4.2 Tiempos de Operación

Para la estimación de los tiempos de operación se utilizó la base de datos que contiene los pulsos GPS de los camiones durante el periodo comprendido entre el 01 de enero de 2014 hasta el 14 de mayo de 2014. Como fuera señalado anteriormente, la información consiste básicamente en la posición y hora del camión cada 60 segundos. El total de datos es de 3.919.752 pulsos GPS.

Dado que la información de coordenadas del GPS no son exactos, los pulsos no necesariamente están correctamente ubicados sobre la red vial, por lo cual se debió realizar un procedimiento para asignar los pulsos a los arcos de la red. En efecto, procurando perder la menor cantidad de información posible, se consideraron 2 métodos para asignar los pulsos GPS a la red, los cuales se detallan a continuación:

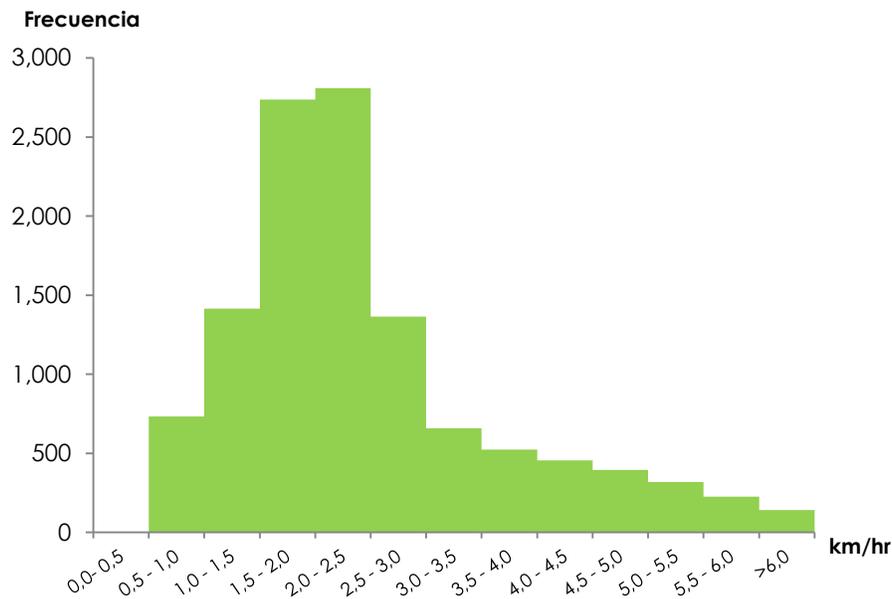
**Método 1:** Consiste en asignar los pulsos GPS mediante una geocerca de radio 20 metros, a todos los arcos que se intersecten con ella. Es claro que esto generaría un incremento en la cantidad de datos, ya que para cada pulso se puede ser asignado a más de un arco. Para limpiar la base se compara la calle a la cual fue asignado cada pulso con la calle que la base de GPS indica para él, dejando sólo aquellos datos que presentan coincidencia.

**Método 2:** Consiste en asignar los pulsos GPS mediante una geocerca de radio 30 metros, al arco más cercano. Luego se compara la calle a la cual fue asignado el pulso con la calle que la base de GPS indica para él, dejando sólo aquellos datos que presentan coincidencia.

A partir de las conclusiones de la aplicación de ambos métodos (ver Anexo 8.3), se decidió no utilizar la información desagregada a nivel de arco. En efecto, para obtener velocidades o tiempos de operación se agruparon los pulsos al interior de las áreas geográficas de los servicios que se prestaban durante el 2013, a objeto de obtener los datos necesarios para calibrar un modelo de tiempos de operación.

Agrupando los datos a nivel de sectores/servicios se tiene el siguiente histograma:

**Gráfico 27: Histograma de velocidades Servicios en operación**



**Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK**

Del gráfico se observa una concentración entorno a los 2,5 km hora. En la siguiente tabla se muestra un breve resumen de algunos indicadores estadísticos:

**Tabla 56: Resumen de Datos de Velocidad**

mean:	2.09628				
std. dev:	1.53564				
percentiles:	10%	25%	50%	75%	90%
	.7	1.2	1.7	2.5	4.2

**Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK**

De la tabla anterior se desprende que el 90% de los datos presentan velocidades inferiores a 4,2 km/hr, lo cual es razonable considerando que se trata de la velocidad que desarrolla en promedio el camión cuando se efectúa el proceso de carga.

Con el fin de no subestimar los tiempos de carga se considera como velocidad de operación a toda velocidad inferior a 2,5 km/h, lo que equivale a omitir el 25% de las velocidades superiores

ya que podrían estar captando desplazamiento, y no operación propiamente tal. Para calibrar el modelo se utiliza el promedio de velocidad por zona-día, el cual se muestra a continuación:

**Tabla 57: Velocidad (km/h) de Operación Promedio por Servicio**

SERVICIO	Velocidad
1	1,66
2	1,50
3	1,34
4	1,17
5	1,56
6	1,67
7	1,64
8	1,58
9	1,08
10	1,45
11	1,33
12	1,67
13	1,94
14	1,68
15	1,42
16	1,71
17	1,44
18	1,78
19	1,49
20	1,42
21	1,41
81	1,49
82	1,29
83	1,12
84	1,11
85	1,32
86	1,72
87	1,43
88	1,17
89	1,36
90	1,38
91	1,70
92	1,71
93	1,16
94	1,18

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

Considerando esta velocidad se puede obtener un tiempo total en cada zona utilizando la cantidad de kilómetros totales por zona, teniendo la precaución de omitir los arcos en los cuales

el camión no puede circular. La siguiente tabla muestra los tiempos totales por zona y la distancia:

**Tabla 58: Velocidad y Tiempos de Operación por Zona**

Servicio	Distancia (km)	Velocidad (km/hr)	Tiempo total operación (minutos)
1	11,72	1,66	424
2	8,98	1,5	359
3	10,17	1,34	455
4	9,07	1,17	465
5	11,7	1,56	450
6	14,91	1,67	536
7	11,8	1,64	432
8	12,27	1,58	466
9	14,68	1,08	816
10	12,71	1,45	526
11	14,51	1,33	655
12	18,77	1,67	674
13	13,18	1,94	408
14	8,05	1,68	288
15	11,7	1,42	494
16	9,74	1,71	342
17	8,66	1,44	361
18	9,34	1,78	315
19	9,52	1,49	383
20	11,63	1,42	491
21	11,87	1,41	505
81	8,82	1,49	355
82	6,72	1,29	313
83	4,64	1,12	249
84	3,62	1,11	196
85	4,26	1,32	194
86	6,58	1,72	230
87	4,83	1,43	203
88	6,62	1,17	339
89	7,5	1,36	331
90	7,97	1,38	347
91	5,85	1,7	206
92	6,87	1,71	241
93	8,27	1,16	428
94	11,66	1,18	593

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

Este tiempo considera el desplazamiento, la operación y la caminata en los arcos atendidos por alcance, luego, para descontar esos tiempos se utiliza la velocidad de desplazamiento de los camiones y la velocidad de caminata especificada en el acápite correspondiente.

El modelo de tiempos en operación debe recoger el efecto de la manera en que está dispuesta la basura en la calle, en efecto, en este caso no interesa qué tipo de generador que produjo la basura sino el estado en el cual se encuentra en la calle, por lo que se distinguen 2 casos:

- Basura a granel
- Basura en contenedores

En el caso de los contenedores, resulta lógico asumir que el tiempo que se demora el proceso de carga es independiente de la cantidad de basura que tiene el contenedor, por lo tanto, el tiempo total dependerá del número de contenedores. Considerando lo anterior la ecuación que describe los tiempos de carga es la siguiente:

$$t_c = \alpha \cdot B_g + \beta \cdot N_c$$

En donde:

$t_c$  es el tiempo de carga

$B_g$  es la basura a granel

$N_c$  es el número de contenedores por descargar

$\alpha$  es la tasa de tiempo por kilogramo de basura a granel y  $\beta$  es la tasa de tiempo por contenedor.

Considerando lo anterior es relevante obtener la cantidad de basura a granel y la cantidad de contenedores en las zonas, para lo cual se siguen los siguientes supuestos:

- Se asume que la capacidad de los contenedores es de 770 litros
- Los generadores complejos sacan la basura en contenedores
- Los colegios e industrias sacan la basura en contenedor
- Los generadores puntuales sacan la basura en contenedor
- Los arcos que no se atienden por alcance sacan basura en contenedor
- El número de contenedores en los sectores/servicios con Plan Piloto de contenedores es el informado por la prensa, más los contenedores asociados a los generadores mencionados

Siguiendo estos supuestos, se determinó el número de contenedores en cada zona, así como la cantidad de basura a granel y contenerizada por sector/servicio, la cual se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 59: Basura a granel y contenerizada en cada sector/servicio**

<b>Zona</b>	<b>Cantidad de contenedores</b>	<b>Basura Granel [kg]</b>	<b>Basura Contenedor [kg]</b>
1	158	5.554	6.727
2	205	4.242	7.642
3	212	4.224	7.855
4	162	4.902	6.052
5	213	4.377	5.949
6	367	2.008	10.851
7	240	5.782	8.605
8	304	3.828	8.172
9	391	575	11.252
10	195	5.125	5.881
11	162	10.513	5.492
12	101	6.801	1.832
13	66	5.299	1.658
14	73	5.234	3.509
15	116	5.360	5.379
16	169	3.689	6.980
17	183	4.115	8.568
18	142	4.141	5.890
19	350	0	8.759
20	186	4.692	6.146
21	109	6.851	2.505
81	226	4.477	9.921
82	111	9.839	4.035
83	78	13.830	2.557
84	40	11.559	1.808
85	110	10.342	4.585
86	185	7.219	7.175
87	106	4.959	6.980
88	158	5.192	7.795
89	188	4.340	8.711
90	200	4.908	9.554
91	161	4.444	16.470
92	188	3.084	9.789
93	75	8.449	2.740
94	193	4.534	6.603

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

Para estimar el modelo de tiempos de operación se usa el número de contenedores y la cantidad de basura a granel. El modelo estimado es el siguiente:

Tabla 60: Modelo de Tiempos de Operación

Source	SS	df	MS			
Model	4264950.14	2	2132475.07	Number of obs =	35	
Residual	556413.697	33	16861.0211	F( 2, 33) =	126.47	
Total	4821363.84	35	137753.253	Prob > F	= 0.0000	
				R-squared	= 0.8846	
				Adj R-squared	= 0.8776	
				Root MSE	= 129.85	

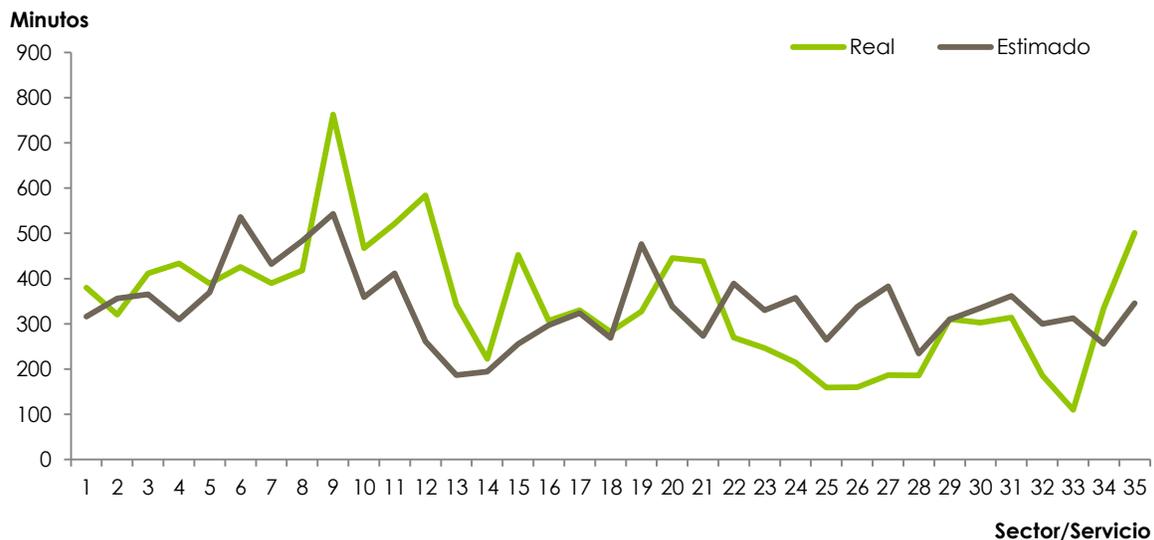
  

Tiempo_Trabajo_3	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
contenedores_totales	1.362001	.1534205	8.88	0.000	1.049865	1.674137
Basura_Granel	.0181576	.0047442	3.83	0.001	.0085055	.0278097

Fuente: Elaboración propia

Se estimó un modelo sin constante debido a que el tiempo de operación debe ser cero en caso de no existir basura. Si se analiza el modelo completo, cuando no hay basura se tiene sólo el tiempo de desplazamiento. En la siguiente figura se muestra el ajuste del modelo respecto a los datos reales:

Gráfico 28: Ajuste modelo de tiempos en operación



Fuente: Elaboración propia

Al observar el modelo de tiempos en operación se tiene que por cada kilogramo de basura a granel se agrega 0,181576 minutos, lo que equivale a 1,09 segundos. En el caso del contenedor, por cada contenedor se agregan 1,36 minutos, lo que equivale a 81,72 segundos por contenedor. Bajo los supuestos sobre el tamaño de los contenedores y una densidad de la basura igual a 150kg/m<sup>3</sup> se tiene que para un contenedor lleno, la tasa de carga es de 0,71 segundos/kg, la cual es un 35% menor que la tasa de la basura a granel. Considerando lo anterior, para un contenedor existe un nivel de ocupación en el cual es menos eficiente realizar la recolección de esa forma que a granel. En el caso de un contenedor de 770 litros, es más eficiente recolectar a partir de una ocupación del 77%.

Para que el modelo se ajuste a la realidad, se consideró el nivel de ocupación de los contenedores usando el número de contenedores y la cantidad de basura en contenedor del sector o servicio. Con estos datos se tiene la siguiente tasa de demora de recolección para la basura contenerizada por zona:

**Tabla 61: Tasas de Tiempo de carga por kilogramo de basura contenerizada**

<b>Sector/Servicio</b>	<b>Tasa [seg/kg]</b>	<b>Tasa Ajustada [seg/kg]</b>
1	1,71	2,219
2	2,14	1,867
3	2,14	2,486
4	2,16	3,362
5	2,88	3,077
6	2,70	2,103
7	2,24	1,951
8	2,95	2,479
9	2,66	3,750
10	2,66	3,745
11	2,07	3,106
12	1,96	6,579
13	2,93	7,994
14	1,61	2,058
15	1,65	3,707
16	1,80	1,875
17	1,45	1,480
18	1,89	2,022
19	3,22	2,211
20	2,41	3,425
21	3,42	7,221
81	1,56	0,952
82	1,13	0,509
83	1,31	1,312
84	0,83	0,832
85	1,74	1,743
86	2,02	0,444
87	1,24	0,822
88	1,45	1,452
89	1,70	1,488
90	1,57	1,297
91	0,73	0,350
92	1,32	0,279
93	1,92	3,417
94	2,28	3,626

**Fuente: Elaboración propia**

Finalmente, una vez estimadas las tasas de tiempo de carga de basura a granel y contenerizada, se calculó para cada arco el tiempo de operación.

#### 4.4.4.3 *Tiempos de viaje KDM*

La Estación de Tránsito KDM se ubica en la comuna de Quilicura y recibe los desechos de 24 comunas del gran Santiago durante las 24 horas del día. Según su página web ([www.kdm.cl](http://www.kdm.cl)), acoge cerca de 850 camiones recolectores diarios, los cuales descargan alrededor de 5.500 toneladas de residuos en la estación. Estos camiones son pesados en su ingreso para tener un control exacto de la basura procesada de cada municipio.

Toda la basura recibida pasa a un proceso de compactación para reducir el volumen de los desechos y así lograr un transporte y disposición final más eficiente. Esta compactación permite reducir el tamaño de cada carga en 2,5 veces. Los residuos ya compactados son transportados al relleno sanitario de KDM, el cual está ubicado en las cercanías de Til Til mediante un sistema de transporte ferroviario. Este sistema implementado el año 2003 permite un traslado que no solo incrementa la eficiencia del transporte, sino que contribuye además, a la descontaminación de la Región Metropolitana, al reemplazar los más de 400 viajes de camiones, desde y hacia Quilicura, que serían necesarios para mover los residuos a su lugar de disposición final, en el relleno sanitario Lomas Los Colorados de Til Til. El traslado ferroviario se realiza entre 8 a 10 veces diarios mediante un tren con aproximadamente 25 vagones, cada cual lleva una carga compactada que representa alrededor de 28 toneladas.

Consultados sobre el horario de atención para municipios, desde la Estación de Tránsito KDM señalaron que es de lunes a sábado de manera continua hasta las 07:00 am del día domingo, luego está abierto de 11:00 a 15:00 hrs. y de 19:00 a 23:00 hrs.

Para estimar los tiempos de viaje de ida + regreso a la estación de tránsito KDM (**incluyendo la descarga**), se identificó un área geográfica en la cual prácticamente todas las rutas convergen hacia dicha estación.

El área identificada corresponde principalmente al entorno de la autopista norte sur, entre General Bulnes y el enlace con la Autopista Costanera Norte. La geocerca tiene forma rectangular con lados de 1,5 km y 0,4 km. En la figura se puede apreciar que en este sector las rutas convergen a una misma ruta común.

Para obtener el tiempo de ida + regreso se escoge un registro GPS al interior de la geocerca asociado a una patente en sentido ida, entendiendo como ida hacia la estación KDM, y luego se escoge el registro GPS más cercano asociado a la misma patente pero en la dirección contraria. Dado que los pulsos GPS contienen la hora se puede conocer el tiempo que les tomó a los camiones en ir y regresar a la Estación.

Figura 49, Área de Acceso Norte a la Comuna



Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

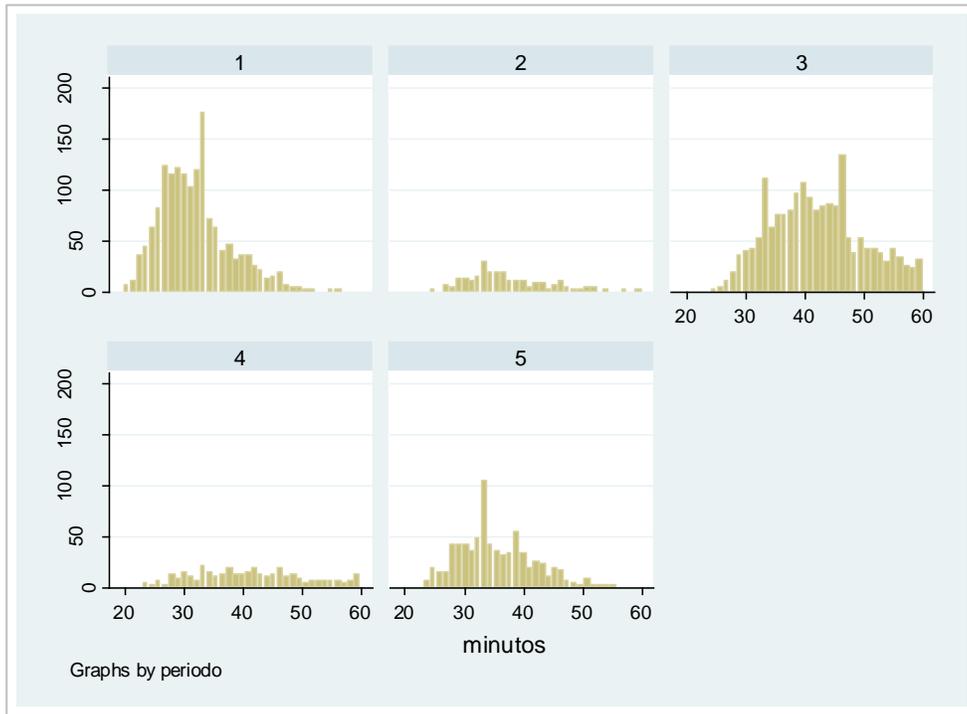
La cantidad de datos obtenidos por este método, según la periodización de esta consultoría, se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 62: Cantidad de datos para estimar los tiempos de viajes (ida+regreso) a KDM

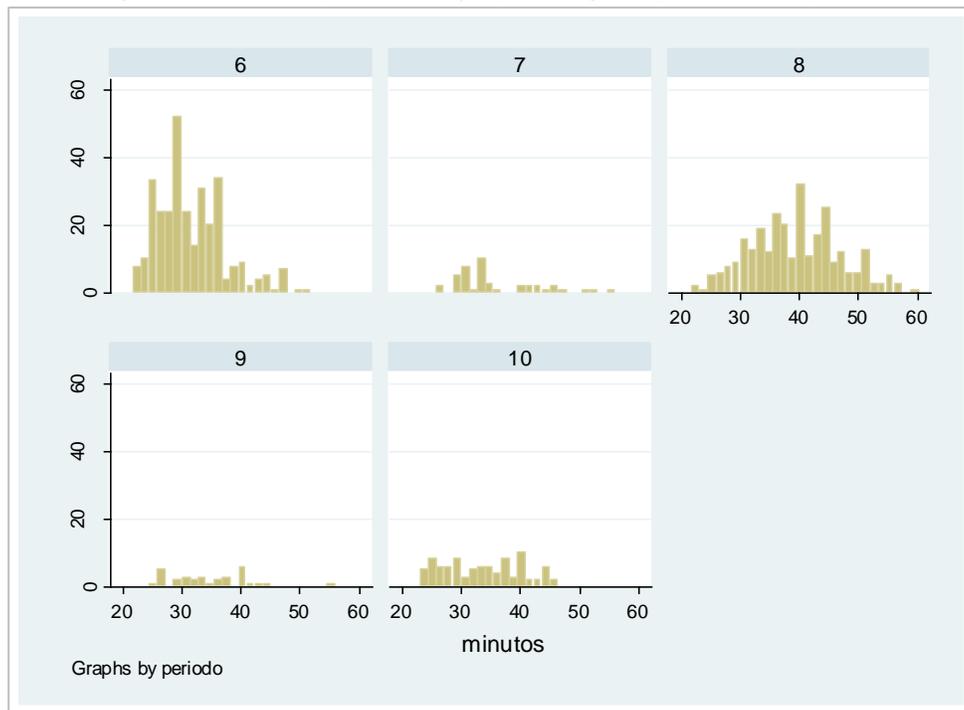
Día	Periodo	Número de observaciones
Laboral	1	1562
	2	262
	3	1840
	4	363
	5	753
	6	316
Sábado	7	43
	8	290
	9	32
	10	90
Domingo	11	218
	12	202
	13	69
	14	21
	15	112

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

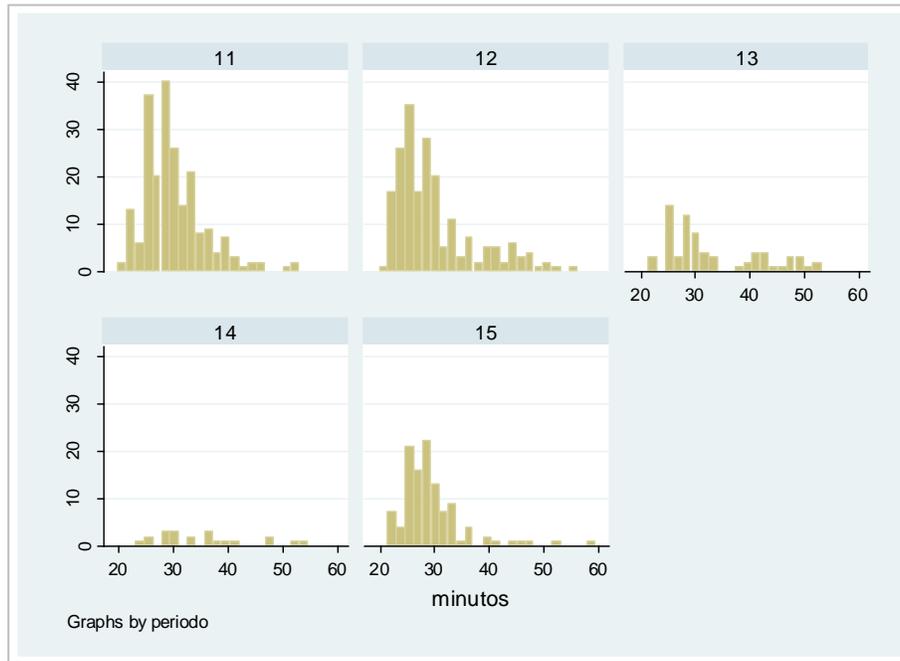
Los histogramas de tiempo de viaje ida + regreso (en minutos) en cada periodo, se muestra a continuación:

**Gráfico 29: Histogramas de Tiempos de Viaje (ida+regreso), Periodos tipo día Laboral (min)**

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

**Gráfico 30: Histogramas de Tiempos de Viaje (ida+regreso), Periodos tipo día Sabado (min)**

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

**Gráfico 31: Histogramas de Tiempos de Viaje (ida+regreso), Periodos tipo día Laboral (min)**

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

En la siguiente tabla se muestra el promedio, la desviación estándar, el número de datos y un tiempo total que suma la media y la desviación estándar:

**Tabla 63: Tiempos de Viaje Ida + Regreso a KDM**

Día	Periodo	Tiempo promedio (minutos)	Desviación estándar (minutos)	Número de datos	tiempo Total (media + desviación)
DLN	1	32,01	5,93	1562	37,95
DLN	2	37,19	6,98	262	44,17
DLN	3	42,17	7,81	1840	49,98
DLN	4	41,09	9,01	363	50,10
DLN	5	35,35	6,27	753	41,62
SAB	6	31,85	5,70	316	37,55
SAB	7	36,05	7,16	43	43,21
SAB	8	39,57	7,52	290	47,09
SAB	9	35,19	6,74	32	41,93
SAB	10	33,94	6,40	90	40,34
DOM	11	30,20	5,63	218	35,83
DOM	12	30,17	7,27	202	37,44
DOM	13	33,53	8,71	69	42,23
DOM	14	35,61	8,80	21	44,42
DOM	15	29,63	5,84	112	35,47

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

La construcción del tiempo de viaje a KDM estructurado por la media más la desviación estándar corresponde al criterio adoptado por la contraparte técnica para entregar una holgura en la realización del viaje, incrementando con ello la probabilidad de cumplir el itinerario.

Dado que el área cubierta por la geocerca es extensa, el par de puntos que define un viaje de ida y vuelta puede quedar ubicado en diversos lugares al interior de ella. Para evitar subestimar el tiempo que los camiones circulan al interior de la geocerca, al tiempo calculado se le añadió el tiempo que se demoraría un camión en recorrer la mitad de la extensión de la geocerca, tanto de ida como de regreso, considerando la velocidad media del resto del trayecto (9,5 km de ida + 8,5 km de regreso).

**Tabla 64: Tiempos de Viaje Adicional Geocerca a KDM**

Día	Periodo	Distancia ida/vuelta a KDM	Velocidad media (km/h)	Dist. Adicional Geocerca	Tiempo Adicional Geocerca(min)
<b>DLN</b>	1	18	28,5	0,75	1,58
<b>DLN</b>	2	18	24,5	0,75	1,84
<b>DLN</b>	3	18	21,6	0,75	2,08
<b>DLN</b>	4	18	21,6	0,75	2,09
<b>DLN</b>	5	18	26,0	0,75	1,73
<b>SAB</b>	6	18	28,8	0,75	1,56
<b>SAB</b>	7	18	25,0	0,75	1,80
<b>SAB</b>	8	18	22,9	0,75	1,96
<b>SAB</b>	9	18	25,8	0,75	1,75
<b>SAB</b>	10	18	26,8	0,75	1,68
<b>DOM</b>	11	18	30,1	0,75	1,49
<b>DOM</b>	12	18	28,8	0,75	1,56
<b>DOM</b>	13	18	25,6	0,75	1,76
<b>DOM</b>	14	18	24,3	0,75	1,85
<b>DOM</b>	15	18	30,5	0,75	1,48

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

Si se le agrega el doble de tiempo medio en la geocerca al tiempo total, se obtiene:

Tabla 65: Tiempo de Viaje Ida + Regreso a KDM desde Geocerca

Día	Periodo	Tiempo total, media + desviación (minutos)	Tiempo adicional geocerca (min)	Tiempo Total (min)
DLN	1	37,95	3,16	41,11
DLN	2	44,17	3,68	47,85
DLN	3	49,98	4,16	54,14
DLN	4	50,10	4,18	54,28
DLN	5	41,62	3,46	45,08
SAB	6	37,55	3,12	40,67
SAB	7	43,21	3,6	46,81
SAB	8	47,09	3,92	51,01
SAB	9	41,93	3,5	45,43
SAB	10	40,34	3,36	43,7
DOM	11	35,83	2,98	38,81
DOM	12	37,44	3,12	40,56
DOM	13	42,23	3,52	45,75
DOM	14	44,42	3,7	48,12
DOM	15	35,47	2,96	38,43

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

Estos tiempos serán incorporados en la modelación y formarán parte del tiempo total de la ruta a KDM, a los cuales obviamente se le agregarán los tiempos (posicionamiento) hasta la geocerca desde donde se encuentre el camión, y desde la geocerca al destino siguiente.

De los tiempos expuestos en la Tabla queda en evidencia la diferencia de tiempos entre periodos de punta del vaciado de camiones y periodos valle, llegando a incrementarse hasta un 32% promedio.

#### 4.4.5 Restricciones de Viraje

Las restricciones de viraje (o movimientos prohibidos) en la Comuna de Santiago serán consideradas como información complementaria al grafo de modelación. Estas restricciones serán registradas como la prohibición de recorrer de manera directa 2 arcos consecutivos. Es decir, sin utilizar otros arcos de la red.

La información analizada para este fin correspondió a 3 archivos dispuestos por el Municipio, a saber:

- **Nombre señales:** Contiene la información de 12.364 señales identificando la Zona, Cuadra, Número de Señal, Código Señal, Leyenda y Observación. Solamente un 33,5% de los datos contiene información completa. No se utilizaron estos datos porque no contenían referencia a su posición geográfica.
- **Señales:** Información de 57 señales, indicando su código y leyenda. Al igual que en el caso anterior, no se utilizó esta información debido a que tampoco contenían referencia a su posición geográfica.

- **Señales No Virar:** Fuente de datos con 1.542 registros de virajes prohibidos identificando Sector, Fecha, código, calle inicio, calle fin, orientación. Se utilizaron estos datos para identificar los virajes prohibidos en la red de modelación.

Para identificar los virajes prohibidos que son efectivamente útiles en la modelación, se siguió el siguiente procedimiento:

- Se eliminaron 928 registros duplicados.
- Se buscó cada intersección en Google Map Street View para corroborar la existencia de la señal mencionada y el sentido de ésta.
- De lo revisado en cada intersección, se detectaron 134 casos (22%) donde no existe la señalética informada, un 15% corresponde a virajes que por la dirección del tránsito no se pueden ejecutar (ya están considerados en el grafo), un 17% corresponde a virajes por reversibilidad (ya están considerados en el grafo), entre otros casos, como error en la dirección y virajes repetidos (más de una señalética en el sector)

Finalmente, de los 614 señaléticas no duplicadas de prohibido virar, se seleccionaron 41 par de arcos donde no se puede realizar el viraje, y se identificaron para ingresarlos a las restricciones de circulación.

**Tabla 66: Prohibiciones de Viraje no relacionadas con Sentidos de Circulación**

SEÑAL	CALLE ORIGEN	CALLE DESTINO	ORIENTACION	D/I
RPO-2a	9 DE JULIO	AV. PORTUGAL	SO	IZQUIERDA
RPO-2a	9 DE JULIO	SAN IGNACIO DE LOYOLA	L.NP	IZQUIERDA
RPO-2b	AGUSTINAS	ESTADO	SOP	DERECHA
RPO-2b	ALAMEDA	AMUNATEGUI	P.N	DERECHA
RPO-2a	ALAMEDA	BRASIL	BCS	IZQUIERDA
RPO-2b	ALAMEDA	ENRIQUE MAC IVEN	O.N	DERECHA
RPO-2b	ALAMEDA	ESTADO	S.N	DERECHA
RPO-2a	ALAMEDA	MAC IVEN	SO	IZQUIERDA
RPO-2a	ALAMEDA	MANUEL RODRIGUEZ	SPP	IZQUIERDA
RPO-2b	ALAMEDA	MORANDE	S.O	DERECHA
RPO-2a	ALAMEDA	MORANDE	P.S	IZQUIERDA
RPO-2b	ALAMEDA	NATANIEL COX	SOP	DERECHA
RPO-2a	ALAMEDA	RAMON C. MELGAREJO	BCP	IZQUIERDA
RPO-2a	ALAMEDA	SAN ANTONIO	BCO	IZQUIERDA
RPO-2b	ALAMEDA	SAN IGNACIO	SOP	DERECHA
RPO-2a	AV. MIRADOR	AV. PEDRO MONTT	P.O	IZQUIERDA
RPO-2a	AV. MIRADOR	AV. PEDRO MONTT	L.BC	IZQUIERDA
RPO-2a	AV. MIRADOR	AV. PEDRO MONTT	N.P	IZQUIERDA
RPO-2a	AV. MIRADOR	AV.GRAL RONDIZZONI	SN	IZQUIERDA
RPO-2a	AV. VICUÑA MACKENNA	AV. MATTA	L.BC	IZQUIERDA
RPO-2a	AV. VICUÑA MACKENNA	MANUEL ANTONIO MATTA	BC	IZQUIERDA
RPO-2a	AV. VIEL	RONDIZZONI	P.O	IZQUIERDA
RPO-2a	BRASIL	AGUSTINAS	BCN	IZQUIERDA
RPO-2a	CARDENAL JOSE MARIA CARO	PUENTE LORETO	SPS	IZQUIERDA
RPO-2b	DIAGONAL PARAGUAY	PORTUGAL	SON	DERECHA
RPO-2a	ENRIQUE MACK-IVER	SANTO DOMINGO	SPS	IZQUIERDA
RPO-2b	EXPOSICIÓN	SEPULVEDA LEO LEYTON	LS.MN	DERECHA
RPO-2b	ISMAEL VALDES VERGARA	MIRAFLORES	BCP	DERECHA

SEÑAL	CALLE ORIGEN	CALLE DESTINO	ORIENTACION	D/I
RPO-2a	JOSE MIGUEL DE LA BARRA	CARDENAL JOSE MARIA CARO	BOS	IZQUIERDA
RPO-2a	JOSE MIGUEL DE LA BARRA	MERCED	BCN	IZQUIERDA
RPO-2b	JOSE MIGUEL DE LA BARRA	MONJITAS	SPN	DERECHA
RPO-2a	MANUEL RODRIGUEZ	CATEDRAL	SPS	IZQUIERDA
RPO-2b	MANUEL RODRIGUEZ	TOESCA	BC	DERECHA
RPO-2a	MATUCANA	PORTALES	BCS	IZQUIERDA
RPO-2a	MATUCANA	PORTALES	BCN	IZQUIERDA
RPO-2a	MOSQUETO	MONJITAS	SPO	IZQUIERDA
RPO-2a	PADRE MIGUEL DE OLIVARES	M. RODRIGUEZ	BCP	IZQUIERDA
RPO-2b	SAN ANTONIO DE PADUA	ALAMEDA	O.P	DERECHA
RPO-2b	STA. ROSA	A. DE OVALLE	BCS	DERECHA
RPO-2b	TEATINOS	ALAMEDA	P.S	DERECHA
RPO-2a	VICUÑA MACKENNA	ALAMEDA	NOO	IZQUIERDA

Fuente: Elaboración propia a partir de Base Señales No Virar

El modelo matemática utiliza como parte del proceso de optimización una matriz de adyacencia para determinar los arcos a los que se puede acceder de manera directa estando en un arco determinado (valor 1 cuando es posible; valor 0 cuando no es posible). En consecuencia, para los 41 casos identificados (celdas de la matriz), se debe sustituir un 1 por un 0 en la matriz.

## 5 CORRIDAS DEL MODELO Y OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA

### 5.1 CORRIDAS INICIALES

#### 5.1.1 Especificación de Parámetros y Penalidades

De acuerdo a las especificaciones del Modelo Matemático detalladas en el acápite 4.2.1, es necesario definir y/o calibrar una serie de parámetros y penalidades:

- Respecto al Tiempo de Exposición de la basura del arco  $a$  para el subtipo de generador  $h$ :

$$Tea_{k,h}(a) = \begin{cases} Si \ hi_k - hg_{1,h}(a) + \sum_{i \in It_k}^{It_k(i)=a} (tv(i) * x_{ik} + ts(i) * y_{ik}) > 0. \ p_1 * \left| hi_k - hg_{1,h}(a) + \sum_{i \in It_k}^{It_k(i)=a} (tv(i) * x_{ik} + ts(i) * y_{ik}) \right| \cdot tg(a) \\ Si \ hi_k - hg_{1,h}(a) + \sum_{i \in It_k}^{It_k(i)=a} (tv(i) * x_{ik} + ts(i) * y_{ik}) \leq 0. \ p_2 * \left| hi_k - hg_{1,h}(a) + \sum_{i \in It_k}^{It_k(i)=a} (tv(i) * x_{ik} + ts(i) * y_{ik}) \right| \cdot tg(a) \end{cases}$$

Los parámetros  $p_1$  y  $p_2$  corresponden a los ponderadores de los tiempos de espera.  $p_1$  si el camión pasa después de que la basura es sacada y  $p_2$  si el camión pasa antes. No obstante, en conjunto con la Contraparte se decidió no tener ponderadores distintos para el paso del camión antes o después de que salga la basura a la calle. En efecto, si el camión pasa antes de que salga la basura, el tiempo debe ser todo el tiempo que transcurra hasta que pasa el siguiente camión (por ejemplo 24 horas, excepto cuando hay un servicio más tarde que pasa por la misma calle), en cuyo caso debe ser la diferencia de tiempo con aquel. En definitiva, se determinó usar  $p_1 = 1$  y 24 horas como constante cuando el camión recorra el arco antes de que la basura es sacada a la calle.

- Respecto al Costo por tiempo de espera del arco  $a$ :

$$cte_k(a) = (cg_{1.1}(a))^{q_c} \cdot (Tea_{k,1}(a))^{q_t} + (cg_{1.2}(a))^{q_c} \cdot (Tea_{k,2}(a))^{q_t}$$

Donde  $q_c$  y  $q_t$  son las potencias de la carga y del tiempo de espera, buscando por ejemplo que no sea lo mismo 10 kg esperando 2 hora, que 2 kg esperando una 10 horas, la contraparte determinó que los valores fuesen  $q_t = 3$  y  $q_c = 1,3$ .

- Respecto al Costo total de ruta una ruta  $k$ :

$$C(k) = \alpha \cdot Cte(k) + \beta \cdot \gamma \cdot Km(k) + Pv(k)$$

El producto  $\beta \cdot \gamma$  representa el costo de operación por kilómetro (combustible + mantenimiento),  $\gamma$  es el costo por kilómetro considerando sólo combustible (\$/km) y  $\beta$  representar la amplificación necesaria para incluir los costos de mantenimiento. Al respecto, la Unidad de Mantenimiento del Municipio informó que rendimiento de los camiones que se están comprando es de 1,7 km/litro, por lo que considerando el precio

del Diesel informado por la ENAP, y asumiendo la relación de costos de mantenimiento y de combustible informada por el INE para empresas de transporte, resulta que  $\gamma = 365$  (\$/km);  $\beta = 1.4$  y  $\beta \cdot \gamma = 515$  (\$/km).

Tabla 67: Precio de Combustibles Semana del 18 al 26 de Septiembre de 2014

Precios al por Mayor con Impuestos, en Región Metropolitana (*)		
Producto	Precio (\$/lt.)	Variación Total (\$/lt.)
Gasolina 93	820,0	- 5,1
Gasolina 97	871,1	+ 14,8
Kerosene	594,7	- 3,6
Diesel	621,1	- 5,1
Precio al por Mayor del GLP con Impuestos, en \$/lt., en Concón (**)		
Gas Licuado de Petróleo	312,1	+ 4,5

(\*) Los precios incluyen tarifa por transporte en oleoducto SONACOL desde Concón a Maipú, de 8,4 \$/lt., la aplicación del FEPP, Impuestos Específicos, MEPCO e IVA.

Fuente: Informe Semanal de Variaciones de Precios de Combustibles. ENAP<sup>8</sup>

Tabla 68: Índice de Costos de Transporte

	Variaciones e incidencias por grupos			
	Base Anual 2013 = 100			
				agosto 2014
	PONDERACIÓN	VARIACIÓN % MENSUAL	VARIACIÓN % ACUMULADA	INCIDENCIA
COMBUSTIBLES	36,85622	0,4	3,5	0,150
RECURSOS HUMANOS	29,79913	2,1	2,0	0,627
OTROS SERVICIOS RELATIVOS AL EQUIPO DE TRANSPORTE	7,65353	0,0	4,9	0,003
SERVICIOS FINANCIEROS	10,59972	-3,1	-1,9	-0,315
REPUESTOS Y ACCESORIOS PARA EL FUNCIONAMIENTO Y MANTENCIÓN DEL VEHÍCULO	15,09140	-0,4	3,1	-0,065

Fuente: Boletín Mensual ICT – Agosto 2014. INE<sup>9</sup>

Por su parte,  $\alpha$  corresponde al costo de que 1 Tonelada de basura espere 1 hora, y su dimensión es de \$/Ton-hr. Para las corridas iniciales, la intención de la contraparte técnica fue que en el valor de la función objetivo, la importancia relativa de los conceptos costo de espera y costo por kilometraje fuese 70 a 30, razón por lo cual definió este parámetro en 78 \$/Ton-hr.

En materia de Tiempos Muertos, y considerando la información provista por la Municipalidad, la contraparte validó que el tiempo muerto a la entrada de los conductores fuese de 30 min (entran a las 6:00), al final del itinerario del camión fuese de 45 min, a la entrada de los

<sup>8</sup> <http://www.enap.cl/pag/53/784/informe-precios>

<sup>9</sup> [http://www.ine.cl/canales/chile\\_estadistico/estadisticas\\_precios/costo\\_transporte/series\\_estadisticas/series\\_estadisticas.php](http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/estadisticas_precios/costo_transporte/series_estadisticas/series_estadisticas.php)

cargadores fuese de 30 min (calcular hora de entrada según llegada del camión a la sede) y al final de la jornada de los cargadores fuese de 30 min.

En materia de penalidades, y reconociendo que la jornada laboral de los conductores es siempre mayor a la de los cargadores, se acordó con la Contraparte controlar solamente la jornada diaria de los cargadores en 8 horas, pues indirectamente se estará también acotando la jornada de los conductores (aunque en un valor mayor).

$$\sum_{a \in J_k} (tv(a) * x_{ak} + ts(a) * y_{ak}) \leq TJ - TC \quad . \forall k \in K$$

Por lo anterior, la jornada de los cargadores fuera de la sede será de 8 horas menos dos tiempos muertos de 0,5 horas, más 0,5 horas de descanso, es decir,  $TJ = 7.5 \text{ horas}$  y  $TC = 0.5 \text{ horas}$ . Luego, en atención a que la penalización por exceso de horas de trabajo debe ser alta, ella se consideró equivalente al costo de una cuadrilla-turno (\$100.000).

Finalmente, considerando que todas las variables de la función objetivo están en unidades de \$, las penalizaciones en ella aplicadas fueron:

$$F. O: \min (p_{CR} \cdot CR + p_{PBC} \cdot PBC + p_{PDJ} \cdot PDJ)$$

Donde  $p_{CR} = 1$ ;  $p_{PBC} = 0$ ;  $p_{PDJ} = 1$  y la penalización por desequilibrio de jornada  $PDJ$  se consideró equivalente al costo de una cuadrilla-hora (\$12.500=\$100.000/8).

$$PDJ = \max_{k \in K} \max_{J_k \in I_k} \left( \sum_{a \in J_k} (tv(a) * x_{ak} + ts(a) * y_{ak}) \right) - \min_{k \in K} \min_{J_k \in I_k} \left( \sum_{a \in J_k} (tv(a) * x_{ak} + ts(a) * y_{ak}) \right)$$

Respecto a las características de los nuevos camiones recolectores, la Unidad de Mantenimiento del Municipio señaló que ellos son de marca Freightliner con tolva McNeilus; capacidad volumétrica de 15 m<sup>3</sup>; capacidad de compactación de 4 a 1; carga máxima de 7.500 Kg; tara de 10.980 Kg y peso bruto de 19.200 kg (estos últimos dos valores entregados de manera aproximada por representantes de KDM). Sin perjuicio de lo anterior, la misma Unidad informó que existen servicios en los que utilizando el mismo tipo de camión, actualmente recogen sobre los 9.500 kg, promediando los 8.300 kg. A pesar de lo anterior, para efectos de la modelación se consideró una holgura del 7%, que reconoce la posibilidad de que determinados servicios recojan basura con diferentes densidades. En atención a lo anterior, los camiones tendrán que viajar a KDM cuando alcancen una carga de 6.975 kg.

Tabla 69: Resumen de Parámetros y Ponderadores Modelaciones Iniciales

	Valor
<b>Capacidad de Camiones:</b>	
Teórica:	7.500 kg
Holgura:	7%
Modelo:	6.975 kg
<b>Incremento de la Basura diaria (en desviaciones estándar):</b>	1
<b>Costo de Espera (\$/hr-Ton):</b>	78
Potencia de Carga:	1,3
Potencia de Espera:	3
<b>Costo Km (\$/Km):</b>	515
Rendimiento (km/litro):	1,7
Costo Mantenimiento (amplificador)	1,4
<b>Ponderador Km Comercial</b>	1
<b>Ponderador Km No Comercial</b>	1
<b>Ponderador Km (Posicionamientos + KDM)</b>	1
<b>Costo Cuadrilla (\$/día):</b>	100.000
<b>Tiempo muerto inicio Jornada Cargador (hr):</b>	0,5
<b>Tiempo muerto fin Jornada Cargador (hr):</b>	0,5
<b>Descanso luego de 4 hrs. (hr):</b>	0,5
<b>Jornada Cargador fuera de la sede (hr):</b>	7,5
<b>Penalización por sobre jornada (\$):</b>	100.000
<b>Penalización por diferencia de jornada (\$/hr): (pondera la diferencia Jmax-Jmin)</b>	12.500
<b>Penalización por viraje (\$):</b>	100

Fuente: Municipio-Consultor

### 5.1.2 Cantidad de Servicios a Modelar

En principio, el número de clúster o servicios a modelar en cada red (Escenario-Grafo) fue estimado de acuerdo a la cantidad de basura diaria a ser recogida (Tabla 39: Basura por Zona, Tipo Generador y Jornada de Recolección en DLN). De este modo, si los nuevos camiones tienen una capacidad de 7.500 kg, y les asumimos 2 viajes a KDM en el turno, dejándoles un 7% de capacidad disponible (holgura), se obtiene para el Escenario 1 una cantidad de clúster similar a la cantidad de servicios actuales.

Para encontrar la mejor solución en cada Escenario-Grafo, se acordó con la contraparte técnica modelar una serie de cantidades de servicios (o indistintamente clusters), aplicando la siguiente lógica:

- **Escenario 1 (Reruteo):** Se debe partir modelando la mínima cantidad de clúster (n) para recoger la basura con dos viajes a KDM por camión, y comparar el resultado de la Función Objetivo con la que resulte de la modelación de n+1 clústers.
  - si la solución mejora se debe modelar una clusterización de n+2 servicios. y así sucesivamente hasta que deje de mejorar.
  - si la solución empeora se debe modelar una clusterización de n-1. y así sucesivamente hasta que deje de mejorar.
- **Escenario 2 (Frecuencia 48):** Se debe rutear con el número de clúster que defina el Consultor como el mejor escenario, teniendo a la vista las mejores soluciones del Escenario 1.

- **Escenario 3 (Expediciones Especiales):** Cada Escenario-Grafo se debe modelar con 1 clúster menos al que haya resultado como la mejor solución del Escenario 1. en las zonas y horarios donde aplique.
- **Escenario 4 (Sin Zonas):** Se debe partir modelando la mínima cantidad de clúster (n) para recoger la totalidad de basura con dos viajes a KDM por camión, y comparar el resultado de la Función Objetivo con la que resulte de la modelación de n+1 clústers, si la solución mejora se debe modelar una clusterización de n+2 servicios, y así sucesivamente hasta que deje de mejorar.
- **Escenario 5 (Libre):** Corresponden a las mismas corridas del Escenario 4, pues en rigor la única diferencia se encuentra en la aplicación del modelo de asignación de recursos, separando los conductores de los cargadores en las cuadrillas de trabajo.

El siguiente cuadro muestra un resumen de las cantidades de servicios (clústers) modelados como parte de las corridas iniciales:

**Tabla 70: Detalle de la cantidad de clúster por Escenario-Grafo de las Modelaciones Iniciales**

GRAFO	ZONA GEOGRÁFICA	GRAFO DIURNO				GRAFO DIURNO&NOCTURNO				GRAFO NOCTURNO			
		MAÑANA				MAÑANA y NOCHE				NOCHE			
		Actual	Mínimo	Clusterización	Clúster Ruteo	Actual (Tarde)	Mínimo	Clusterización	Clúster Ruteo	Actual	Mínimo	Clusterización	Clúster Ruteo
ESCENARIO 1 (Re-ruteo)	Oriente	10	10	10, 11, 12, 13, 14, 15	10, 11	1	1	1	1	6	6	7, 8, 9	6, 5
	Poniente	3	3	3, 4, 5	3, 4	No existe	No aplica	No aplica	No aplica	4	5	4, 5, 6	5, 6
	Centro Poniente	7	6	6, 7, 8, 9, 10, 11	6, 7	0	1	1	1	No existe	No aplica	No aplica	No aplica
	Centro Oriente	No existe	No aplica	No aplica	No aplica	No existe	No aplica	No aplica	No aplica	6	7	7, 8, 9	7, 8
ESCENARIO 2 (48 horas)	Oriente	10	10	20, 22, 24, 26, 28, 30	20	1	1	2	2	6	6	7, 8, 9	12
	Poniente	3	3	6, 8, 10	6	No existe	No aplica	No aplica	No aplica	4	5	4, 5, 6	10
	Centro Poniente	7	6	14, 15, 16, 18, 20, 22	12	No existe	1	2	2	No existe	No aplica	No aplica	No aplica
	Centro Oriente	No existe	No aplica	No aplica	No aplica	No existe	No aplica	No aplica	No aplica	6	7	7, 8, 9	14
ESCENARIO 3 (Puntuales)	Oriente	No existe	1	1	1	No existe	No aplica	No aplica	No aplica	No existe	1	1	1
	Poniente	No existe	No aplica	No aplica	No aplica	No existe	No aplica	No aplica	No aplica	No existe	No aplica	No aplica	No aplica
	Centro Poniente	No existe	1	1	1	No existe	No aplica	No aplica	No aplica	No existe	No aplica	No aplica	No aplica
	Centro Oriente	No existe	No aplica	No aplica	No aplica	No existe	No aplica	No aplica	No aplica	No existe	1	1	1
ESCENARIO 3 (No Puntuales)	Oriente	No existe	9	9, 10, 11, 12, 13, 14	Depende esc 1	No existe	No aplica	No aplica	No aplica	No existe	No aplica	6, 7, 8	Depende esc 1
	Poniente	No existe	3	3, 4, 5	Igual escenario 1	No existe	No aplica	No aplica	No aplica	No existe	No aplica	4, 5, 6	Igual escenario 1
	Centro Poniente	No existe	5	5, 6, 7, 8, 9, 10	Depende esc 1	No existe	No aplica	No aplica	No aplica	No existe	No aplica	No aplica	No aplica
	Centro Oriente	No existe	No aplica	No aplica	No aplica	No existe	No aplica	No aplica	No aplica	No existe	No aplica	6, 7, 8	Depende esc 1
ESCENARIO 4 (Sin Zona)	Sin Zona	20	20	20 al 31	20, 21	1	2	2, 3, 4	2, 3	17	18	18 al 24	18, 19

Fuente: Elaboración Propia

### 5.1.3 Resultados Modelaciones Iniciales

#### 5.1.3.1 Resultados Generales

Dada la naturaleza del problema presentado, conocido por su complejidad para ser tratado computacionalmente, se debió estudiar las distintas alternativas que permiten abordar este tipo de problemas de forma eficiente y efectiva. Es así como se debió seleccionar minuciosamente las heurísticas que aceleran la búsqueda de una solución aceptable y cercana al óptimo global (modelación matemática), también se debió seleccionar cuidadosamente las mejores estructuras de datos y paradigmas de programación que permitan sacar el mayor provecho de los recursos de hardware disponibles a nivel de infraestructura TI.

En general, el rendimiento de los algoritmos de búsqueda local y en particular el de Simulated Annealing es altamente sensible a la calibración de los parámetros que conforman el algoritmo, los cuales deben ser ajustados de acuerdo al comportamiento de algunas variables en la ejecución del algoritmo. Esto implica la ejecutar varias veces el escenario-grafo con el objetivo de calibrar progresivamente el algoritmo y así acelerar el proceso de convergencia hacia una solución aceptable.

En materia de soluciones, la importancia del tiempo de espera en la función objetivo del modelo matemático se evidenció en que para reducirlo, consistentemente en todas las modelaciones, las soluciones óptimas arrojaban clusterizaciones y ruteos poco eficientes en materia de kilómetros, aunque ello implicase extender el tiempo total trabajado (horas-hombre), y con ello aumentara la cantidad de jornadas por sobre el máximo permitido.

Asimismo, se comprobó que clusterizaciones iniciales (en adelante semillas) menos aleatorias o más homogéneas (en términos de alguna lógica como cantidad de arcos o distancia a un centro de gravedad) generaban finalmente mejores soluciones de la función objetivo.

Por esto último, las mejores soluciones encontradas para la función objetivo partieron siempre de una semilla obtenida de reglas no aleatorias, cuestión que no hizo más que confirmar las recomendaciones identificadas en la literatura, en orden a aplicar el algoritmo de Simulated Annealing a partir de soluciones factibles, entendiendo que soluciones de semillas aleatorias difícilmente son factibles (cumplimiento de restricciones).

### 5.1.3.2 Resultados por Escenario-Zona

#### ESCENARIO 1: ZONA ORIENTE

- En la Recolección Diurna:
  - La proyección de la situación actual es infactible laboralmente, pues en la totalidad de los servicios la jornada de los cargadores (fuera de la sede) supera el máximo posible (7.5 horas), siendo el promedio de ellas de 13.2 horas, muy superior al máximo señalado.
  - El mejor resultado de la función objetivo se obtiene con 18 servicios, aunque el costo estricto de la solución es un 52% superior a la proyección de la situación actual, debido al incremento de los viajes a KDM y a la reducción del tiempo de espera.
  - Al comparar los tiempos de espera promedio de la basura, se aprecia una reducción del 45%.
- En la Recolección Nocturna:
  - La proyección de la situación actual presenta 2 servicios con jornada de los cargadores (fuera de la sede) superando el máximo posible (7.5 horas), siendo el promedio de 7.3 horas.
  - El mejor resultado de la función objetivo se obtiene con 7 servicios, aunque el costo estricto de la solución es un 10% superior a la proyección de la situación actual, debido al incremento de los viajes a KDM y a la reducción del tiempo de espera.
  - Al comparar los tiempos de espera promedio de la basura, se aprecia prácticamente invariante, debido a que la mejor solución no genera horas extras ni penalidades por exceso de jornada.

Tabla 71: Resultados y KPIs Modelaciones Iniciales. Escenario 1 - Zona Oriente

	DIURNO		NOCTURNO	
	Proyección Situación Actual	Mejor Solución	Proyección Situación Actual	Mejor Solución
<b>N° SERVICIOS</b>	10	18	6	7
<b>KM OPERACIONALES</b>	147	147	47	47
<b>KM TOTALES</b>	1.065	1.249	505	593
<b>RESIDUOS (KG)</b>	130.366	130.366	67.390	67.390
<b>VIAJES A KDM</b>	24	28	12	27
<b>TO en KDM (%)</b>	72%	62%	75%	33%
<b>VIRAJES (N°)</b>	1.125	1.221	345	520
<b>HORAS – HOMBRE</b>	132	129	44	46
<b>HHEE (HRS)</b>	13	14	3	-
<b>TIEMPO MEDIO DE ESPERA (HR)</b>	6,6	3,6	5,6	5,7
<b>COSTO (\$/DÍA)</b>	<b>1.754.015</b>	<b>2.658.197</b>	<b>911.668</b>	<b>1.005.159</b>

Fuente: Elaboración Propia a partir de los resultados del Modelo Matemático

**ESCENARIO 1: ZONA PONIENTE**

- En la Recolección Diurna:
  - La proyección de la situación actual es infactible laboralmente. pues en la totalidad de los servicios la jornada de los cargadores (fuera de la sede) supera el máximo posible (7.5 horas). siendo el promedio de ellas de 12.1 horas. muy superior al máximo señalado.
  - El mejor resultado de la función objetivo se obtiene con 5 servicios. aunque el costo estricto de la solución es un 7% superior a la proyección de la situación actual, debido al incremento de los viajes a KDM y a la reducción del tiempo de espera.
  - Al comparar los tiempos de espera promedio de la basura. se aprecia una reducción del 38%.
  
- En la Recolección Nocturna:
  - La proyección de la situación actual presenta 2 servicios con jornada de los cargadores (fuera de la sede) que superan el máximo posible (7.5 horas). siendo el promedio de 8,98 horas.
  - El mejor resultado de la función objetivo obtuvo se con 5 servicios. aunque el costo estricto de la solución es un 12% superior a la proyección de la situación actual. debido al incremento de los viajes a KDM y a la reducción del tiempo de espera.
  - Al comparar los tiempos de espera promedio de la basura. se aprecia una reducción del 20%.

**Tabla 72: Resultados y KPIs Modelaciones Iniciales. Escenario 1 - Zona Poniente**

	DIURNO		NOCTURNO	
	Proyección Situación Actual	Mejor Solución	Proyección Situación Actual	Mejor Solución
<b>N° SERVICIOS</b>	3	5	4	5
<b>KM OPERACIONALES</b>	45	45	35	37
<b>KM TOTALES</b>	309	361	461	510
<b>RESIDUOS (KG)</b>	27.892	27.892	64.870	66.216
<b>VIAJES A KDM</b>	5	7	11	11
<b>TO en KDM (%)</b>	74%	53%	79%	80%
<b>VIRAJES (N°)</b>	416	358	227	254
<b>HORAS – HOMBRE</b>	36	35	36	37
<b>HHEE (HRS)</b>	14	2	6	3
<b>TIEMPO MEDIO DE ESPERA (HR)</b>	5,9	3,7	5	4
<b>COSTO (\$/DÍA)</b>	<b>674.689</b>	<b>720.884</b>	<b>803.911</b>	<b>898.676</b>

Fuente: Elaboración Propia a partir de los resultados del Modelo Matemático

**ESCENARIO 1: ZONA CENTRO ORIENTE**

- En la Recolección Nocturna:
  - La proyección de la situación actual presenta 3 de los 6 servicios con jornada de los cargadores (fuera de la sede) superando el máximo posible (7.5 horas). siendo el promedio de 7,6 horas.
  - El mejor resultado de la función objetivo se obtuvo con 9 servicios, aunque el costo estricto de la solución es un 37% superior a la proyección de la situación actual. debido al incremento de los viajes a KDM y a la reducción del tiempo de espera.
  - Al comparar los tiempos de espera promedio de la basura. se aprecia una reducción del 28%.

**Tabla 73: Resultados y KPIs Modelaciones Iniciales. Escenario 1 – Centro Oriente**

	NOCTURNO	
	Proyección Situación Actual	Mejor Solución
<b>N° SERVICIOS</b>	6	9
<b>KM OPERACIONALES</b>	42	42
<b>KM TOTALES</b>	600	678
<b>RESIDUOS (KG)</b>	97.413	97.413
<b>VIAJES A KDM</b>	16	20
<b>TO en KDM (%)</b>	81%	65%
<b>VIRAJES (N°)</b>	304	505
<b>HORAS – HOMBRE</b>	45	45
<b>HHEE (HRS)</b>	3	-
<b>TIEMPO MEDIO DE ESPERA (HR)</b>	4,0	2,8
<b>COSTO (\$/DÍA)</b>	<b>1.034.050</b>	<b>1.413.331</b>

Fuente: Elaboración Propia a partir de los resultados del Modelo Matemático

**ESCENARIO 1: ZONA CENTRO PONIENTE**

- En la Recolección Diurna:
  - La proyección de la situación actual es infactible laboralmente. pues en la totalidad de los servicios la jornada de los cargadores (fuera de la sede) supera el máximo posible (7.5 horas). siendo el promedio de ellas de 10.3 horas. muy superior al máximo señalado.
  - El mejor resultado de la función objetivo se obtiene con 11 servicios. aunque el costo estricto de la solución es un 18% superior a la proyección de la situación actual, debido al incremento de los viajes a KDM y a la reducción del tiempo de espera.
  - Al comparar los tiempos de espera promedio de la basura. se aprecia una reducción del 31%.

Tabla 74: Resultados y KPIs Modelaciones Iniciales, Escenario 1 – Centro Poniente

	DIURNO	
	Proyección Situación Actual	Mejor Solución
N° SERVICIOS	7	11
KM OPERACIONALES	76	76
KM TOTALES	558	676
RESIDUOS (KG)	78.443	78.443
VIAJES A KDM	15	18
TO en KDM (%)	70%	58%
VIRAJES (N°)	498	684
HORAS – HOMBRE	72	73
HHEE (HRS)	20	5
TIEMPO MEDIO DE ESPERA (HR)	6,3	4,3
<b>COSTO (\$/DÍA)</b>	<b>1.294.115</b>	<b>1.521.700</b>

Fuente: Elaboración Propia a partir de los resultados del Modelo Matemático

### ESCENARIO 1: COMUNA

Una vista general al Escenario 1 respecto a la totalidad de Comuna, es posible hacerla componiendo los resultados de las zonas que la integran, a saber:

Tabla 75: Resultados y KPIs Comunales Modelaciones Iniciales. Escenario 1

	DIURNO		NOCTURNO	
	Proyección Situación Actual	Mejor Solución	Proyección Situación Actual	Mejor Solución
N° SERVICIOS	20	34	16	21
KM OPERACIONALES	268	268	125	126
KM TOTALES	1.932	2.287	1.567	1.781
RESIDUOS (KG)	236701	236701	229673	231020
VIAJES A KDM	44	53	39	58
TO en KDM (%)	72%	60%	79%	53%
VIRAJES (N°)	2.039	2.263	876	1.279
HORAS – HOMBRE	240	237	125	129
HHEE (HRS)	47	21	13	3
TIEMPO MEDIO DE ESPERA (HR)	6,4	3,8	4,8	4,0
<b>COSTO (\$/DÍA)</b>	<b>3.722.819</b>	<b>4.900.781</b>	<b>2.608.776</b>	<b>3.067.510</b>

Fuente: Elaboración Propia a partir de los resultados del Modelo Matemático

En lo que se refiere a la recolección diurna, obviamente la proyección de la situación actual es infactible laboralmente, pues en la totalidad de los servicios la jornada de los cargadores (fuera de la sede) supera el máximo posible (7.5 horas), siendo el promedio de ellas de 12 horas, valor muy superior al máximo señalado. El mejor resultado global de la función objetivo se obtiene con 34 servicios (70% de incremento), **aunque el costo estricto de la solución es un 32% superior** a la proyección de la situación actual, debido principalmente al incremento (20%) de los viajes a KDM y a la reducción del tiempo de espera (40%).

### 5.1.3.3 Conclusiones de las Modelaciones Iniciales

Los resultados tanto globales como a nivel de zonas arrojan como primera gran conclusión la infactibilidad de recoger la totalidad de la basura con la cantidad de servicios actuales, con los nuevos camiones y respetando las jornadas laborales máximas fuera de la sede. En efecto, una serie de cuestiones atentan contra ello:

- La reducción de la capacidad teórica de los camiones (debido a su renovación), y el respeto a ella, implican más viajes a KDM, que redundan en un mayor consumo de horas hombre.
- La formalización de la operación respetando las restricciones de tránsito también consume más tiempo de operación.
- El atender ejes dos veces por jornada, recogiendo la basura de una vereda en cada pasada, consume más tiempo de operación y de circulación,
- La minimización del tiempo de espera de la basura induce soluciones con más kilómetros no operacionales que el mínimo posible, cuestión que también presiona al alza el consumo de horas hombre.
- El imponer factores de seguridad en los tiempos de viaje a KDM, en la basura diaria a ser recogida y en la capacidad de los camiones, a objeto de poder asegurar la factibilidad de los itinerarios, hace que destine más tiempo del estrictamente necesario al servicio de recolección.
- Imperfecciones en la red vial y subestimación de la red complementaria inducen soluciones con más kilómetros operacionales y no operacionales que el mínimo posible, cuestión que afecta doblemente al alza el consumo de horas hombre.

Otra conclusión evidente es que las soluciones óptimas encontradas son efectivamente mejores, bajo el prisma de la función objetivo, que la aplicación de las actuales cantidades de clústers, pero ellas son más caras si se evalúan estrictamente las componentes económicas. En este caso nuevamente son varios los efectos los que contribuyen a ello:

- Prácticamente la totalidad de las cuestiones que presionan al alza las horas hombre, no solo implican un mayor gasto en personal, sino que también un mayor gasto en combustible (incremento de km).
- El solo hecho de incrementar los servicios impone una carga financiera que probablemente no se justifique del todo si se considera que los "kilos cargados por cargador" se reducen en la medida que se incrementan los clúster, sin poder reducir los cargadores por cuadrilla.

Por último, y para abordar sólo las conclusiones importantes, la solución global comunal compuesta de las soluciones óptimas zonales arroja 34 servicios en jornada diurna, cuestión evidentemente indeseada, pues impide disponer de una cantidad adecuada de camiones para mantenimiento preventivo, correctivo e incidencias.

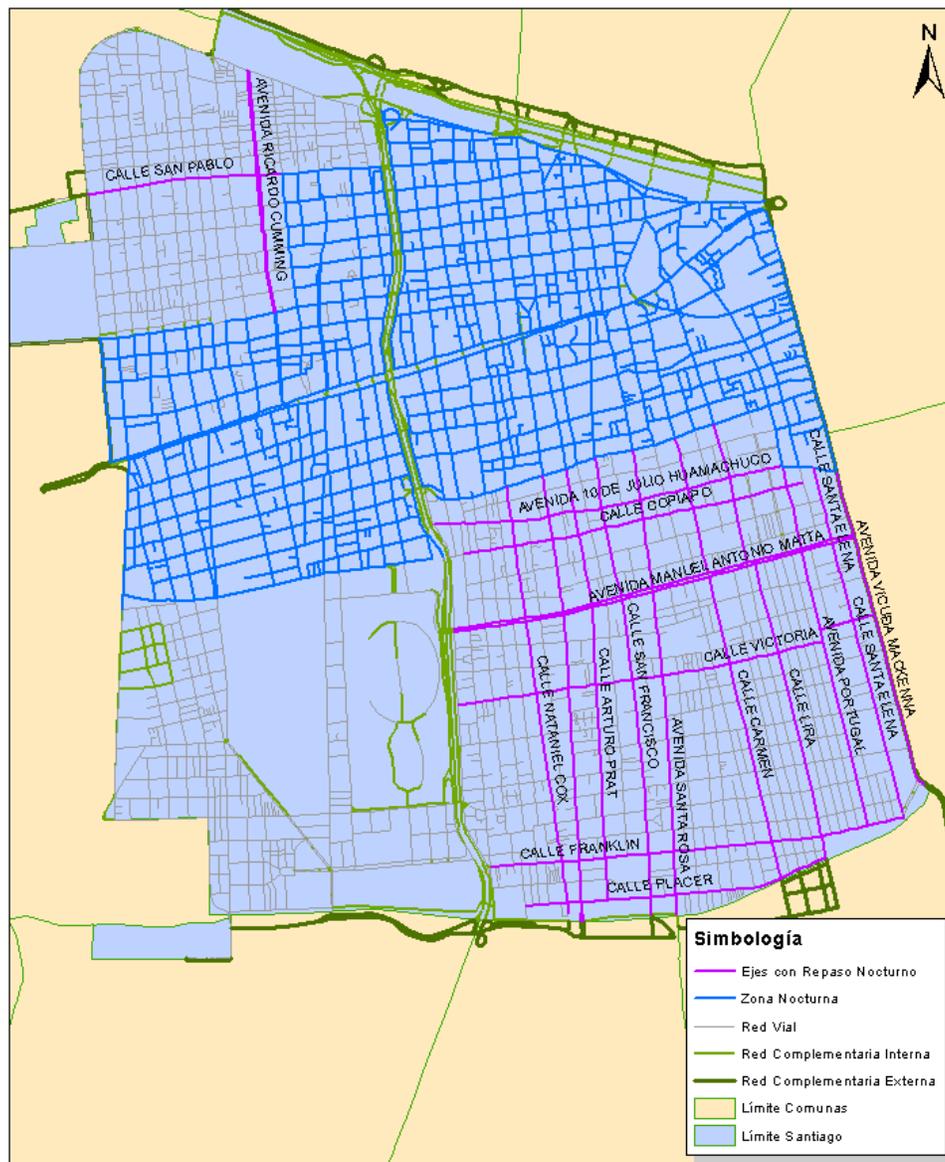
**En consecuencia, para las Modelaciones Finales se realizarán una serie de ajustes o cambios que buscan atenuar los efectos negativos de las soluciones óptimas. Estos ajustes se realizarán en los de ámbitos de i) Extensión territorial de la Zona Nocturna; ii) Parámetros y Ponderadores del Modelo, y iii) Algoritmo de perturbaciones en la búsqueda de mejores clústers.**

## 5.2 CORRIDAS FINALES

### 5.2.1 Ajuste Zona Nocturna

Con el objeto de ajustar a la baja la cantidad de basura de la jornada diurna, para reducir el número de servicios y consecuentemente de camiones operando simultáneamente en dicha jornada, se traspasó de la zona centro poniente a la zona nocturna el cuadrante delimitado por los ejes Alameda – Manuel Rodríguez – San Pablo – Maturana – Agustinas - Matucana (actuales servicios 17, 16 y 15 (sin sector de Quinta Normal)).

Figura 50, Propuesta Final de Ejes de Operación Nocturna y con Repaso Nocturno



Fuente: Elaboración Propia a partir de los resultados de las Corridas Iniciales

Como consecuencia de lo anterior, los ejes Chacabuco y Brasil fueron excluidos del listado de ejes que debían atenderse tanto en jornada diurna como nocturna, para ser atendidos exclusivamente en la jornada nocturna. Por las mismas razones, tanto el Eje San Pablo como el Ricardo Cummings redujeron el tramos a ser atendidos en ambas jornadas.

**Tabla 76: Basura por Zona, Tipo Generador y Jornada en DLN, versión ajustada**

ZONA	TIPO GENERADOR	DIURNO (Kg)	NOCTURNO (Kg)	TOTAL
CENTRO-ORIENTE	Complejo	-	12.111	12.111
	OFI-COM	-	45.297	45.297
	Puntual	-	5.735	5.735
	HAB-OTROS	-	30.768	30.768
	<b>TOTAL</b>	<b>-</b>	<b>93.911</b>	<b>93.911</b>
CENTRO-PONIENTE	Complejo	568	4.426	4.994
	OFI-COM	4.902	2.283	7.185
	Puntual	3.637	2.996	6.633
	HAB-OTROS	36.173	26.782	62.955
	<b>TOTAL</b>	<b>45.280</b>	<b>36.487</b>	<b>81.767</b>
ORIENTE	Complejo	1.969	4.352	6.321
	OFI-COM	7.730	22.406	30.136
	Puntual	8.224	12.380	20.604
	HAB-OTROS	112.735	40.126	152.861
	<b>TOTAL</b>	<b>130.658</b>	<b>79.264</b>	<b>209.922</b>
PONIENTE	Complejo	2.706	5.172	7.878
	OFI-COM	1.121	13.060	14.181
	Puntual	525	2.172	2.697
	HAB-OTROS	23.539	44.467	68.006
	<b>TOTAL</b>	<b>27.891</b>	<b>64.871</b>	<b>92.762</b>
<b>TOTAL GENERAL</b>		<b>203.829</b>	<b>274.533</b>	<b>478.362</b>

Fuente: Elaboración Propia a partir de la extensión de la Zona Nocturna

## 5.2.2 Ajustes al Modelo Matemático

Junto a la contraparte técnica, y con el objeto de atenuar en parte los efectos negativos de las soluciones óptimas, se ajustaron los siguientes parámetros del modelo matemático:

- Se redujo el ponderador del tiempo de espera y la potencia de la carga en la estimación de tiempo de espera, a objeto de que la importancia relativa de los conceptos costo de espera y costo por kilometraje fuese 40 a 60
- En el costo de las rutas, se ponderaron por cero los kilómetros operacionales, puesto que no son optimizables, y se ponderaron por cuatro los kilómetros no operacionales del ruteo del cluster, a objeto de mejorar la eficiencia en materia de km.
- Se modificó la penalización de la diferencia de jornadas (entre la máxima y la mínima) al interior de cada escenario-grafo, ponderándola por la cantidad de clusters y por el coeficiente de variación de las duraciones de jornada. Ello con el objeto de que esta penalización no perdiera importancia en las redes de mayor tamaño, debido a que el valor de la función objetivo es directamente proporcional al tamaño de la red.

Asimismo, junto a la contraparte se tomó la decisión de modificar el algoritmo de perturbaciones en la búsqueda de mejores clústers, en el sentido de romper las permutaciones por actos separados de ceder arcos (máximo 5), evaluando la función objetivo antes aplicar la cesión de arcos en el sentido inverso.

Tabla 77: Ajuste de Parámetros y Ponderadores Modelaciones Finales

	Corridas Iniciales	Corridas Finales
<b>Capacidad de Camiones:</b>		
Teórica:	7.500 kg	7.500 kg
Holgura:	7%	7%
Modelo:	6.975 kg	6.975 kg
<b>Incremento de la Basura diaria (en desviaciones estándar):</b>	1	1
<b>Costo de Espera (\$/hr-Ton):</b>	78	<b>60</b>
Potencia de Carga:	1,3	<b>1</b>
Potencia de Espera:	3	3
<b>Costo Km (\$/Km):</b>	515	515
Rendimiento (km/litro):	1,7	1,7
Costo Mantenimiento (amplificador)	1,4	1,4
<b>Ponderador Km Comercial</b>	1	<b>0</b>
<b>Ponderador Km No Comercial</b>	1	<b>4</b>
<b>Ponderador Km (Posicionamientos + KDM)</b>	1	1
<b>Costo Cuadrilla (\$/día):</b>	100.000	100.000
<b>Tiempo muerto inicio Jornada Cargador (hr):</b>	0,5	0,5
<b>Tiempo muerto fin Jornada Cargador (hr):</b>	0,5	0,5
<b>Descanso luego de 4 hrs. (hr):</b>	0,5	0,5
<b>Jornada Cargador fuera de la sede (hr):</b>	7,5	7,5
<b>Penalización por sobre jornada (\$):</b>	100.000	100.000
<b>Penalización por diferencia de jornada (\$/hr): (pondera la diferencia Jmax-Jmin)</b>	12.500	<b>12.500*</b> Nºclusters*CV
<b>Penalización por viraje (\$):</b>	100	100

Fuente: Elaboración Propia a partir de los resultados de las Corridas Iniciales

### 5.2.2.1 Resultados por Escenario

#### ESCENARIO 1: RUTEOS

Las cantidades de clústers por zona y jornada, así como los resultados para el escenario 1, se presentan a continuación:

Tabla 78: Detalle de servicios por Zona y Jornada, Escenario 1

	JORNADA DIURNA	JORNADA NOCTURNA	OBSERVACIONES
ORIENTE	16+1*	6+2**	(*) Incluye sólo las vías exclusivas de Santa Rosa y San Francisco. El eje San Ignacio se incluye al final de del cluster de menor jornada
PONIENTE	5	5	
CENTRO ORIENTE	-	6	(**) Los ejes con repaso nocturno se clustean separados del resto de la red
CENTRO PONIENTE	6	4***	
<b>TOTAL</b>	<b>28</b>	<b>23</b>	(***) Los ejes con repaso nocturno se clustean junto al resto de la red

Fuente: Elaboración Propia a partir de los resultados de las Corridos Iniciales

Tabla 79: Resultados y KPIs por Zona, Modelaciones Finales – Jornada Diurna, Escenario 1

	ORIENTE	PONIENTE	CENTRO-PONIENTE	TOTAL DIURNO
N° SERVICIOS	17	5	6	28
KM OPERACIONALES	147	45	49	241
KM TOTALES	1.296	314	348	1.959
RESIDUOS (KG)	130.658	27.892	45.280	203.830
VIAJES A KDM	29	6	9	44
TO en KDM (%)	60%	62%	67%	62%
VIRAJES (N°)	1.240	304	312	1.856
HORAS – HOMBRE	127	32	40	199
HHEE (HRS)	7,6	0	0	7,6
TIEMPO MEDIO DE ESPERA (HR)	3,62	3,03	3,44	3,5
<b>COSTO (\$/DÍA)</b>	<b>2.485.944</b>	<b>661.798</b>	<b>779.329</b>	<b>3.927.071</b>

Fuente: Elaboración Propia a partir de los resultados del Modelo

Tabla 80: Resultados y KPIs por Zona, Modelaciones Finales – Jornada Nocturna, Escenario 1

	ORIENTE	PONIENTE	CENTRO-ORIENTE	CENTRO-PONIENTE	TOTAL NOCTURNO
N° SERVICIOS	8	5	6	4	23
KM OPERACIONALES	110	35	42	34	221
KM TOTALES	631	403	501	257	1792
RESIDUOS (KG)	75.762	64.870	97.413	36.487	274.532
VIAJES A KDM	14	12	15	7	48
TO en KDM (%)	72%	69%	87%	72%	76%
VIRAJES (N°)	428	137	279	192	1036
HORAS – HOMBRE	49	30	41	26	146
HHEE (HRS)	-	-	-	-	0,0
TIEMPO MEDIO DE ESPERA (HR)	2,8	2,9	3,4	3,2	-
<b>COSTO (\$/DÍA)</b>	<b>1.124.939</b>	<b>707.608</b>	<b>858.073</b>	<b>532.270</b>	<b>3.222.890</b>

Fuente: Elaboración Propia a partir de los resultados del Modelo

**ESCENARIO 2: FRECUENCIA 48**

Las cantidades de clústers por zona y jornada, así como los resultados para el escenario 2, se presentan a continuación:

**Tabla 81: Detalle de servicios por Zona y Jornada, Escenario 2**

	JORNADA DIURNA	JORNADA NOCTURNA	OBSERVACIONES
<b>ORIENTE</b>	30+2*	12+3**	(*) Incluye sólo las vías exclusivas de Santa Rosa y San Francisco. El eje San Ignacio se incluye al final de del cluster de menor jornada
<b>PONIENTE</b>	10	10	
<b>CENTRO ORIENTE</b>	-	12	(**) Los ejes con repaso nocturno se clustean separados del resto de la red
<b>CENTRO PONIENTE</b>	12	8***	
<b>TOTAL</b>	<b>54</b>	<b>45</b>	(***) Los ejes con repaso nocturno se clustean junto al resto de la red

Fuente: Elaboración Propia a partir de los resultados de las Corridas Iniciales

**Tabla 82: Resultados y KPIs por Zona, Modelaciones Finales – Jornada Diurna, Escenario 2**

	ORIENTE	PONIENTE	CENTRO- PONIENTE	TOTAL DIURNO
<b>N° SERVICIOS</b>	32	10	12	54
<b>KM OPERACIONALES</b>	147	45	49	241
<b>KM TOTALES</b>	2.352	525	708	3.585
<b>RESIDUOS (KG)</b>	261.317	55.784	90.559	407.660
<b>VIAJES A KDM</b>	61	11	21	93
<b>TO en KDM (%)</b>	57%	68%	57%	68%
<b>VIRAJES (N°)</b>	1.421	355	407	2.183
<b>HORAS – HOMBRE</b>	240	59	80	378
<b>HHEE (HRS)</b>	9	0	-	9
<b>TIEMPO MEDIO DE ESPERA (HR)</b>	3,4	3,0	3,3	3,3
<b>COSTO (\$/DÍA)</b>	<b>2.277.656</b>	<b>637.284</b>	<b>782.363</b>	<b>3.697.303</b>

Fuente: Elaboración Propia a partir de los resultados del Modelo

**Tabla 83: Resultados y KPIs por Zona, Modelaciones Finales – Jornada Nocturna, Escenario 2**

	ORIENTE	PONIENTE	CENTRO- ORIENTE	CENTRO- PONIENTE	TOTAL NOCTURNO
<b>N° SERVICIOS</b>	15	10	12	8	45
<b>KM OPERACIONALES</b>	110	35	42	34	221
<b>KM TOTALES</b>	1.104	813	1.001	444	3.363
<b>RESIDUOS (KG)</b>	151.524	129.739	194.827	72.973	549.064
<b>VIAJES A KDM</b>	29	24	33	13	99
<b>TO en KDM (%)</b>	70%	72%	79%	75%	74%
<b>VIRAJES (N°)</b>	567	224	389	255	1.435
<b>HORAS – HOMBRE</b>	90	62	80	48	280
<b>HHEE (HRS)</b>	-	-	-	-	-
<b>TIEMPO MEDIO DE ESPERA (HR)</b>	2,8	2,9	3,5	3,2	3,1
<b>COSTO (\$/DÍA)</b>	<b>1.034.395</b>	<b>709.318</b>	<b>857.845</b>	<b>514.371</b>	<b>3.115.929</b>

Fuente: Elaboración Propia a partir de los resultados del Modelo

**ESCENARIO 3: PUNTUALES**

Las cantidades de clústers por zona y jornada, así como los resultados para el escenario 3, se presentan a continuación:

**Tabla 84: Detalle de servicios por Zona y Jornada, Escenario 3**

	JORNADA DIURNA		JORNADA NOCTURNA		OBSERVACIONES
	Puntuales	Resto	Puntuales	Resto	
<b>ORIENTE</b>	2	14+1*	2	4+2**	(*) Incluye sólo las vías exclusivas de Santa Rosa y San Francisco. El eje San Ignacio se incluye al final de del cluster de menor jornada, En ellos no se deben separar Puntuales del Resto
<b>PONIENTE</b>	-	5	1	4	
<b>CENTRO ORIENTE</b>	-	-	0	6	
<b>CENTRO PONIENTE</b>	1	5	1	3***	(**) Los ejes con repaso nocturno se clustean separados del resto de la red y no se deben separar Puntuales del Resto
<b>TOTAL</b>	<b>3</b>	<b>25</b>	<b>4</b>	<b>19</b>	(***) Los ejes con repaso nocturno se clustean junto al resto de la red y en ellas se deben separar los Puntuales del Resto

Fuente: Elaboración Propia a partir de los resultados de las Corridos Iniciales

**Tabla 85: Resultados y KPIs por Zona, Modelaciones Finales – Jornada Diurna, Escenario 3**

	ORIENTE	PONIENTE	CENTRO-PONIENTE	TOTAL DIURNO
<b>N° SERVICIOS</b>	<b>17</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>28</b>
<b>KM OPERACIONALES</b>	155	45	58	258
<b>KM TOTALES</b>	<b>1.313</b>	<b>314</b>	<b>416</b>	<b>2.043</b>
<b>RESIDUOS (KG)</b>	130.658	27.892	45.280	203.830
<b>VIAJES A KDM</b>	<b>28</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>44</b>
<b>TO en KDM (%)</b>	61%	62%	60%	61%
<b>VIRAJES (N°)</b>	<b>1342</b>	<b>304</b>	<b>407</b>	<b>2053</b>
<b>HORAS – HOMBRE</b>	57	32	21	110
<b>HHEE (HRS)</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>
<b>TIEMPO MEDIO DE ESPERA (HR)</b>	1,6	3,0	1,7	2,1
<b>COSTO (\$/DÍA)</b>	<b>2.388.695</b>	<b>661.710</b>	<b>814.240</b>	<b>3.864.645</b>

Fuente: Elaboración Propia a partir de los resultados del Modelo

**Tabla 86: Resultados y KPIs por Zona, Modelaciones Finales – Jornada Nocturna, Escenario 3**

	ORIENTE	PONIENTE	CENTRO-ORIENTE	CENTRO-PONIENTE	TOTAL NOCTURNO
<b>N° SERVICIOS</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>24</b>
<b>KM OPERACIONALES</b>	131	45	42	41	259
<b>KM TOTALES</b>	<b>722</b>	<b>444</b>	<b>501</b>	<b>285</b>	<b>1.952</b>
<b>RESIDUOS (KG)</b>	75.762	64.870	97.413	36.487	274.532
<b>VIAJES A KDM</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>7</b>	<b>50</b>
<b>TO en KDM (%)</b>	72%	62%	87%	69%	73%
<b>VIRAJES (N°)</b>	<b>684</b>	<b>225</b>	<b>279</b>	<b>317</b>	<b>1.505</b>
<b>HORAS – HOMBRE</b>	41	16	41	13	111
<b>HHEE (HRS)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>TIEMPO MEDIO DE ESPERA (HR)</b>	1,99	1,64	3,36	1,64	2,2
<b>COSTO (\$/DÍA)</b>	<b>1.171.830</b>	<b>728.660</b>	<b>958.015</b>	<b>546.775</b>	<b>3.405.280</b>

Fuente: Elaboración Propia a partir de los resultados del Modelo

**ESCENARIO 4: SIN ZONAS**

Las cantidades de clústers por zona y jornada, así como los resultados para el escenario 4, se presentan a continuación:

**Tabla 87: Detalle de servicios por Zona y Jornada, Escenario 4**

	JORNADA DIURNA	JORNADA NOCTURNA	OBSERVACIONES
<b>ORIENTE</b>			
<b>PONIENTE</b>			(*) Incluye sólo las vías exclusivas de Santa Rosa y San Francisco. El eje San Ignacio se incluye al final de del cluster de menor jornada
<b>CENTRO ORIENTE</b>	28+1*	21+2**	
<b>CENTRO PONIENTE</b>			(**) Los ejes con repaso nocturno se clustean separados del resto de la red
<b>TOTAL</b>	<b>29</b>	<b>23</b>	

Fuente: Elaboración Propia a partir de los resultados de las Corridos Iniciales

**Tabla 88: Resultados y KPIs por Zona, Modelaciones Finales - Escenario 4**

	JORNADA DIURNA	JORNADA NOCTURNA	TOTAL
<b>N° SERVICIOS</b>	29	23	52
<b>KM OPERACIONALES</b>	241	221	463
<b>KM TOTALES</b>	2.112	1.918	4.030
<b>RESIDUOS (KG)</b>	203.830	274.532	478.362
<b>VIAJES A KDM</b>	45	51	96
<b>TO en KDM (%)</b>	60%	72%	66%
<b>VIRAJES (N°)</b>	2.133	1.186	3.319
<b>HORAS – HOMBRE</b>	216	153	368
<b>HHEE (HRS)</b>	27	-	27
<b>TIEMPO MEDIO DE ESPERA (HR)</b>	4,1	3,4	3,7
<b>COSTO (\$/DÍA)</b>	<b>4.402.806</b>	<b>3.287.978</b>	<b>7.690.785</b>

Fuente: Elaboración Propia a partir de los resultados del Modelo

**ESCENARIO 5: SIN ZONA CUADRILLA LIBRE**

A partir de las salidas del escenario 4 se dividieron los itinerarios y se generaron tantas tareas como viajes a KDM resultaron. Luego se estimó la cantidad mínima de cuadrillas necesarias para cumplir todas las tareas, reutilizando las cuadrillas y cuidando no superar las 7.5 horas de jornada. Luego las cuadrillas fueron asignadas a las tareas. Como resultado existe ahorro de 1 cuadrilla por jornada, es decir, una cuadrilla de día y una cuadrilla de noche.

**Tareas Generadas a Partir de Escenario 4 DIURNO con 28 clusters**

TAREA	HORA_INICIO	HORA_FIN	LUGAR_INICIO	LUGAR_FIN
E4_D_28_1-1	7:23:46	12:11:23	SEDE	SEDE
E4_D_28_2-2	7:23:46	13:27:00	SEDE	SEDE
E4_D_28_3-2	7:23:46	15:00:32	SEDE	SEDE
E4_D_28_4-2	7:23:46	10:33:57	SEDE	SEDE
E4_D_28_5-2	7:23:46	12:15:12	SEDE	SEDE
E4_D_28_6-3	7:23:46	13:06:35	SEDE	SEDE
E4_D_28_7-4	7:23:46	12:02:11	SEDE	SEDE
E4_D_28_8-5	7:23:46	11:48:04	SEDE	SEDE
E4_D_28_9-5	7:23:46	13:17:08	SEDE	SEDE
E4_D_28_10-6	7:23:46	13:32:54	SEDE	SEDE
E4_D_28_11-6	7:23:46	13:15:36	SEDE	SEDE
E4_D_28_12-7	7:23:46	10:24:11	SEDE	SEDE
E4_D_28_13-7	7:23:46	14:55:30	SEDE	SEDE
E4_D_28_14-8	7:23:46	12:50:58	SEDE	SEDE
E4_D_28_15-9	7:23:46	12:30:56	SEDE	SEDE
E4_D_28_16-10	7:23:46	10:59:30	SEDE	SEDE
E4_D_28_17-10	7:23:46	14:33:30	SEDE	SEDE
E4_D_28_18-10	7:23:46	13:13:03	SEDE	SEDE
E4_D_28_19-11	7:23:46	12:27:43	SEDE	SEDE
E4_D_28_20-12	7:23:46	12:20:15	SEDE	SEDE
E4_D_28_21-13	7:23:46	13:03:42	SEDE	SEDE
E4_D_28_22-14	7:23:46	14:04:14	SEDE	SEDE
E4_D_28_23-14	7:23:46	13:47:01	SEDE	SEDE
E4_D_28_24-15	7:23:46	12:36:38	SEDE	SEDE
E4_D_28_25-15	7:23:46	13:40:17	SEDE	SEDE
E4_D_28_26-16	7:23:46	14:01:45	SEDE	SEDE
E4_D_28_27-16	7:23:46	12:27:49	SEDE	SEDE
E4_D_28_28-16	7:23:46	16:46:17	SEDE	SEDE
E4_D_28_1-2	13:22:27	13:53:47	SEDE	SEDE
E4_D_28_7-5	13:33:50	14:14:38	SEDE	SEDE
E4_D_28_5-3	13:51:40	15:15:01	SEDE	SEDE
E4_D_28_19-12	13:54:18	16:34:24	SEDE	SEDE
E4_D_28_20-13	13:54:52	17:25:22	SEDE	SEDE
E4_D_28_15-10	13:59:05	15:00:12	SEDE	SEDE

E4_D_28_14-9	14:15:11	16:37:52	SEDE	SEDE
E4_D_28_18-11	14:24:00	14:34:03	SEDE	SEDE
E4_D_28_9-6	14:26:52	14:35:19	SEDE	SEDE
E4_D_28_21-14	14:37:32	18:26:18	SEDE	SEDE
E4_D_28_6-4	14:40:01	17:12:41	SEDE	SEDE
E4_D_28_11-7	14:42:29	15:42:22	SEDE	SEDE
E4_D_28_25-16	15:23:52	18:39:14	SEDE	SEDE
E4_D_28_23-15	15:28:12	17:43:40	SEDE	SEDE
E4_D_28_13-8	16:38:51	19:08:40	SEDE	SEDE

### Asignación de Cuadrillas a las Tareas DIURNA

TAREA 1	Hora Inicio	Hora Fin	TAREA 2	Hora Inicio	Hora Fin	TAREA 3	Hora Inicio	Hora Fin
E4_D_28_28-16	7:23:46	16:46:17						
E4_D_28_26-16	7:23:46	14:01:45						
E4_D_28_25-15	7:23:46	13:40:17						
E4_D_28_24-15	7:23:46	12:36:38						
E4_D_28_23-14	7:23:46	13:47:01						
E4_D_28_22-14	7:23:46	14:04:14						
E4_D_28_21-13	7:23:46	13:03:42						
E4_D_28_19-11	7:23:46	12:27:43						
E4_D_28_18-10	7:23:46	13:13:03						
E4_D_28_17-10	7:23:46	14:33:30						
E4_D_28_15-9	7:23:46	12:30:56						
E4_D_28_14-8	7:23:46	12:50:58						
E4_D_28_13-7	7:23:46	14:55:30						
E4_D_28_11-6	7:23:46	13:15:36						
E4_D_28_8-5	7:23:46	11:48:04						
E4_D_28_3-2	7:23:46	15:00:32						
E4_D_28_27-16	7:23:46	12:27:49	E4_D_28_23-15	15:28:12	17:43:40			
E4_D_28_20-12	7:23:46	12:20:15	E4_D_28_6-4	14:40:01	17:12:41			
E4_D_28_16-10	7:23:46	10:59:30	E4_D_28_21-14	14:37:32	18:26:18			
E4_D_28_12-7	7:23:46	10:24:11	E4_D_28_20-13	13:54:52	17:25:22			
E4_D_28_9-5	7:23:46	13:17:08	E4_D_28_5-3	13:51:40	15:15:01			

E4_D_28_7-4	7:23:46	12:02:11	E4_D_28_19-12	13:54:18	16:34:24			
E4_D_28_5-2	7:23:46	12:15:12	E4_D_28_14-9	14:15:11	16:37:52			
E4_D_28_2-2	7:23:46	13:27:00	E4_D_28_18-11	14:24:00	14:34:03			
E4_D_28_10-6	7:23:46	13:32:54	E4_D_28_7-5	13:33:50	14:14:38	E4_D_28_9-6	14:26:52	14:35:19
E4_D_28_6-3	7:23:46	13:06:35	E4_D_28_1-2	13:22:27	13:53:47	E4_D_28_11-7	14:42:29	15:42:22
E4_D_28_4-2	7:23:46	10:33:57	E4_D_28_15-10	13:59:05	15:00:12	E4_D_28_25-16	15:23:52	18:39:14

#### Tareas Generadas a Partir de Escenario 4 NOCTURNO con 21 clusters

TAREA	HORA_INICIO	HORA_FIN	LUGAR_INICIO	LUGAR_FIN
E4_N_21_1-1	20:13:46	22:26:09	SEDE	SEDE
E4_N_21_2-3	20:13:46	21:17:28	SEDE	SEDE
E4_N_21_3-5	20:13:46	22:03:05	SEDE	SEDE
E4_N_21_4-7	20:13:46	21:38:52	SEDE	SEDE
E4_N_21_5-9	20:13:46	21:58:29	SEDE	SEDE
E4_N_21_6-11	20:13:46	22:30:06	SEDE	SEDE
E4_N_21_7-13	20:13:46	22:26:18	SEDE	SEDE
E4_N_21_8-14	20:13:46	23:33:18	SEDE	SEDE
E4_N_21_9-15	20:13:46	23:51:01	SEDE	SEDE
E4_N_21_10-16	20:13:46	23:40:57	SEDE	SEDE
E4_N_21_11-17	20:13:46	23:12:51	SEDE	SEDE
E4_N_21_12-18	20:13:46	23:04:46	SEDE	SEDE
E4_N_21_13-19	20:13:46	24:59:22	SEDE	SEDE
E4_N_21_14-20	20:13:46	21:27:31	SEDE	SEDE
E4_N_21_15-22	20:13:46	21:38:45	SEDE	SEDE
E4_N_21_16-24	20:13:46	22:37:34	SEDE	SEDE
E4_N_21_17-25	20:13:46	22:47:46	SEDE	SEDE
E4_N_21_18-26	20:13:46	24:19:28	SEDE	SEDE
E4_N_21_19-27	20:13:46	26:05:19	SEDE	SEDE
E4_N_21_20-28	20:13:46	23:30:52	SEDE	SEDE
E4_N_21_21-29	20:13:46	23:48:36	SEDE	SEDE
E4_N_21_2-4	22:19:31	25:11:11	SEDE	SEDE
E4_N_21_14-21	22:35:55	25:16:32	SEDE	SEDE
E4_N_21_15-23	22:44:58	24:26:10	SEDE	SEDE
E4_N_21_4-8	22:49:24	24:56:18	SEDE	SEDE
E4_N_21_3-6	23:06:23	25:30:38	SEDE	SEDE
E4_N_21_5-10	23:06:43	24:55:06	SEDE	SEDE
E4_N_21_1-2	23:30:02	25:57:24	SEDE	SEDE
E4_N_21_6-12	23:38:37	25:35:21	SEDE	SEDE
E4_N_21_7-14	23:42:05	27:10:41	SEDE	SEDE
E4_N_21_16-25	23:46:34	27:16:28	SEDE	SEDE
E4_N_21_17-26	24:00:14	26:34:55	SEDE	SEDE

E4_N_21_12-19	24:15:50	26:01:51	SEDE	SEDE
E4_N_21_11-18	24:23:15	27:01:56	SEDE	SEDE
E4_N_21_20-29	24:34:09	26:41:32	SEDE	SEDE
E4_N_21_8-15	24:42:42	27:03:52	SEDE	SEDE
E4_N_21_21-30	24:52:17	27:16:03	SEDE	SEDE
E4_N_21_10-17	24:55:12	27:34:14	SEDE	SEDE
E4_N_21_9-16	24:55:35	27:39:09	SEDE	SEDE
E4_N_21_18-27	25:24:03	27:43:32	SEDE	SEDE
E4_N_21_15-24	25:31:37	26:02:58	SEDE	SEDE
E4_N_21_4-9	25:55:05	27:42:05	SEDE	SEDE
E4_N_21_5-11	25:55:18	26:47:29	SEDE	SEDE
E4_N_21_13-20	26:05:12	27:21:56	SEDE	SEDE
E4_N_21_2-5	26:11:31	27:28:52	SEDE	SEDE
E4_N_21_14-22	26:24:15	26:56:02	SEDE	SEDE
E4_N_21_3-7	26:32:13	26:57:00	SEDE	SEDE
E4_N_21_6-13	26:38:32	27:14:00	SEDE	SEDE
E4_N_21_1-3	26:53:47	27:11:26	SEDE	SEDE
E4_N_21_19-28	27:09:14	27:28:51	SEDE	SEDE

## Asignación de Cuadrillas a las Tareas DIURNA

TAREA 1	Hora Inicio	Hora Fin	TAREA 2	Hora Inicio	Hora Fin	TAREA 3	Hora Inicio	Hora Fin
E4_N_21_11-18	0:23:15	3:01:56	E4_N_21_21-29	20:13:46	23:48:36			
E4_N_21_19-27	20:13:46	2:05:19	E4_N_21_2-5	2:11:31	3:28:52			
E4_N_21_18-26	20:13:46	0:19:28	E4_N_21_8-15	0:42:42	3:03:52			
E4_N_21_17-25	20:13:46	22:47:46	E4_N_21_4-8	22:49:24	0:56:18			
E4_N_21_10-17	0:55:12	3:34:14	E4_N_21_16-24	20:13:46	22:37:34			
E4_N_21_18-27	1:24:03	3:43:32	E4_N_21_13-19	20:13:46	0:59:22			
E4_N_21_1-2	23:30:02	1:57:24	E4_N_21_11-17	20:13:46	23:12:51			
E4_N_21_21-30	0:52:17	3:16:03	E4_N_21_10-16	20:13:46	23:40:57			
E4_N_21_9-16	0:55:35	3:39:09	E4_N_21_9-15	20:13:46	23:51:01			
E4_N_21_8-14	20:13:46	23:33:18	E4_N_21_7-14	23:42:05	3:10:41			
E4_N_21_3-5	20:13:46	22:03:05	E4_N_21_14-21	22:35:55	1:16:32			
E4_N_21_2-3	20:13:46	21:17:28	E4_N_21_16-25	23:46:34	3:16:28			
E4_N_21_12-19	0:15:50	2:01:51	E4_N_21_20-28	20:13:46	23:30:52	E4_N_21_13-20	2:05:12	3:21:56
E4_N_21_2-4	22:19:31	1:11:11	E4_N_21_15-24	1:31:37	2:02:58	E4_N_21_15-22	20:13:46	21:38:45
E4_N_21_20-29	0:34:09	2:41:32	E4_N_21_1-3	2:53:47	3:11:26	E4_N_21_14-20	20:13:46	21:27:31
E4_N_21_12-18	20:13:46	23:04:46	E4_N_21_6-13	2:38:32	3:14:00	E4_N_21_17-26	0:00:14	2:34:55
E4_N_21_7-13	20:13:46	22:26:18	E4_N_21_5-10	23:06:43	0:55:06	E4_N_21_3-7	2:32:13	2:57:00
E4_N_21_6-11	20:13:46	22:30:06	E4_N_21_5-11	1:55:18	2:47:29	E4_N_21_3-6	23:06:23	1:30:38
E4_N_21_5-9	20:13:46	21:58:29	E4_N_21_6-12	23:38:37	1:35:21	E4_N_21_14-22	2:24:15	2:56:02
E4_N_21_4-7	20:13:46	21:38:52	E4_N_21_15-23	22:44:58	0:26:10	E4_N_21_4-9	1:55:05	3:42:05

### **5.2.2.2 Conclusiones de las Modelaciones Finales**

Desde el punto de vista metodológico, la principal conclusión de las modelaciones finales es que el conjunto de ajustes realizados redundó en mejores soluciones, tanto desde la perspectiva de la función objetivo como de los costos de ellas. En efecto, si bien las redes no son exactamente las mismas, es perfectamente comparable la composición de las mejores soluciones de las modelaciones iniciales del Escenario 1, con el resultado global del mismo escenario en las modelaciones finales.

De dicha comparación se aprecia una reducción de la cantidad de servicios y una caída del costo en un 10%, a pesar de la reducción del tiempo de espera promedio (-20%):

**Tabla 89: Comparación del Soluciones para el Escenario 1, Total DIURNO + NOCTURNO**

	<b>Mejor Solución Modelaciones Iniciales E1</b>	<b>Modelación Final E1</b>
<b>N° SERVICIOS</b>	55	51
<b>KM OPERACIONALES</b>	395	463
<b>KM TOTALES</b>	4.068	3.751
<b>RESIDUOS (KG)</b>	467.721	478.362
<b>VIAJES A KDM</b>	111	92
<b>TO en KDM (%)</b>	56%	69%
<b>VIRAJES (N°)</b>	3.542	2.892
<b>HORAS – HOMBRE</b>	366	345
<b>HHEE (HRS)</b>	24	7,6
<b>TIEMPO MEDIO DE ESPERA (HR)</b>	3,9	3,2
<b>COSTO (\$/DÍA)</b>	<b>7.968.291</b>	<b>7.149.962</b>

**Fuente: Elaboración Propia a partir de los resultados del Modelo**

En el plano estratégico, y teniendo a la vista la tabla siguiente que consolida los resultados de las modelaciones, es posible responder las preguntas que seguramente originaron la intención de modelar los escenarios identificados en las bases de licitación, a saber:

- Las soluciones óptimas encontradas con el modelo final son efectivamente mejores, bajo el prisma de la función objetivo, que la proyección de la aplicación de las actuales cantidades de servicios, pero son más caras si se evalúan estrictamente las componentes económicas.
- El escenario 2, que supone recolectar cada 48 horas, es ciertamente más eficiente y más barato que hacerlo cada 24 horas (escenario 1), aunque es necesario advertir que la reducción del costo es de solo un 5%, y si bien no hay variación en el tiempo de espera promedio de la basura en la calle, el escenario 2 implica 24 horas de diferencia en la acumulación de basura (dentro del recinto).
- En el escenario 3 supone recolectar de manera separada los generadores puntuales del resto haciendo más eficiente la operación. Este escenario es levemente más costoso, pero bastante más complejo de implementar desde el punto de vista comunicacional y de costumbres de los vecinos.
- Los resultados del escenario 4 pueden parecer contra-intuitivos, debido a que se esperaban mejores resultados que los del escenario 1, sin embargo a juicio del Consultor pueden considerarse como normales debido a que:
  - La literatura recomienda que en esta clase de problemas y algoritmos se comience el proceso iterativo con una solución inicial factible, de lo contrario le tomará más tiempo tanto converger como encontrar la solución óptima. Ello es aún más complejo al limitarse la cantidad de arcos a ser transferidos de clúster.
  - Los límites de las actuales zonas son ciertamente "naturales", pues por ejemplo en el sentido norte sur la Autopista Central divide y complejiza la conexión oriente-poniente, haciendo más costosa y menos eficientes soluciones que mezclen arcos de un lado y otro. Un caso similar pero de distinta naturaleza es el de la Alameda, que presenta entre el norte y el sur características urbanas y de usos de suelo muy disímiles, con posibilidades de movimientos (viraje) ciertamente menores que las encontradas en vialidad normal.

- o De estas dos consideraciones se concluye que los límites actuales son correctos desde la perspectiva de la racionalización de los costos, y una clusterización inicial que los respalde estará más cerca de ser una solución inicial factible.

**Tabla 90: Consolidado de Resultados y KPIs Modelaciones Finales, Total DIURNO + NOCTURNO**

	E1	E2	E3	E4
<b>N° SERVICIOS</b>	51	99	52	52
<b>KM OPERACIONALES</b>	463	463	517	463
<b>KM TOTALES</b>	3.751	6.948	3.995	4.030
<b>RESIDUOS (KG)</b>	478.362	956.724	478.362	478.362
<b>VIAJES A KDM</b>	92	192	94	96
<b>TO en KDM (%)</b>	69%	66%	67%	66%
<b>VIRAJES (N°)</b>	2.892	3.618	3.558	3.319
<b>HORAS – HOMBRE</b>	345	658	221	368
<b>HHEE (HRS)</b>	7,6	9	1	27
<b>TIEMPO MEDIO DE ESPERA (HR)</b>	3,2	3,2	2,1	3,7
<b>COSTO (\$/DÍA)</b>	<b>7.149.962</b>	<b>6.813.231</b>	<b>7.269.925</b>	<b>7.690.785</b>

Fuente: Elaboración Propia a partir de los resultados del Modelo

### 5.3 ANÁLISIS COMPLEMENTARIO: CONTROL DE EFECTO “ISLAS”

Producto del análisis de los resultados obtenidos para las diferentes zonas y escenarios ejecutados es que surgió la inquietud respecto de la formación de “islas” en los clústers, producto de la dinámica de perturbación del algoritmo empleado en la optimización. Entiéndase por islas la generación de subconjuntos de grupos de arcos conectados entre ellos pero desconectado de otros subconjuntos de arcos pertenecientes todos al mismo clúster. Este efecto tiene su origen en la permutación de arcos entre dos clústeres adyacentes, lo cual genera una nueva configuración de arcos en dichos clústeres y que como resultado entrega soluciones con mejores funciones objetivo.

La formación natural de “islas” generó la sensación visual de una desconexión del grafo de arcos lo que implicaría mayores cambios de estado de arcos comerciales a no comerciales y viceversa. Un análisis técnico del contexto indicaba que este fenómeno se producía de manera natural como consecuencia de la búsqueda de una mejor solución desde el punto de vista de las variables de la función objetivo como son: tiempo de espera, kilómetros, jornadas y virajes.

Nuestro entendimiento es que abordar problemáticas de topología (forma) del clúster son objetivos diferentes del modelo planteado en el presente proyecto, por lo que nuestra opción dado los compromisos de tiempos fue cerrar los resultados con el modelo respondiendo a los objetivos requeridos originalmente en el mismo.

Como una manera de dilucidar conclusiones respecto de este punto y entendiendo que todo análisis adicional es un aporte de valor para el Municipio, es que el Consultor decidió abordar la problemática pero de manera acotada en un escenario adicional. Para ello se seleccionó una red de ejecución rápida, con características que permitieran obtener conclusiones de manera

clara y efectiva. Adicionalmente los resultados de estas corridas permitieron enriquecer las conclusiones y orientar de mejor manera el tratamiento de las islas, y que el Municipio perciba estrictamente cuánto pierde por abordarlas con un método u otro.

Tabla 80: Descripción Matricial de Aspectos de Escenarios de Análisis “Islas”

	Ponderador TEspera	Ponderador Km	Penalización Islas	Evita Islas	Penalizaciones relativas a las Jornadas	Resto de elementos de la FO (virajes)
<b>P0 (solo ruteo semilla)</b>	1	1 (1C_4NC_1KDM)	-	-	1	1
<b>P1 (modelo)</b>	1	1 (1C_4NC_1KDM)	-	-	1	1
<b>P2 (solo km NC)</b>	-	1 (0C_4NC_0KDM)	-	-	-	-
<b>P3 (penalizar isla)</b>	1	1 (1C_4NC_1KDM)	1	-	1	1
<b>P4 (evitar islas)</b>	1	1 (1C_4NC_1KDM)	-	1	1	1

Fuente: Elaboración Propia a partir de definición del escenario

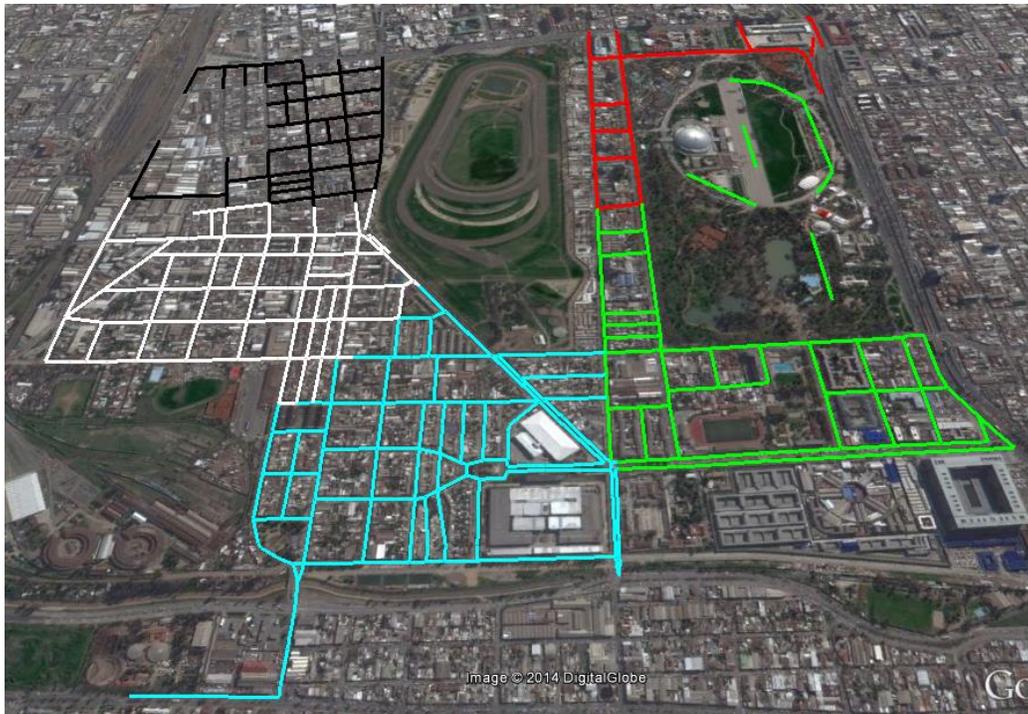
A continuación se describen las pruebas consideradas, los objetivos que se buscaron y los aspectos relevantes.

- **Red Seleccionada:** Poniente Diurno con 5 Servicios (clúster).
- **Prueba 0:** esta prueba sólo rutea la semilla (clúster inicial)
  - **Objetivo:** obtener los indicadores de la red semilla, la cual posee una configuración topológicamente compacta y de características visuales homogéneas en forma.
  - **FO:** se mantiene la función objetivo con la definición final.
- **Prueba 1:** en esta prueba se ejecuta el algoritmo de optimización sobre la red obteniendo la mejor solución de la misma.
  - **Objetivo:** obtener los indicadores con la red optimizada pudiendo visualizar la generación de Islas evaluando el costo beneficio obtenido en los aspectos considerados en la función objetivo.
  - **FO:** se mantiene la función objetivo con la definición final
- **Prueba 2:** en esta prueba se ejecuta el algoritmo de optimización, dejando sólo los kilómetros no comerciales ponderados por cuatro dentro de la función objetivo.
  - **Objetivo:** simplificar la problemática tendiendo sólo a optimizar los kilómetros no comerciales, obteniendo una métrica de la expectativa máxima de kilómetros a obtener de la optimización, para tener una referencia de comparación respecto de la eficiencia de kilómetros en el servicio.
  - **FO:** se dejan solo kilómetros no comerciales en la función objetivo.
- **Prueba 3:** se penaliza en la función objetivo la generación de nuevas islas respecto de la cantidad de islas de la semilla. Esto es penalizado con \$40.000
  - **Objetivo:** evaluar el efecto en los KPIs de penalizar en la función objetivo la generación de islas, esto es, tratar de evitarlas en la medida de lo posible, esto implica que podrían ser aceptadas si mejoran la solución.
  - **FO:** se incorpora a la función objetivo final una penalización por islas.
- **Prueba 4:** se evitan las islas, se deja como una restricción del algoritmo el hecho de que no permita la generación de nuevas islas respecto de las inicialmente contenidas en el clúster semilla.
  - **Objetivo:** evaluar el efecto en los KPIs de restringir la creación de islas, es decir que no se acepte ninguna solución que genere nuevas islas respecto de las ya generadas.

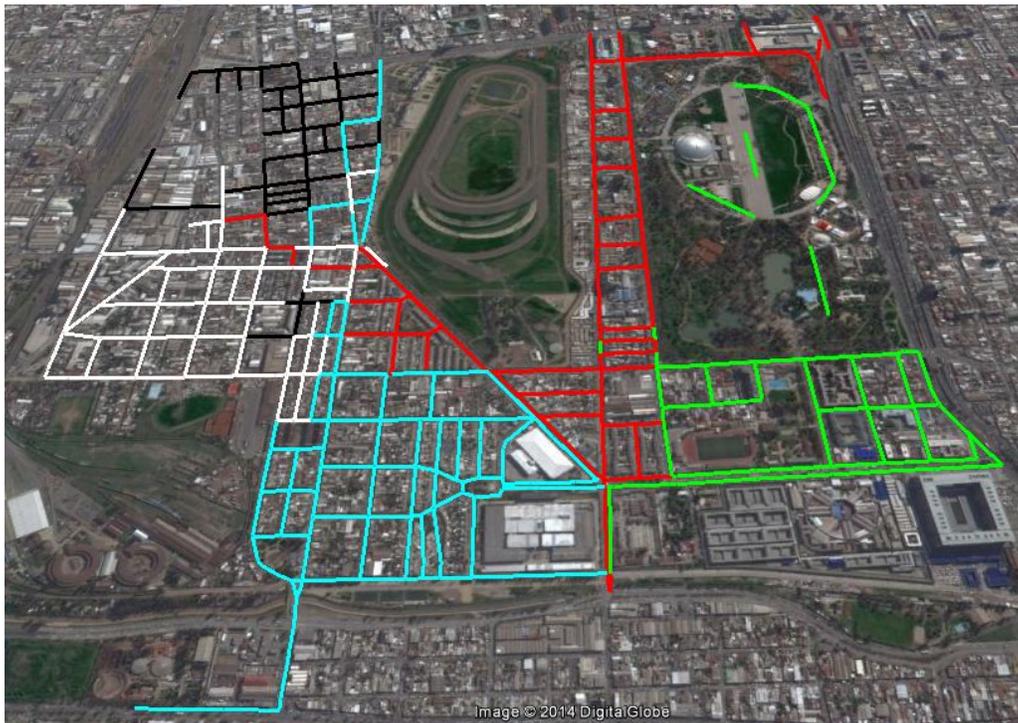
A través de las imágenes obtenidas de cada uno de los escenarios de prueba ejecutados es posible observar ciertas características topológicas de las redes.

- Se producen recorridos desde los clúster más al sur de la red hacia el norte, atravesando los clúster al norte de la red.
- La red "semilla" es la que se observa con una topología más homogénea visualmente.
- Se observa en la red optimizada la generación de islas (por ejemplo caso de clúster de color negro), las cuales generarían viajes no comerciales para poder recorrer el clúster. Esto se podría entender como ineficiencias desde el punto de vista de kilómetros.
- La opción de penalizar islas efectivamente disminuye la tendencia a generarlas, pero aún se producen rutas largas atravesando los clúster que están ubicados en la parte norte de la red.

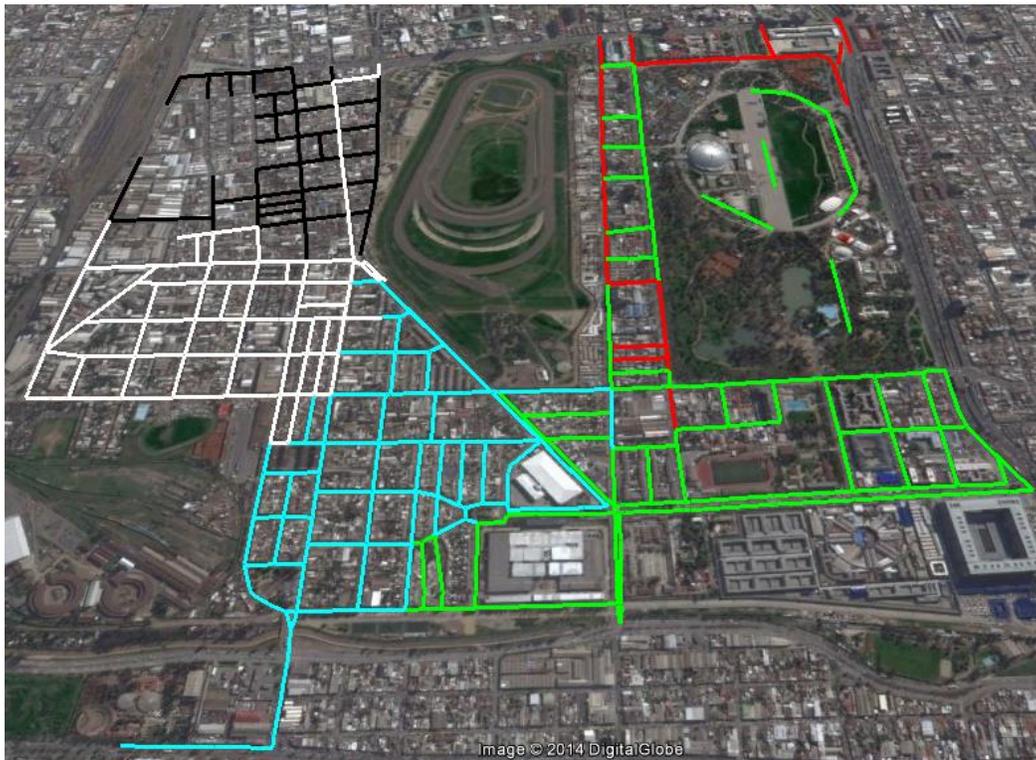
**Figura 51. Clusterización semilla ruteada, Prueba 0**



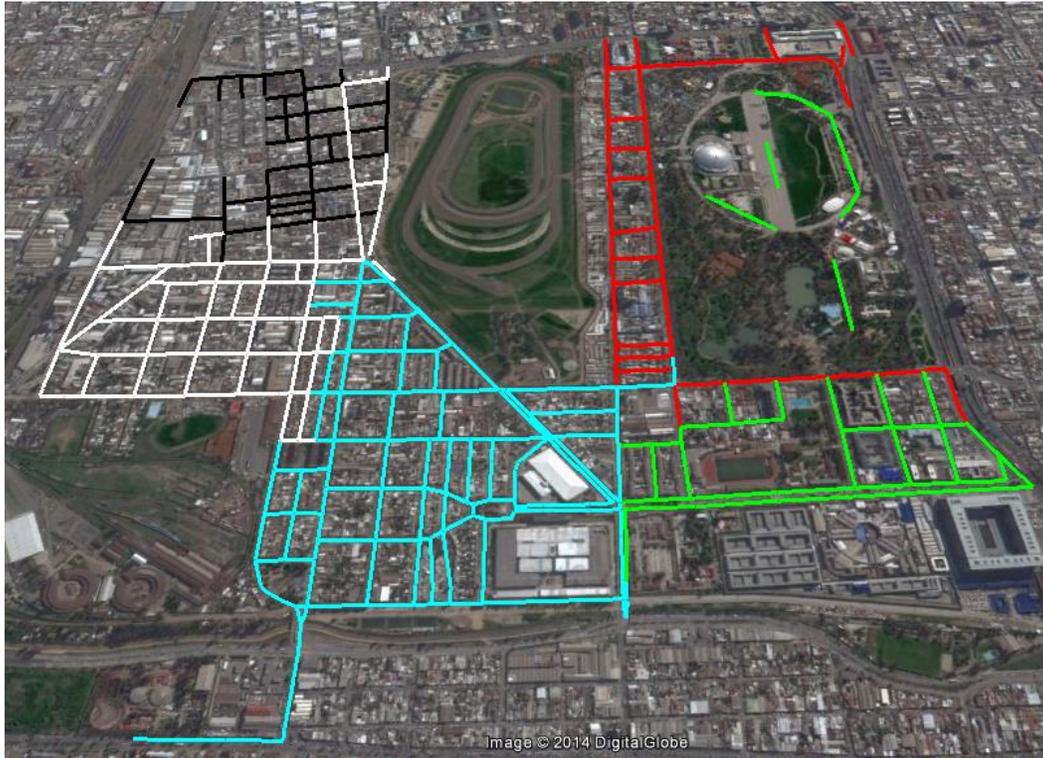
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados del Modelo

**Figura 52. Clusterización Solución Modelo Final, Prueba 1**

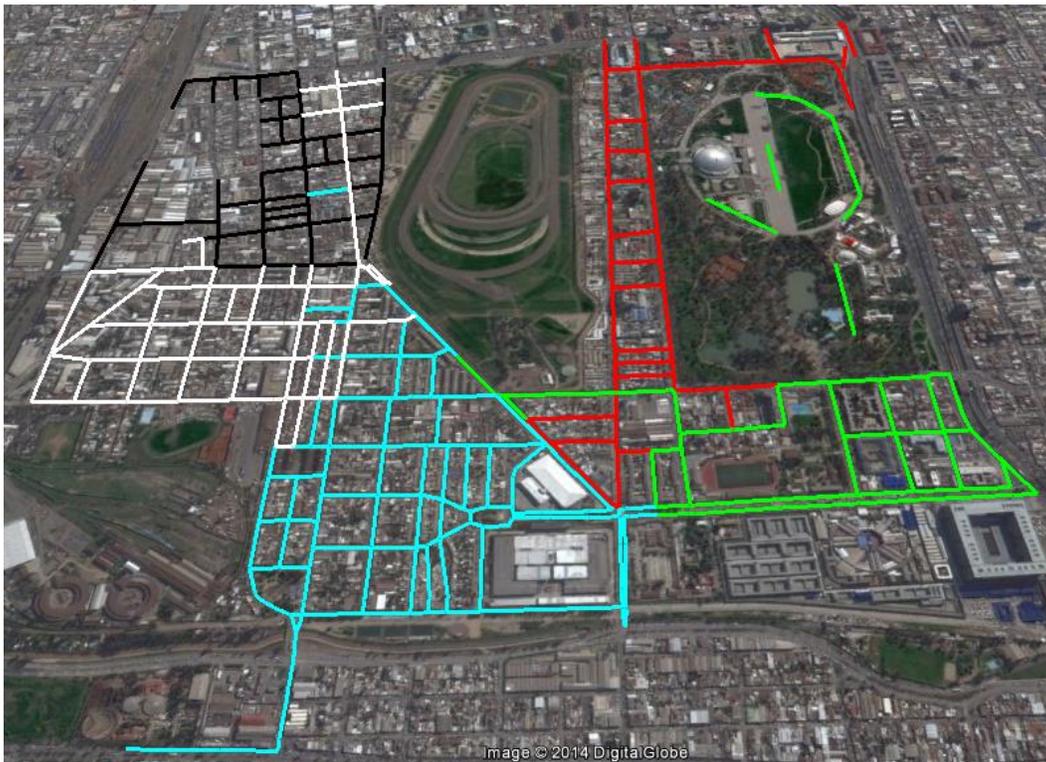
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados del Modelo

**Figura 53. Clusterización Solución Modelo solo Km No Operacionales, Prueba 2**

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados del Modelo

**Figura 54. Clusterización Solución Modelo Penalización de Islas, Prueba 3**

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados del Modelo

**Figura 55. Clusterización Solución Modelo Descarta Islas, Prueba 4**

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados del Modelo

### 5.3.1 Análisis de Indicadores

Los indicadores KPIs seleccionados como parte de las métricas a ser consideradas en las pruebas fueron los siguientes:

- Tiempo de Espera Ponderado por Kg de la basura.
- Coeficiente de Variación de las Jornadas de los Clúster
- Cantidad de Horas Extras Totales incurridas en la red
- Cantidad de Viajes a KDM generados por la solución final para la red
- Eficiencia Global de Kilómetros dentro de la red
- Tasa de Ocupación Promedio del Camión Llegando a KDM
- Cantidad de Virajes Totales
- Cantidad de Islas Totales
- Tasa de Cambios de Estado (Operacional / No Operacional) por Kilómetro

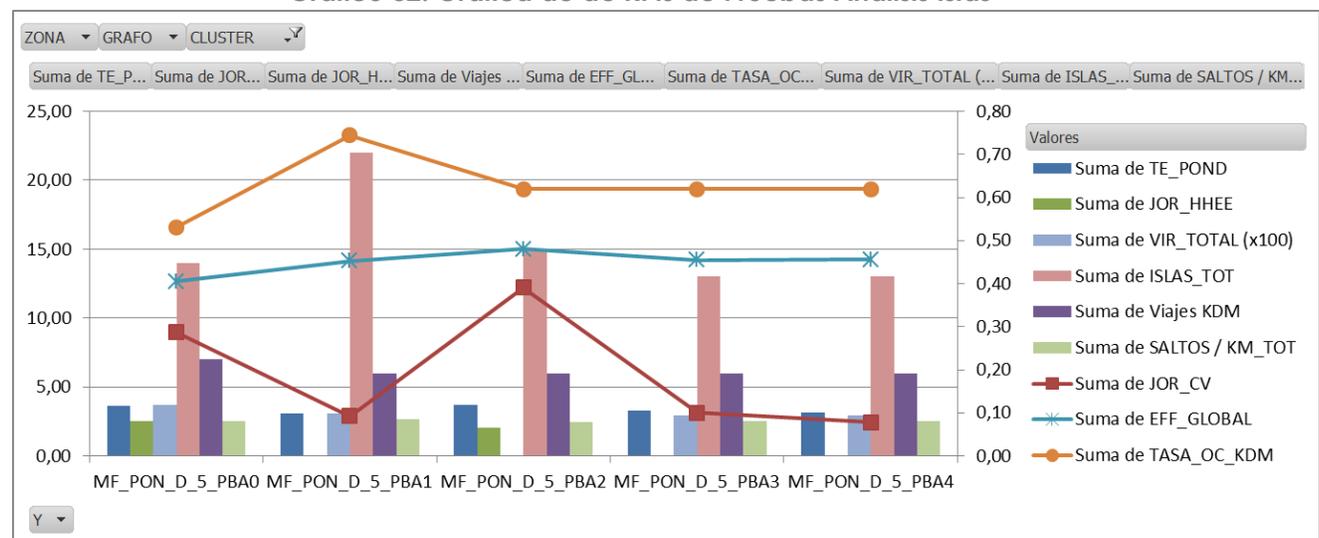
Tabla 91: KPIs Obtenidos de la Ejecución de Pruebas Análisis Islas

PONIENTE DIURNO	Tiempo Espera Ponderado	Coeficiente Variación	Horas Extras	Viajes KDM	Eficiencia de Km Global	Tasa de Ocupación a KDM	Total Virajes	Islas Totales	Tasa Saltos / Km
PRUEBA 0	3,63	0,29	2,52	7,00	0,41	0,53	372	14,00	2,56
PRUEBA 1	3,06	0,09	0,00	6,00	0,45	0,74	306	22,00	2,68
PRUEBA 2	3,68	0,39	2,02	6,00	0,48	0,62	*	15,00	2,48
PRUEBA 3	3,27	0,10	0,00	6,00	0,45	0,62	291	13,00	2,54
PRUEBA 4	3,13	0,08	0,00	6,00	0,46	0,62	297	13,00	2,52

Fuente: Elaboración Propia a partir de Ejecución de Pruebas

(\*) Sin medición

Gráfico 32: Gráfica de de KPIs de Pruebas Análisis Islas



Fuente: Elaboración Propia a partir de Ejecución de Pruebas

De la recopilación de datos de KPIs recogidos a partir de las pruebas es posible observar, desde la tabla de datos y de mejor manera en la gráfica, ciertos comportamientos en escenarios comparables que nos permiten realizar observaciones respecto de buscar mejorar la topología de los clúster en las redes a través de métodos de control de islas.

- Tiempo de Espera Ponderado por Kg de basura:
  - De las pruebas comparables dado que tienen misma función objetivo (Prueba 0 – 1 - 4), es posible ver una tendencia menor a mejorar el tiempo de espera en la solución actual.
  - El empeoramiento del tiempo de espera en las otras soluciones es despreciable y todas estas pruebas mejoran la red semilla.
  - Si bien la prueba 2 en la cual solo se consideran los kilómetros no comerciales en la función objetivo no es comparable, si es posible observar que cuando no existe esta variable en la función objetivo, las soluciones empeoran este aspecto.
- Coeficiente de Variación de las Jornadas de los Clúster:
  - El coeficiente de variación de las jornadas permanecen prácticamente iguales en las soluciones, excepto en la que solo se optimizan kilómetros no comerciales.
  - No se ve afectado este factor por la incorporación de la variable que penaliza islas, ni tampoco evitando soluciones con islas adicionales.
- Cantidad de Horas Extras Totales incurridas en la red
  - En las pruebas 1 - 3 – 4, se aprecia que no se generan horas extras con lo cual es posible aseverar que controlar las islas no implica un desequilibrio en las jornadas, siempre y cuando estas son controladas a través de penalizaciones el que se produzcan.
- Cantidad de Viajes a KDM generados por la solución final para la red
  - Todas las pruebas mantienen constantes en 6 viajes a KDM, y mejoran en 1 viaje los 7 originales de la semilla.
- Eficiencia Global de Kilómetros dentro de la red
  - Se observa que la mejor eficiencia de kilómetros en la red es lograda con la prueba 2 que está diseñada para este propósito, logrando una eficiencia de 48%, lo cual nos entrega una aproximación confiable del esperable máximo de eficiencia en la red.
  - Por otro lado las eficiencias de kilómetros logradas por las otras pruebas son cercanas a la eficiencia de 48% y comparables entre ellas, lo cual es un buen indicador de que se logra dirigir a solución a mejorar la eficiencia de kilómetros.
- Tasa de Ocupación Global del Camión a KDM
  - En este indicador el mejor valor de ocupación de camiones se logra con la prueba 1 logrando un 74%, 12 puntos porcentuales arriba del resto de pruebas, sin considerar la base (prueba 0).
- Cantidad de Virajes Totales
  - Todas las pruebas mejoran de una manera equivalente la cantidad de virajes respecto de la prueba 0, la cual considera la solución semilla.
- Cantidad de Islas Totales
  - Ambos métodos probados para el control de islas, efectivamente las controlan, inclusive reduciéndolas en 1 respecto de la cantidad original de la semilla.

- Tasa de Cambios de Estado (Operacional / No Operacional) por Kilómetro
  - La tasa de cambios de estado (comercial/no comercial) por kilómetro, se mantiene más o menos constante a través de todas las pruebas, inclusive respecto de la prueba 0, considerad como base de comparación.

### 5.3.2 Conclusiones

A través de todas estas observaciones respecto de la topología, e indicadores monitoreados en las pruebas, podemos aseverar con un alto grado de confianza lo siguiente:

- El control de islas a través de ambos métodos, penalización y restricción, es efectivo y controla la creación de las mismas llegando incluso a disminuirlas.
- Este control de islas si bien no degrada las soluciones, tampoco genera mejoras considerables en los indicadores que hagan necesaria la inclusión de este aspecto en el modelo.
- En donde se observa un costo considerable respecto de la solución optimizada con el modelo actual, el cual no privilegia topología, es en la tasa de ocupación, pues este se degrada en 12 puntos porcentuales respecto de la solución optimizada en la prueba 1.
- La expectativa de mejorar la eficiencia de kilómetros a través del control de islas no es tal, manteniéndose en cifras equivalentes en las pruebas 1 – 3 – 4.
- La tasa de cambio de estados, aspecto principal de preocupación, sufre ganancias despreciables respecto de la prueba 1, que es similar al modelo actual de optimización.

Hemos revisado y observado en líneas generales que el control de islas no debe ser un factor principal dentro del modelo de optimización, dado que se enfoca en una percepción visual de que es lo mejor sin poder apreciar la naturaleza física de la red como es dirección, carga, velocidades de tránsito, variables que si son recogidas por el modelo de optimización y que son privilegiadas.

El abordar el problema de fondo respecto de los cambios de estado para lograr una solución “práctica” debe ser una fase de pruebas en terreno y operativización del modelo, el cual significa un enfoque diferente al de decisiones estratégicas, los cuales deben bajar a un trabajo en terreno combinado con la experiencia de los equipos operacionales.

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

Las características y objetivos de la Consultoría hicieron que ella abordara prácticamente todas las aristas del problema de optimización de la recolección de residuos. Es así como el Consultor no solo debió abordar la problemática de diseñar, resolver e implementar un modelo de optimización de rutas de recolección, sino que además debió construir la información que requería para aplicarlo, desde el nivel de detalle más fino de este tipo de problemas, el generador de basura.

Luego, los subproductos o entregables de esta Consultoría son tanto estratégicos como tácticos, por lo que este capítulo orientará las conclusiones en el plano estratégico, y las recomendaciones en el ámbito más operativo o táctico.

### 6.1 CONCLUSIONES

- a) En problemas de optimización de la recolección de residuos, los modelos y algoritmos revisados en la inspección bibliográfica que han sido resueltos por métodos exactos, tienen dimensiones muy inferiores al problema de la comuna de Santiago. Es más, los problemas que por tamaño pueden ser considerados similares al de Santiago, han sido resueltos por métodos heurísticos.

Además, de los problemas resueltos y reportados en la bibliografía, ninguno contempla todas las restricciones y complejidades del problema de la recolección de residuos de la comuna de Santiago. Por lo anterior, el modelo que se diseñó, resolvió e implementó como parte de esta consultoría, es particular al problema del Municipio. Lo anterior además de ser un desafío para el Consultor, era fuente de esa incertidumbre propia de los problemas nuevos sin solución conocida.

- b) Del análisis de la totalidad de los registros de KDM del 2013, se aprecia que el promedio de carga de los camiones que llegan a la estación de transferencia es de 6.800 kg, y de los 18 mil viajes, más de 3 mil contenían una carga inferior a los 5.000 kg por camión, cuestión que inducía a pensar en importantes espacios de optimización.

Sin embargo, parte importante de esas brechas se explicaban en la variabilidad intrínseca de la recolección/generación de basura, pues los días lunes se recogen cerca de 580 Ton de basura a nivel comunal, mientras que de martes a viernes se recogen entre 370 y 400 Ton aproximadamente. Los sábados se recolectan cerca de 195 Ton y los domingos 130 Ton en promedio, muy en línea con la cantidad de servicios de recolección que el Municipio disponga. Es decir, gran parte de la problemática referida a la suciedad de las calles en fin de semana y a la sobrecarga de trabajo/recolección de los días lunes, está vinculada a una merma importante de servicio en fin de semana.

- c) La caracterización de los generadores de basura y la estimación de basura generada a nivel de arco se cimentó casi exclusivamente en la información de los roles de la comuna y en bases de datos complementarias que caracterizaban el espacio urbano. Esta información en los análisis generales es consistente con los datos a nivel comunal

entregados por el municipio, sin embargo, al analizar los datos con mayor detalle se hizo evidente la falta de información y la inconsistencia de algunos datos. Lo anterior fue mitigado o subsanado para el presente estudio, sin embargo, deja en evidencia que, existiendo los recursos y la tecnología a disposición de municipio, no se registra ni controla adecuadamente tanto la demanda como la oferta de recolección de basura.

De este modo, considerando la naturaleza y calidad de las bases de datos recibidas desde el Municipio, y el grado de consistencia entre estas, la base de generadores consolidada como parte de esta asesoría no representa la cantidad real de generadores existentes en la comuna (catastro), sino que se trata de la mejor caracterización posible.

- d) A pesar de que no era parte del alcance de la consultoría, para justificar un área de recolección nocturna se realizó un análisis espacial con distintas variables recopiladas a lo largo del estudio, y otras que entregaran una visión integral de la problemática. Para este análisis se consideró como cuestión principal las actividades que se desarrollan en la Comuna, basados en que la zona atendida de manera nocturna debe estar determinada por la concentración tanto de viajes generados como de atraídos. El analizar las densidades normalizadas de los distintos tipos de generadores permitió determinar dónde se generan las mayores concentraciones de servicios en la comuna. De este modo, al comparar el resultado con la zona nocturna actual, no se identificaron razones para modificarla.
- e) La calibración de la situación actual se desarrolló en dos planos. En materia de residuos generados, posterior a la calibración del modelo de generación de basura se ajustaron los residuos de todos los arcos de cada sector/servicio de modo que calzaran con la media más la desviación estándar de la basura en ellos. Por su parte en materia de tiempos de operación, las tasas de tiempos de carga según si la basura esté a granel o contenerizada, fueron calculadas y más tarde ajustadas para apuntarle en cada Zona-Periodo a los valores medios de tiempo global de operación. Es decir, en ambos planos se procuró que la información vertida al grafo aumentase la probabilidad de cumplir los itinerarios.
- f) Los resultados de las Modelaciones Iniciales, tanto globales como a nivel de zonas, arrojaron como primera gran conclusión **la infactibilidad de recoger la totalidad de la basura con la cantidad de servicios actuales, con los nuevos camiones y respetando las jornadas laborales máximas fuera de la sede**. Una serie de cuestiones que hoy no aplican o no se consideran impiden la factibilidad:
- La reducción de la capacidad teórica de los camiones (debido a su renovación), y el respeto a ella, implican más viajes a KDM, que redundan en un mayor consumo de horas hombre.
  - La formalización de la operación respetando las restricciones de tránsito.
  - El atender ejes dos veces por jornada, recogiendo la basura de una vereda en cada pasada.

- La minimización del tiempo de espera de la basura induce soluciones con más kilómetros no operacionales que el mínimo posible.
  - La imposición de factores de seguridad en los tiempos de viaje a KDM, en la basura diaria a ser recogida y en la capacidad de los camiones, a objeto de poder asegurar la factibilidad de los itinerarios, hace que se destine más tiempo del estrictamente necesario al servicio de recolección.
- g) Otra conclusión de las Modelaciones Iniciales es que **las soluciones óptimas encontradas son efectivamente mejores, bajo el prisma de la función objetivo, que la proyección de la aplicación de las actuales cantidades de clústers, pero ellas son más caras si se evalúan estrictamente las componentes económicas.**

También son varios los efectos los que contribuyen a ello, pues prácticamente la totalidad de las cuestiones que presionan al alza las horas hombre, no solo implican un mayor gasto en personal, sino que también un mayor gasto en combustible (incremento de km).

Asimismo, el solo hecho de incrementar los servicios impone una carga financiera que probablemente no se justifique del todo si se considera que los "kilos cargados por cargador" se reducen en la medida que se incrementan los clúster, sin poder reducir los cargadores por cuadrilla.

- h) La última conclusión importante de las Modelaciones Iniciales fue que la solución global comunal compuesta de las soluciones óptimas zonales arrojó 34 servicios en jornada diurna, cuestión que impide disponer de una cantidad adecuada de camiones para mantenimiento preventivo, correctivo e incidencias.

**En consecuencia, para las Modelaciones Finales se realizaron una serie de ajustes que buscaron atenuar los efectos negativos de las soluciones óptimas. Estos ajustes se realizarán en los de ámbitos de la extensión territorial de la Zona Nocturna, de los parámetros y ponderadores del Modelo, y en el algoritmo de perturbaciones en la búsqueda de mejores clústers.**

- i) Desde el punto de vista metodológico, la principal conclusión de las Modelaciones Finales fue que el conjunto de ajustes realizados redundó en mejores soluciones, tanto desde la perspectiva de la función objetivo como de los costos de ellas.
- j) En el plano estratégico, las Modelaciones Finales confirman que las soluciones óptimas encontradas son mejores, bajo el prisma de la función objetivo, que la proyección de la aplicación de las actuales cantidades de servicios, **pero son más caras si se evalúan estrictamente las componentes económicas.**

No obstante ello, a juicio del Consultor y teniendo a la vista la comparación de resultados y KPIs, el Escenario 1 es el recomendado, aunque como se describe en las recomendaciones, no está agotado el mejoramiento del modelo ni de los imput del mismo.

## 6.2 RECOMENDACIONES

- k) Sabido es que la implementación de cambios profundos en el sistema de recolección requieren de una adecuada atención y acompañamiento, en un proceso de ajustes tácticos de terreno. Sin embargo, por el nivel de precisión y optimización deseado, se recomienda que previamente el municipio revise con extremo detalle la red de recolección y la complementaria interna, pues imperfecciones o mal estimaciones en ellas generan soluciones con más o menos kilómetros operacionales y no operacionales que el mínimo posible, cuestión que afecta tanto al consumo de horas hombre como al gasto en combustible.
- l) Una vez que lo anterior ocurra se debería correr nuevamente el Modelo Final, estresando algunos parámetros y flexibilizando otros, a objeto de mejorar determinados KPIs de eficiencia o productividad, sin vulnerar las restricciones laborales y aquellas que le merezcan mayor atención al Municipio.

Estas recomendaciones son necesarias pues la calidad de las soluciones en términos de la eficiencia de los ruteos y la precisión de los itinerarios requiere del mismo nivel de calidad en los datos de entrada. La idea que subyace es que la carencia o problemas con los de datos de entrada pueden ser paliados con la adecuada revisión y contraste con la experiencia.

- m) Entre otras cosas, la reducción de la capacidad de los camiones (por renovación) hará, como señalan los resultados de las Modelaciones, que la jornada laboral de los cargadores se transforme en una restricción muy activa, y una barrera natural para la reducción de costos. Por lo anterior, y asumiendo que no es posible establecer/planificar de manera sistemática horas extras, se recomienda analizar las posibilidades y bondades, legales y técnicas, de cambiar el régimen de horas de los cargadores, de una forma en que todos directa o indirectamente se beneficien.
- n) En materia de requerimientos de infraestructura, para poder generar la corrida de todos los escenarios y minimizar los tiempos se debe disponer de servidores dedicados a la corrida de los mismos, lo que involucran la ejecución de manera nocturna de los procesos, en momentos de disponibilidad de los recursos de la institución, de tal forma de paralelizar las ejecuciones y se disminuyan dichos tiempos. Aspectos importantes de destacar respecto de la infraestructura son:
- Capacidad de Procesamiento: esta componente de infraestructura es fundamental en la velocidad de proceso del programa de implementación de la heurística.
  - Capacidad de Recursos de Memoria: respecto de los recursos de memoria de los servidores, estos son también relevantes dada la cantidad y tamaño de las estructuras de datos que son empleadas en la implementación.
  - Base de Datos: dado el tamaño de la red se hizo necesario almacenar la información de la misma en bases de datos, lo que implica consumo de recursos de red y tiempos de acceso y respuesta para procesar los datos que permitan:

- i. Consultar la matriz de distancia entre arcos con el objetivo de clusterizar. para cada uno de los escenarios requeridos.
- ii. Consultar la matriz de distancia entre nodos para generar los arcos ficticios que son requeridos para poder rutear (generación del grafo euleriano).
- iii. Reconstruir los arcos reales de la red. para lo cual se consulta la matriz de predecesores

## 7 BIBLIOGRAFÍA

---

Caracterización de Residuos Sólidos Domiciliarios en La Región Metropolitana.

Ciudad Horizontal, un espacio dinámico. Alternativas para la reconversión de pequeños bolsones urbanos. Universidad Central. 2005.

Informe de Gestión de Aseo 2012.

Ley N° 18.695, Orgánica Constitucional de Municipalidades (Texto Refundido. Coordinado Y Sistematizado).

Ley N° 18.883, que Aprueba Estatuto Administrativo para Funcionarios Municipales.

Ordenanza N° 77/1998, de la I. M. de Santiago. Ordenanza de "Aseo en la Comuna" (texto original y completo).

Resolución Exenta N° 347/1987, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Subsecretaría de Transportes, que establece La Red Vial Básica de la ciudad de Santiago.<sup>10</sup>

Tchobanoglous. 1993. Gestión integral de residuos sólidos. McGraw-Hill.

---

<sup>10</sup> Modificaciones incorporadas: Res.Ex. 636/87; Res.Ex. 403/92; Res.Ex. 857/98; Res.Ex. 526/2002; Res.Ex. 272/2003; Res.Ex. 480/2004

## 8 ANEXOS

### 8.1 ANEXO: EJEMPLOS DE ERRORES DE LAS BASES DE DATOS

Durante el levantamiento de la información entregada por el Municipio para la representación de los generadores de basura, como se detalló a lo largo del presente informe, se encontraron una serie de inconsistencias entre las diferentes fuentes de información. Esto requirió de la definición de una serie de supuestos para la consolidación de los generadores que finalmente se utilizarían en la modelación.

Dado lo anteriormente expuesto, la base de generadores (consolidados y utilizados en la modelación), fueron considerados como un dato de entrada para caracterizar los distintos patrones de generadores de cada ruta de recolección vigentes en el periodo de datos utilizados para caracterizar la cantidad de basura generada en las zonas que sirven dichas rutas.

Por lo tanto, esta base de generadores no representa en ningún caso un catastro de generadores de la comuna. Para demostrar lo anterior, a continuación exponemos el análisis de un caso.

En la base de CORDESAN entregada por el Municipio, correspondiente a los permisos de edificación de edificios de vivienda entregados entre 1992 y 2012, existe un registro del año 2009, correspondiente a un edificio de 11 pisos, que se ubicaría en Lincoln 3158, registro que cumple todos los requisitos para ser parte de la base de generadores puntuales. Sin embargo, al validar esta información a través de Street View de GoogleMaps, este edificio no existe, al menos hasta Abril del 2014, fecha en la que fue capturada la imagen de Google Maps.

Figura 56. Capturas Lincoln 3158 y calle Lincoln





Fuente: Google Street View. Septiembre 2014

Finalmente, este edificio no fue considerado en la base de generadores puntuales ya que está contenido en una zona de recolección de basura particular, informada por el Municipio.

Sin embargo, en una revisión aleatoria a la base de generadores puntuales, motivada por el caso anterior, se identificó un permiso de edificación otorgado el 2004 para la construcción de un edificio de 9 pisos con 130 viviendas en la dirección Gay 2572. Esta dirección en la actualidad corresponde a un edificio de bodegas y locales, como se observa en la siguiente figura.

Figura 57. Captura de inmueble en Gay 2572

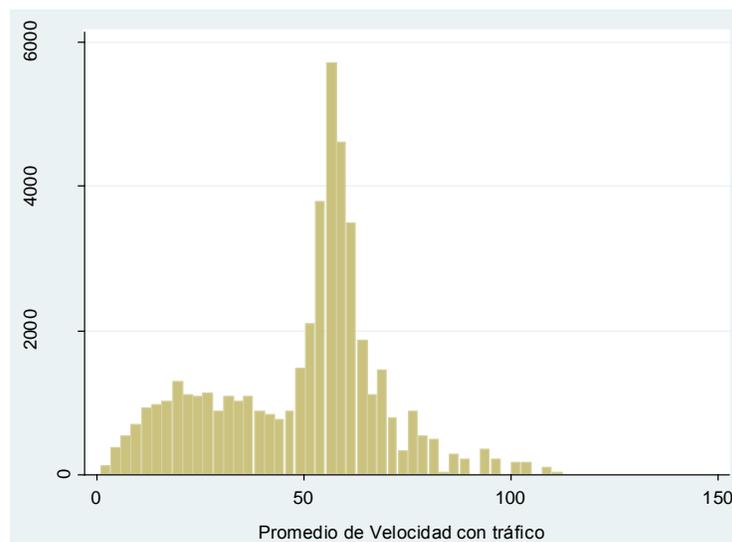


Fuente: Google Street View. Septiembre 2014

## 8.2 ANEXO: ANALISIS DE DATOS DE GOOGLE

Para obtener información de velocidades de Google se ejecutó una consulta que extrajo datos durante un periodo de 3 semanas (entre el 26 de mayo y el 18 de junio 2014). Los datos de Google generan para cada arco de la red 2 velocidades, una velocidad con tráfico que proviene del algoritmo usado en la aplicación WAZE, y otra velocidad por defecto cuyo algoritmo es desconocido. En el siguiente gráfico se muestra el histograma de velocidades por arco obtenidas de Google:

Gráfico 33: Histograma de Velocidad a nivel de Arcos



Fuente: Elaboración propia a partir de consultas a Base de Datos de Google

Como se puede ver en el gráfico, existen 2 concentraciones de datos, una en torno a los 25 km/hora que no presenta una concentración muy pronunciada y otra en torno a los 60 km/hora cuya concentración es muy marcada. Estos datos fueron analizados por periodo, presentado la misma forma. En la siguiente tabla se muestran algunos estadísticos que resumen los datos:

Tabla 92: Estadística de Velocidades de Circulación

mean:	<b>49.4993</b>				
std. dev:	<b>20.1728</b>				
percentiles:	10%	25%	50%	75%	90%
	<b>18.54</b>	<b>34.8</b>	<b>55.2</b>	<b>61.2</b>	<b>70.2</b>

Fuente: Elaboración propia a partir de consultas a Base de Datos de Google

Si se observa la media y la desviación estándar, es evidente que los datos presentan un alto nivel de dispersión, por lo que la media no es un buen indicador. Además de lo anterior los percentiles muestra que el 50% de los arcos tienen velocidades de circulación superiores a 55km/hr, lo cual, además de parecer ilógico para un vehículo con las características de un camión recolector, está por sobre los límites reglamentarios de velocidad en zona urbana, y por sobre las velocidades comerciales promedio en zonas urbanas.

### 8.3 ANEXO: ASIGNACIÓN DE REGISTROS GPS A LA RED

Dado que la información de coordenadas del GPS no son exactos, los pulsos no necesariamente están correctamente ubicados sobre la red vial, por lo cual se debió realizar un procedimiento para asignar los pulsos a los arcos de la red. En efecto, procurando perder la menor cantidad de información posible, se consideraron 2 métodos para asignar los pulsos GPS a la red, los cuales se detallan a continuación:

**Método 1:** Consiste en asignar los pulsos GPS mediante una geocerca de radio 20 metros, a todos los arcos que se intersecten con ella. Es claro que esto generaría un incremento en la cantidad de datos, ya que para cada pulso se puede ser asignado a más de un arco. Para limpiar la base se compara la calle a la cual fue asignado cada pulso con la calle que la base de GPS indica para él, dejando sólo aquellos datos que presentan coincidencia.

**Método 2:** Consiste en asignar los pulsos GPS mediante una geocerca de radio 30 metros, al arco más cercano. Luego se compara la calle a la cual fue asignado el pulso con la calle que la base de GPS indica para él, dejando sólo aquellos datos que presentan coincidencia. Aplicando los 2 métodos anteriores se tiene lo siguiente:

**Tabla 93: Registros GPS luego de los Métodos de Limpieza**

	<b>Método 1</b>	<b>Método2</b>
<b>Datos Originales</b>	3.919.752	3.919.752
<b>Datos después proceso de asignación</b>	3.196.316	1.826.778

**Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK**

Cabe destacar que la asignación también limpia datos duplicados, pulsos GPS fuera del área de estudio y cualquier dato anómalo que pueda ser detectado.

Con los pulsos GPS asignados, se generaron datos velocidad para los arcos considerando el primer y último pulso al interior de ellos, siempre que la diferencia de tiempo entre ambos no fuese superior a media hora. Esto último con el objeto de evitar considerar tiempos en un arco que contemplen más de una pasada de un camión. Al realizar los cálculos se tiene lo siguiente:

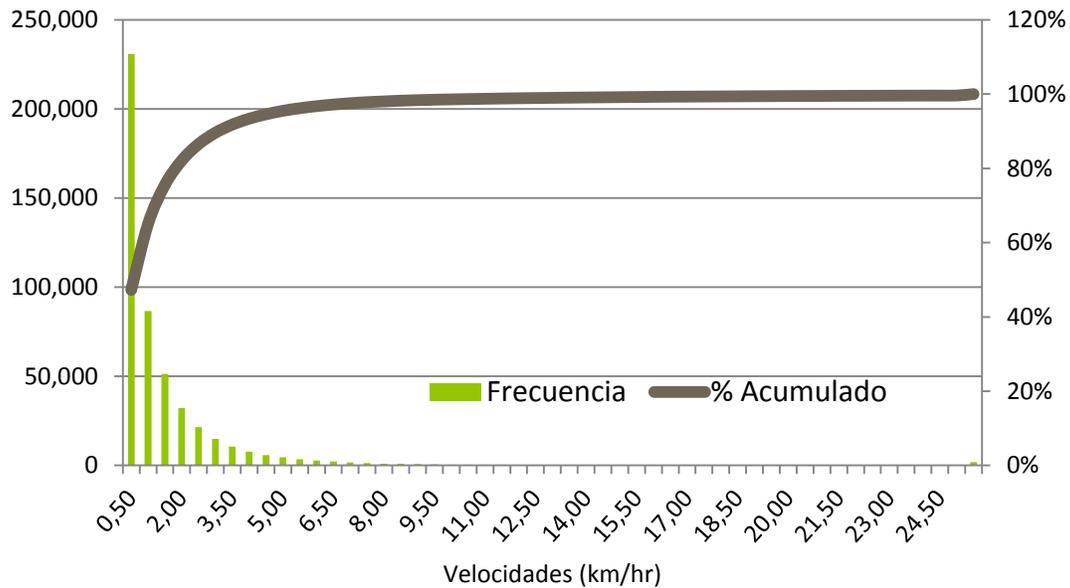
**Tabla 94: Datos de GPS y Cantidad de Datos según Método**

	<b>Método 1</b>	<b>Método2</b>
<b>Datos Originales</b>	3.919.752	3.919.752
<b>Datos después proceso de asignación</b>	3.196.316	1.826.778
<b>Datos tiempos</b>	548.741	331.126
<b>Numero de arcos</b>	6.076	3.670

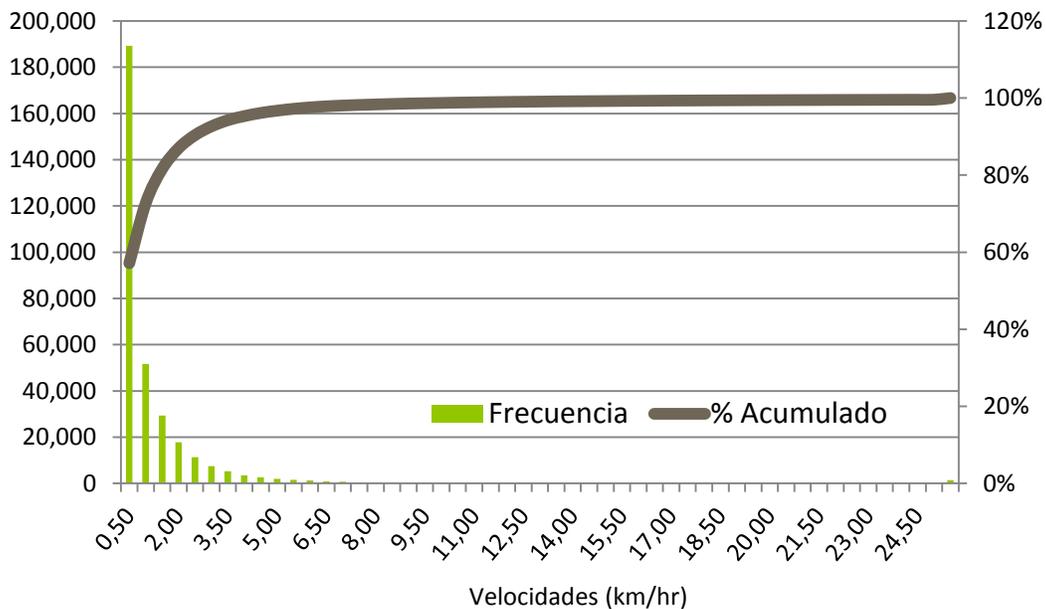
**Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK**

La tabla anterior muestra que en el método 1 se tiene información de velocidades para 6.076 arcos, y con el método 2 sólo para 3.670. En principio el método 1 parece ser más apropiado, sin embargo es necesario analizar la información entregada por cada método.

El primer dato a analizar es la velocidad. Los siguientes gráficos muestran el histograma de velocidades con cada método.

**Gráfico 34: Histograma de Velocidades (Km/hr) de Operación Método de Limpieza 1**

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

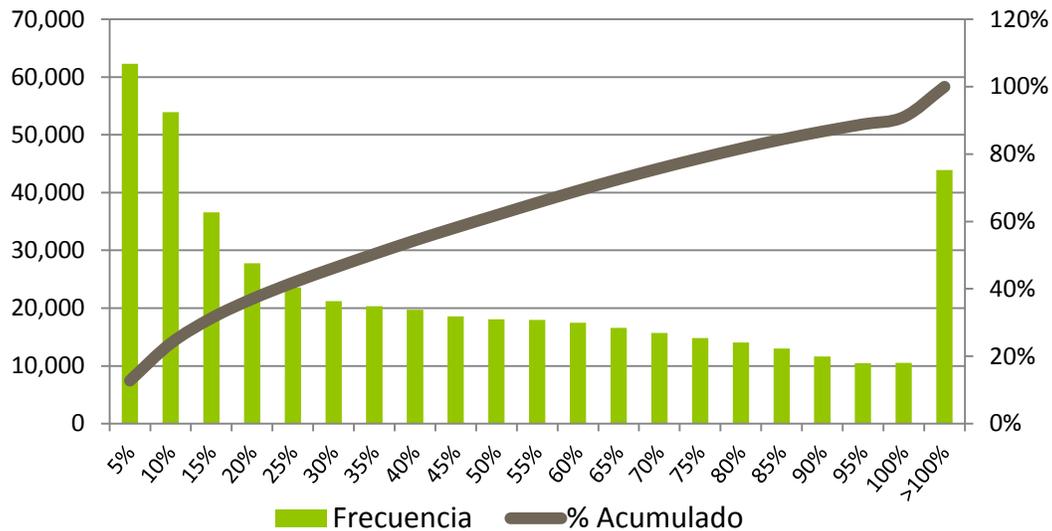
**Gráfico 35: Histograma de Velocidades (Km/hr) de Operación Método de Limpieza 2**

Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

Como se puede ver en los gráficos anteriores, utilizando ambos métodos existe una gran concentración de datos con muy baja velocidad (inferiores a 1km/h). Es probable que este fenómeno se produzca debido a que el intervalo entre pulsos GPS es de 1 minuto, por lo cual, si existe más de un pulso dentro de un arco implícitamente se está considerando sólo a los camiones o tramos más lentos.

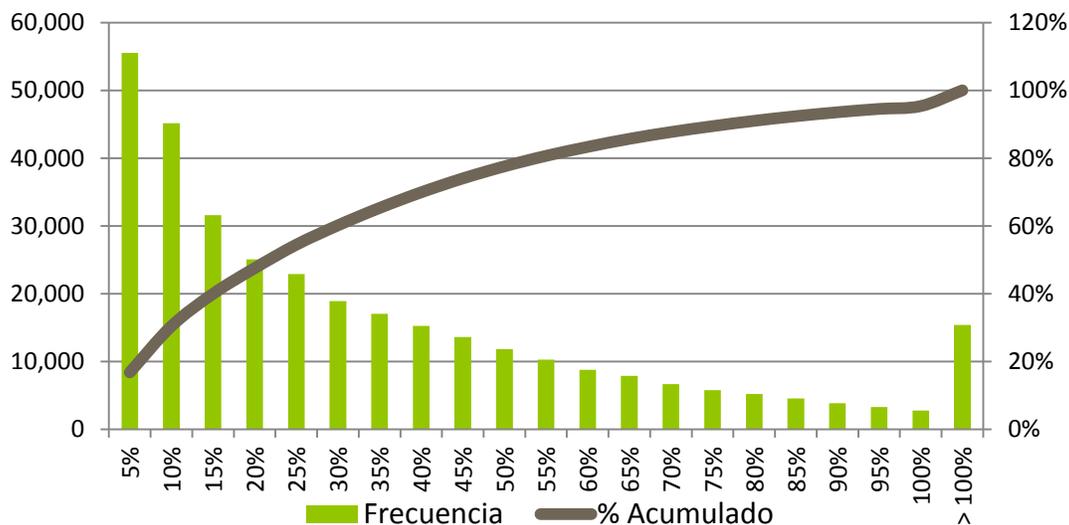
Otro indicador de calidad corresponde a la razón entre distancia entre los pulsos GPS y la distancia total del arco, ya que si este indicador es bajo indica que con un pequeño porcentaje de la distancia total se estaría estimando la velocidad para todo el arco. Las siguientes figuras muestran los histogramas del indicador mencionado.

**Gráfico 36: Histograma de la relación entre Distancia GPS/Distancia Arco, Método 1**



Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

**Gráfico 37: Histograma de la relación entre Distancia GPS/Distancia Arco, Método 2**



Fuente: Elaboración propia a partir de Base de Datos de SITRACK

Como muestran los gráficos anteriores, existe una gran concentración de datos en los cuales la distancia del GPS es un porcentaje menor respecto a la distancia total del arco, por lo cual asumir que esta velocidad es representativa del arco no asegura una buena aproximación, por el contrario.

## 8.4 ANEXO: ENTREGABLES

De acuerdo a las bases de licitación, la solución de cada uno de los escenarios deberá constar de lo siguiente:

- Para cada día de la semana y cada camión disponible, se deberá entregar un itinerario que indique la ruta y horarios de pasadas del camión por cada intersección, desde que sale del Terminal hasta que vuelve a él.
- Para cada día de la semana y cada operador se entregarán las expediciones en las que debe participar.

A continuación las estructuras de los entregables señalados, ajustados de acuerdo a lo señalado por el Municipio.

**Tabla 95: Estructura Entregable Itinerario Vehículo (Despachos & Retornos)**

ENTREGABLE	CAMPOS	DESCRIPCIÓN
<b>Vehículo Resumen (Despachos y Retornos)</b>	<b>ID_VEHICULO</b>	Código identificador del vehículo
	<b>ID_SERVICIO</b>	Código identificador del servicio.
	<b>DIA_SEMANA</b>	Día de la semana en la que ocurre el despacho
	<b>HORA_DESPACHO</b>	Hora en la que es despachado el vehículo desde el terminal
	<b>HORA_RETORNO</b>	Hora en la que retorna el vehículo al terminal

Fuente: Elaboración propia en base a requerimiento Municipal

**Tabla 96: Estructura Entregable Itinerario Vehículo (Detalle Orden de Trabajo)**

ENTREGABLE	CAMPOS	DESCRIPCIÓN
<b>Vehículo Detalle (Detalle de la Orden de Trabajo)</b>	<b>ID_VEHICULO</b>	Código identificador del vehículo
	<b>ID_SERVICIO</b>	Código identificador del servicio.
	<b>DIA_SEMANA</b>	Día de la semana a la cual corresponde la orden de trabajo.
	<b>TAREA</b>	Código identificador del servicio o descripción de la tarea programada. Tareas posibles: Servicio. viaje a KDM. viaje desde KDM, posicionamiento de inicio, posicionamiento de finalización.
	<b>HORA_INICIO</b>	Hora a la que inicia la tarea programada.
	<b>HORA_FIN</b>	Hora a la que finaliza la tarea programada.
	<b>ORIGEN</b>	Especificación de donde comienza la tarea
	<b>DESTINO</b>	Especificación de donde finaliza la tarea

Fuente: Elaboración propia en base a requerimiento Municipal

**Tabla 97: Estructura Entregable Descripción Servicios (Servicios Resumen)**

ENTREGABLE	CAMPOS	DESCRIPCIÓN
Servicios Resumen	ID_SERVICIO	Código identificador del servicio.
	DIA_SEMANA	Día de la semana en la que opera el servicio.
	HORA_INICIO	Hora a la que inicia el servicio de recolección.
	HORA_FIN	Hora a la que finaliza el servicio de recolección.
	ID_ZONA	Código identificador de la zona a la que pertenece el servicio (en caso de existir zonas).
	N_ARCOS	Nro de arcos que visita el servicio. a modo de referencia del tamaño del servicio (opcional)

Fuente: Elaboración propia en base a requerimiento Municipal

**Tabla 98: Estructura Entregable Descripción Servicios (Servicios Detalle)**

ENTREGABLE	CAMPOS	DESCRIPCIÓN
Servicios Detalle	ID_SERVICIO	Código identificador del servicio.
	HORA_INICIO	Hora de inicio de la visita al arco.
	HORA_FIN	Hora de fin de la visita al arco.
	EJE	Calle por la que circula el servicio (arco a arco).
	DESDE	Intersección en la que inicia el arco (nodo origen arco).
	HASTA	Intersección que da fin al arco (nodo destino arco).
	ID_ARCO	Código identificador del arco
	RECOLECCION (LTS)*	Cantidad de basura estimada a recolectar en el arco, medida en Lts.
	RECOLECCION ACUMULADA (LTS)	Cantidad de basura recolectada por el servicio hasta el momento de finalizar la visita al arco, medida en Lts.

Fuente: Elaboración propia en base a requerimiento Municipal

**Tabla 99: Estructura Entregable Itinerario Operador (Resumen)**

ENTREGABLE	CAMPOS	DESCRIPCIÓN
Operadores Resumen	ID_OPERADOR	Código identificador del operador
	DIA_SEMANA	Día de la semana de la jornada
	ID_SEDE	Identificador de sede en la que debe presentarse el operador
	HORA_INICIO_JORNADA	Hora inicio Jornada
	HORA_FIN_JORNADA	Hora fin Jornada
	DURACIÓN_JORNADA	Duración Jornada

Fuente: Elaboración propia en base a requerimiento Municipal

Tabla 100: Estructura Entregable Itinerario Operador (Detalle)

ENTREGABLE	CAMPOS	DESCRIPCIÓN
<b>Operador Detalle (Programación que se entrega al operador. detalla todos los servicios en los que participa en un día)</b>	ID_OPERADOR	Código identificador del operador
	DIA_SEMANA	Día de la semana de la jornada
	TAREA	Tarea programada. Tareas posibles: Servicio, descanso, almuerzo, etc.
	HORA_INICIO	Hora inicio de la tarea programada
	HORA_FIN	Hora de fin de la tarea programada
	ID_SEDE	Identificador de sede en la que debe presentarse el operador

Fuente: Elaboración propia en base a requerimiento Municipal

Tabla 101: Estructura Entregable Itinerario Cargador (Resumen)

ENTREGABLE	CAMPOS	DESCRIPCIÓN
<b>Operadores Resumen</b>	ID_OPERADOR	Código identificador del operador
	DIA_SEMANA	Día de la semana de la jornada
	ID_SEDE	Identificador de sede en la que debe presentarse el operador
	HORA_INICIO_JORNADA	Hora inicio Jornada
	HORA_FIN_JORNADA	Hora fin Jornada
	DURACIÓN_JORNADA	Duración Jornada

Fuente: Elaboración propia en base a requerimiento Municipal

Tabla 102: Estructura Entregable Itinerario Cargador (Detalle)

ENTREGABLE	CAMPOS	DESCRIPCIÓN
<b>Operador Detalle (Programación que se entrega al operador. detalla todos los servicios en los que participa en un día)</b>	ID_OPERADOR	Código identificador del operador
	DIA_SEMANA	Día de la semana de la jornada
	TAREA	Tarea programada. Tareas posibles: Servicio, descanso, almuerzo, etc.
	HORA_INICIO	Hora inicio de la tarea programada
	HORA_FIN	Hora de fin de la tarea programada
	ID_SEDE	Identificador de sede en la que debe presentarse el operador

Fuente: Elaboración propia en base a requerimiento Municipal

Asimismo, de acuerdo a las bases de licitación, el Consultor deberá entregar los siguientes productos al Municipio:

- Archivos SIG, compatibles con ARCGIS, donde estén georeferenciados:
  - Los productores de basura Puntuales, localizaciones de puntos de encuentro de barredores y camiones, el Terminal, las Sedes. y el Procesador de Basura.
  - Los nodos y arcos de cada grafo modelado.
  - Por cada escenario, las rutas, separadas por capas asociadas a días, si corresponde.
- Una planilla Excel o compatible, con el listado de todos los arcos modelados, cada uno con sus datos observados y modelados (tiempo y cantidad de basura).

A continuación las estructuras de las coberturas señalados, ajustadas de acuerdo a lo conversado con el Municipio.

Tabla 103: Estructura Cobertura Generadores de Basura

COBERTURA	ATRIBUTOS	DESCRIPCIÓN
GENERADORES	TIPO	Simple habitacionales (casas. edificios pequeños)
		Simple comerciales (comercio local)
		Simple Oficinas
		Simple Educación
		Simple Industria
		Complejos (generan mucha basura al día. pagan aseo extra)
		Puntuales (condominios. mucha basura 1 vez al día)
		Cités (conjunto de casas en pasajes en los que no puede entrar el camión recolector)
		Distancia (basura asociada a cada eje. según su distancia)
	BASURA DIA DLN	Resultado modelación generación de basura por calle en DLN. que se recoge en el día (Kg)
	BASURA NOCHE DLN	Resultado modelación generación de basura por calle en DLN, que se recoge en el noche (Kg)
	BASURA DIA LUN	Resultado modelación generación de basura por calle en DLN, que se recoge en el día (Kg)
	BASURA NOCHE LUN	Resultado modelación generación de basura por calle en DLN, que se recoge en el noche (Kg)
TPO_RECOLEC	Se define si la basura generada por se recoge por alcance, está en contenedor o a granel.	
TIEMPO DIA DLN	Tiempos de recolección de basura por calle en DLN, que se recoge en el día (Min)	
TIEMPO NOCHE DLN	Tiempos de recolección de basura por calle en DLN, que se recoge en el noche (Min)	
TIEMPO DIA LUN	Tiempos de recolección de basura por calle en DLN, que se recoge en el día (Min)	
TIEMPO NOCHE LUN	Tiempos de recolección de basura por calle en DLN, que se recoge en el noche (Min)	

Fuente: Elaboración propia en base a requerimiento Municipal

Tabla 104: Estructura de Otras Coberturas

COBERTURA	ATRIBUTOS	DESCRIPCIÓN
RUTAS	ESCENARIO	Escenario de Modelación
	RUTA	Nombre Ruta
	DIA	Día de ejecución de la ruta
	HORA	Hora de Inicio de la ruta
	DURACIÓN	Tiempo de duración de la ruta
NODOS	ID	Identificador del nodo
	COORD_X	Coordenada x UTM del nodo (mts.)
	COORD_Y	Coordenada y UTM del nodo (mts.)
PUNTOS DE INTERES	DESCRIPCION	Procesador de Basura, Sede o Terminal
	DIRECCIÓN	Dirección del punto
	CAPACIDAD	Capacidad del lugar, si corresponde

Fuente: Elaboración propia en base a requerimiento Municipal

**Tabla 105: Estructura Cobertura Red Vial**

ATRIBUTO	DESCRIPCIÓN
LINK_ID	Identificador del Arco
NOMBRE	Nombre del eje
CATEGORIA	Tipo de eje
DISTANCIA	Distancia del arco (mts)
NODOI	Nodo Inicio
NODOJ	Nodo Fin
TIPOVIA	Vía Segregada, Exclusiva, Pista Solo Bus, Reversible o Corredor, con horario de funcionamiento
ZONA	Centro-Oriente, Centro-Poniente, Oriente y Poniente
AZIMUTH	Azimuth del arco, considerando el sentido de tránsito (°)
DOBLE PASO	Define si el arco se debe recorrer 2 veces
ALCANCE	Define si el arco se recorre en camión (0), los cargadores (1) o no se recorre (-1).
COMPLEMENTARIO	Define si el arco es parte de la red complementaria interna. externo o no.
Tv_DLN_0_7	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DLN entre las 00:00 y 07:00hrs.
Tv_DLN_7_10	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DLN entre las 07:00 y 10:00hrs.
Tv_DLN_10_17	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DLN entre las 10:00 y 17:00hrs.
Tv_DLN_17_21	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DLN entre las 17:00 y 21:00hrs.
Tv_DLN_21_24	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DLN entre las 21:00 y 24:00hrs.
Tv_SAB_0_7	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en SAB entre las 00:00 y 07:00hrs.
Tv_SAB_7_10	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en SAB entre las 07:00 y 10:00hrs.
Tv_SAB_10_17	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en SAB entre las 10:00 y 17:00hrs.
Tv_SAB_17_21	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en SAB entre las 17:00 y 21:00hrs.
Tv_SAB_21_24	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en SAB entre las 21:00 y 24:00hrs.
Tv_DOM_0_7	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DOM entre las 00:00 y 07:00hrs.
Tv_DOM_7_10	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DOM entre las 07:00 y 10:00hrs.
Tv_DOM_10_17	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DOM entre las 10:00 y 17:00hrs.
Tv_DOM_17_21	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DOM entre las 17:00 y 21:00hrs.
Tv_DOM_21_24	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DOM entre las 21:00 y 24:00hrs.

**Fuente: Elaboración propia en base a requerimiento Municipal**

Tabla 106: Estructura Grafo

Atributo	Descripción
NOMBRE	Nombre del eje
LINK_ID	Identificador del Arco
NODOI	Nodo Inicio
NODOJ	Nodo Fin
DIR_TRAVEL	Define el costado del eje que representa, en los arcos que se debe recorrer 2 veces.
DISTANCIA	Distancia del arco (mts)
AZIMUTH	Azimuth del arco, considerando el sentido de tránsito (°)
ZONA	Centro-Oriente, Centro-Poniente, Oriente y Poniente
Servicio	Define periodo de recolección de basura (Diurno. Nocturno o ambos)
TIPOVIA	Vía Segregada, Exclusiva, Pista Solo Bus, Reversible o Corredor
D_DLN_Complejo	Basura diurna en dln de generadores complejos (kg)
D_DLN_HAB-OTROS	Basura diurna en dln de generadores habitacionales y otros (kg)
D_DLN_OFI-COM	Basura diurna en dln de generadores oficina y comercio (kg)
D_DLN_Puntual	Basura diurna en dln de generadores puntuales (kg)
N_DLN_Complejo	Basura nocturna en dln de generadores complejos (kg)
N_DLN_HAB-OTROS	Basura nocturna en dln de generadores habitacionales y otros (kg)
N_DLN_OFI-COM	Basura nocturna en dln de generadores oficina y comercio (kg)
N_DLN_Puntual	Basura nocturna en dln de generadores puntuales (kg)
D_LUN_Complejo	Basura diurna en lunes de generadores complejos (kg)
D_LUN_HAB-OTROS	Basura diurna en lunes de generadores habitacionales y otros (kg)
D_LUN_OFI-COM	Basura diurna en lunes de generadores oficina y comercio (kg)
D_LUN_Puntual	Basura diurna en lunes de generadores puntuales (kg)
N_LUN_Complejo	Basura nocturna en lunes de generadores complejos (kg)
N_LUN_HAB-OTROS	Basura nocturna en lunes de generadores habitacionales y otros (kg)
N_LUN_OFI-COM	Basura nocturna en lunes de generadores oficina y comercio (kg)
N_LUN_Puntual	Basura nocturna en lunes de generadores puntuales (kg)
Tpo_DLN_D_SP	Tiempo de carga en DLN de la basura diurna de los generadores, menos los puntuales (seg)
Tpo_DLN_N_SP	Tiempo de carga en DLN de la basura nocturna de los generadores, menos los puntuales (seg)
Tpo_LUN_D_SP	Tiempo de carga en Lunes de la basura diurna de los generadores, menos los puntuales (seg)
Tpo_LUN_N_SP	Tiempo de carga en Lunes de la basura nocturna de los generadores, menos los puntuales (seg)
Tpo_DLN_D_PUNT	Tiempo de carga en DLN de la basura diurna de los generadores puntuales (seg)
Tpo_DLN_N_PUNT	Tiempo de carga en DLN de la basura nocturna de los generadores puntuales (seg)
Tpo_LUN_D_PUNT	Tiempo de carga en Lunes de la basura diurna de los generadores puntuales (seg)
Tpo_LUN_N_PUNT	Tiempo de carga en Lunes de la basura nocturna de los generadores puntuales (seg)

Tv_DLN_0_7	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DLN entre las 00:00 y 07:00hrs.
Tv_DLN_7_10	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DLN entre las 07:00 y 10:00hrs.
Tv_DLN_10_17	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DLN entre las 10:00 y 17:00hrs.
Tv_DLN_17_21	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DLN entre las 17:00 y 21:00hrs.
Tv_DLN_21_24	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DLN entre las 21:00 y 24:00hrs.
Tv_SAB_0_7	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en SAB entre las 00:00 y 07:00hrs.
Tv_SAB_7_10	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en SAB entre las 07:00 y 10:00hrs.
Tv_SAB_10_17	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en SAB entre las 10:00 y 17:00hrs.
Tv_SAB_17_21	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en SAB entre las 17:00 y 21:00hrs.
Tv_SAB_21_24	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en SAB entre las 21:00 y 24:00hrs.
Tv_DOM_0_7	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DOM entre las 00:00 y 07:00hrs.
Tv_DOM_7_10	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DOM entre las 07:00 y 10:00hrs.
Tv_DOM_10_17	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DOM entre las 10:00 y 17:00hrs.
Tv_DOM_17_21	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DOM entre las 17:00 y 21:00hrs.
Tv_DOM_21_24	Tiempo de Viaje del Camión en minutos, en DOM entre las 21:00 y 24:00hrs.

Fuente: Elaboración propia en base a requerimiento Municipal

## 8.5 ANEXO: MEDIO ÓPTICO