

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Una mirada en el futuro: “Propuesta de mejora para el
manejo de desechos sólidos en el centro de la Municipalidad
de Esmeraldas, Ecuador”**

Proyecto Técnico

Gianella Maribel Cevallos Chiriboga

Ingeniería Industrial

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Industrial

Quito, 9 de diciembre de 2015

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

COLEGIO CIENCIAS E INGENERÍAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

Una mirada en el futuro: “Propuesta de mejora para el manejo de desechos sólidos en el centro de la Municipalidad de Esmeraldas, Ecuador”

Gianella Maribel Cevallos Chiriboga

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Carlos Suarez , PhD.

Firma del profesor

Quito, 9 de diciembre de 2015

DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Gianella Maribel Cevallos Chiriboga

Código: 19798

Cédula de Identidad: 0802304741

Lugar y fecha: Quito, diciembre de 2015

DEDICATORIA

Le dedico este trabajo a mis padres, Maribel y Armengol; por ese amor incondicional, y porque han sido mi apoyo siempre, incluso cuando he tenido que tomar esos extra pasos para lograr un objetivo. Gracias por creer en mí.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme fortaleza y ayudarme a encontrar el camino.

A mi familia, mis padres, mis hermanas, mi abuelita, y mi tío, por darme esas palabras de aliento, y atender a esas llamadas de apoyo constante; no sé que hubiese hecho sin ustedes. De igual manera le agradezco a mis amigos por sus ideas fructíferas, y las no fructíferas, todas fueron valiosas.

A todo el departamento de Ingeniería Industrial por su ayuda todos estos años, y en especial a mi tutor de tesis, Carlos Suarez, por su guía y dirección.

Al Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Esmeraldas, que me permitieron realizar mi trabajo, y contribuir con mi granito de arena. Muchas gracias.

RESUMEN

El presente proyecto crea una propuesta para el cambio en el sistema de manejo de residuos sólidos en el Barrio Centro de la Provincia de Esmeraldas, en base a un estudio de la recolección actual de residuos sólidos urbanos (RSU). La propuesta se enfoca en la búsqueda de la cantidad adecuada de depósitos (contenedores), su ubicación, y posteriormente la recolección de los mismos. Es así que con una generación de residuos sólidos estimada de 27794.08 kg/día de RSU para el 2020, se determina la cantidad de depósitos requeridos, luego se desarrolla un modelo con el problema de P-mediana que sugiere la ubicación idónea de acuerdo a la accesibilidad de los usuarios; y posteriormente, se desarrolla un modelo con el problema del Agente Viajero Asimétrico para generar las rutas de recolección de los depósitos del proveedor de servicios. Para el primer caso se requieren 65 contenedores de 2.4m^3 capacidad y 8 rutas de recolección realizadas por un vehículo de 23m^3 . Y para el segundo caso se necesitarán 49 contenedores de 3.2m^3 de capacidad y 7 rutas de recolección realizadas por un vehículo de 23m^3 . Ambos casos muestran resultados óptimos, la diferencia yace en que el primer caso se minimiza la distancia del usuario, y en el segundo caso se minimiza la distancia del agente recolector de RSU. El segundo caso es escogido para comparar con la situación actual, debido a las ventajas que provee a una entidad municipal.

Palabras clave: residuos sólidos urbanos (RSU), ubicación, depósitos, p-mediana, ATSP, ruteo de vehículos, propuesta de recolección de residuos.

ABSTRACT

This study created a change proposal in the municipal solid waste management system in El Centro in the municipality of Esmeraldas, based on the study of the current collection of municipal solid waste (MSW). Based on a stationary deposit collection system for comingled waste. The proposal focused on finding the right amount of deposits (containers), their location, and their routing for collection. Thus with an estimated solid waste generation of 27794.08 kg per day for 2020, the amount of deposits required is established; then a model with a p-median problem (PMP) is developed, which suggests the optimal deposits location fitting to users accessibility. And subsequently, a model with an asymmetric traveling salesman problem (ATSP) is developed to generate the collection routes for the deposits, with a minimum distance for the service provider. In the first instance, 65 deposits of a 2.4m³ capacity, and 8 routes made by a 23m³ vehicle are required; and in the second instance 49 deposits of a 3.2m³ capacity, and 7 routes made by a 23m³ vehicle are required. Both cases yielded excellent results, though the first case minimized the distance for the customers (area population), and the second case minimized the distance, for the service provider agent, in the MSW collection. The second case is selected, and then compared with the current situation, due to the advantages that it provided to a municipal entity.

Key Words: municipal solid waste (MSW), location, deposits, p-median, ATSP, routing, waste collection proposal.

TABLA DE CONTENIDO

1	CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN	14
1.1	Antecedentes	14
1.2	Justificación	19
1.3	Objetivos	22
1.3.1	Objetivo General	22
1.3.2	Objetivos Específicos.....	22
2	CAPÍTULO 2.- MARCO TEÓRICO	24
2.1	Definición de Residuos.....	24
2.1.1	Clasificación de Residuos	24
2.2	Gestión de Residuos.....	25
2.2.1	Definición de Gestión o Manejo de Residuos	25
2.2.2	Generación de Residuos Sólidos	26
2.2.3	Almacenamiento de los Residuos Sólidos.....	26
2.2.4	Recolección de Residuos Sólidos	26
2.3	Entrevista	30
2.4	Diagrama de Causa y Efecto.....	30
2.5	Problema de P-mediana “P-median” (PPM)	30
2.6	Problema del Agente Viajero “Traveling Salesman Problem” TSP	32
2.6.1	Problema Asimétrico del Agente Viajero “Asymmetric Salesman Problem” (ATSP) 33	
2.7	Google Maps	35
2.8	Waze.....	36
2.9	Coordenadas geográficas.....	36
2.10	Coordenadas cartesianas.....	37
2.11	Conglomerado k-media “Cluster k-means”	37
2.12	“Variable Neighborhood Search” (VNS) o Búsqueda Variable del Vecindario..	38
2.13	LINGO	38
2.14	Definiciones Ambientales	39
2.14.1	Buenas Prácticas Ambientales	39
2.14.2	Vectores Ambientales.....	40
2.14.3	Vectores Contaminantes o Impactos ambientales.....	40
2.14.4	Efluentes	40
2.14.5	Lixiviado	40

2.14.6	Emisiones de Gases.....	41
3	CAPÍTULO 3.- REVISIÓN LITERARIA	42
3.1	Modelos en Gestión de RSU.....	42
3.2	Generación RSU	44
3.3	Localización de Contenedores con “P-median”	45
3.3.1	“P-median” y Conglomerados.....	47
3.4	Recolección de RSU con “TSP”	48
3.4.1	Utilización del TSP	51
4	CAPÍTULO 4.- METODOLOGÍA.....	53
4.1	Método Científico y su enfoque de Modelado de Investigación de Operaciones.....	53
4.2	Metodología aplicada	54
4.2.1	Recolección de datos relevantes	55
4.2.2	Modelado para Ubicación de Contenedores	57
4.2.3	Modelado para Creación de Rutas de Recolección	59
5	CAPÍTULO 5.- INVESTIGACIÓN DE CAMPO	61
5.1	Buenas Prácticas de la Gestión Ambiental en el Ecuador.....	61
5.1.1	Eliminación de Residuos por Carro Recolector.....	61
5.1.2	Almacenamiento de Residuos en Fundas Plásticas	62
5.1.3	Clasificación de Desechos en el Origen.....	63
5.2	Panorama Cantonal.....	64
5.2.1	Resultados del Panorama Cantonal	65
6	CAPÍTULO 6.- DESCRIPCIÓN Y DIAGNÓSTICO PRELIMINAR	68
6.1	Área de Estudio	68
6.1.1	Características Físicas y Climáticas	68
6.1.2	Actividades Económicas.....	68
6.1.3	Aspecto Geográfico y Demográfico	69
6.1.4	Generación y Recolección de RSU en la Municipalidad de Esmeraldas Actualmente	71
6.2	Diagnóstico.....	77
6.2.1	Diagrama de Causa y Efecto.....	78
7	CAPÍTULO 7.- DESARROLLO DE LA PROPUESTA	82
7.1	Ubicación de Contenedores de RSU	82
7.1.1	Información de Entrada	82
7.1.2	Formulación	86
7.1.3	Resultados.....	95
7.2	Rutas de Recolección de RSU	98

7.2.1	Información de Entrada	98
7.2.2	Características de Vehículo Recolector.....	98
7.2.3	Formulación	100
7.2.4	Resultados.....	107
8	CAPÍTULO 8.- ANÁLISIS DE LA PROPUESTA.....	110
8.1	Análisis de sensibilidad	110
8.1.1	Contenedores de 2400lt.	111
8.1.2	Contenedores de 3200lt.	111
8.2	Análisis de los Resultados	112
8.2.1	Opción 1	112
8.2.2	Opción 2	113
8.2.3	Otras consideraciones de la propuesta	114
8.3	Situación Actual vs. Propuesta.....	116
8.4	Impacto Económico	117
9	CAPÍTULO 9.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	118
9.1	Conclusiones	118
9.2	Recomendaciones.....	120
	Bibliografía	122
	ANEXOS.....	130

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Parámetros y Variables del PPM	31
Tabla 5-1 Resumen de Resultados de Investigación de Campo.....	65
Tabla 7-1Proyección de la Población del Barrio Centro 2015-2020	83
Tabla 7-2 Cantidad de Contenedores para el 2020.....	85
Tabla 7-3 Resultados de los 2 casos mostrando los puntos de servicios disponibles	96
Tabla 7-4 Resultados totales en la ubicación de 65 contenedores de 2400 lt.	96
Tabla 7-5 Resultados totales en la ubicación de 65 contenedores de 2400 lt.	97
Tabla 7-6 Resultados de las 8 Rutas obtenidas en LINGO para la Recolección de RSU con contenedores de 2.4m ³	107
Tabla 7-7 Resultados de las 7 Rutas para la Recolección de RSU con contenedores de 3.2m ³	108
Tabla 8-1 Resultados del Análisis de Sensibilidad	111
Tabla 8-2 Situación Actual vs. Propuesta	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Exportaciones, Productos Primarios e Industrializados 1993-2013 del Ecuador	16
Figura 1.2 Evolución de los Principales Componentes del Producto Interno Bruto (PIB) del Ecuador.....	16
Figura 1.3 Mapa de la Emisión de la Basura Mundial.	17
Figura 1.4 Aspectos e impactos Ambientales Asociados a las operaciones Normales de Recolección de Residuos.	19
Figura 1.5 Producción Bruta de la Provincial de Esmeraldas	20
Figura 1.5 Eliminación de Residuos en la Provincia de Esmeraldas.....	21
Figura 2.1 Flujo de Materiales en una Sociedad Tecnificada.....	25
Figura 2.2 Método de Recolección de Parada Fija o Estacionario.	29
Figura 5.1 Porcentaje de Eliminación de Residuos por Provincia	62
Figura 5.2 Hogares Almacenan la Basura en Fundas a Nivel Provincial.....	63
Figura 5.3 Clasificación de Desechos en los Hogares a Nivel Provincial	64
Figura 6.1 Mapa de Ubicación del Barrio Centro a nivel Cantonal y Provincial.....	70
Figura 6.2 Segmentación de la Población según Tipología de Concentración de Vivienda	70
Figura 6.3 Proyección de la Población Urbana en la Parroquia de Esmeraldas.....	71
Figura 6.4 Sistema de Gestión de Residuos en el Cantón de Esmeraldas	73
Figura 6.5 Residuos sacados a la acera para su recolección	74
Figura 6.6 Ruta de Recolección Transversal diaria del Barrio Centro, 2015.....	76
Figura 6.7 Rutas de Recolección Longitudinal diaria del Barrio Centro de la Ciudad, 2015.	77
Figura 6.8 Diagrama de Causa y Efecto para Análisis de Causas del Problema en Manejo de Residuos	80

Figura 7.1 Contenedores Metálicos utilizados en el Ecuador	83
Figura 7.2 Puntos candidatos de servicio.....	85
Figura 7.3 Vehículo Recolector de Residuos	98

1 CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En el mundo todas las actividades humanas crean residuos, es por eso que el manejo de los residuos sólidos es importante; sin embargo, el rápido crecimiento poblacional ha agravado los problemas relacionados a esta gestión y en especial para países en desarrollo (The World Bank, 2012). Esto se debe a que al aumentar las actividades de negocios de una nación, junto con su economía y tendencias de consumo, aumentan también la cantidad producida de residuos (The World Bank, 2012).

Toda la gestión de residuos forma parte de un servicio brindado a la población por entes administrativos municipales (Naciones Unidas, 2012). Entre las actividades de la gestión de residuos están: la generación, el almacenamiento, la recolección, el transporte y la disposición final (Tchobanoglous & Kreith, 2002). De las cuales pueden presentar problemas a la falta de servicio y la baja cobertura, relacionadas al alto gasto, falta de estrategias de recuperación, administración y tecnología.

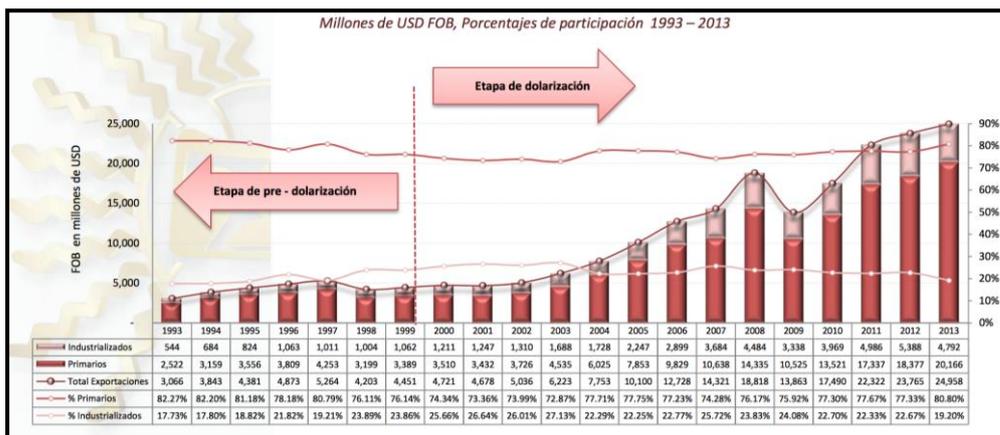
El gasto de las municipalidades en países en desarrollo en lo que conlleva el servicio de manejo de residuos esta entre el 20% y 50% de su presupuesto disponible, dentro de esta gestión, existe un rango del 30% al 60% de residuos que no se recolectan (The World Bank, 2012). Según el Banco Mundial, en estadísticas de países en desarrollo, 2012, sólo se cubre, con los servicios implementados, alrededor de un 50% de la población.

En América Latina, en el año 2008, la producción de residuos ascendió a las 275000 toneladas, de las cuales solo el 75% fue recolectado, según el segundo Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos del 2009 (Escudero, Molinares, Logreira, Sisa, &

Isaacs, 2009). Entre los países de América Latina, se tiene a Guyana y Guatemala como los mayores productores de basura (The World Bank, 2012); dentro de un pronóstico realizado por el Banco Mundial en el 2012, ambos países se encuentran en el mayor rango con un 2.50 Kg de emisiones de basura por persona al día, y de 2 a 2.49 Kg por persona, respectivamente (The World Bank, 2012). Sin embargo, juntos todos los países de América central y América del Sur, emiten mucha menos basura de lo que se produce en América del Norte, que son los mayores productores de residuos en el mundo (The World Bank, 2012).

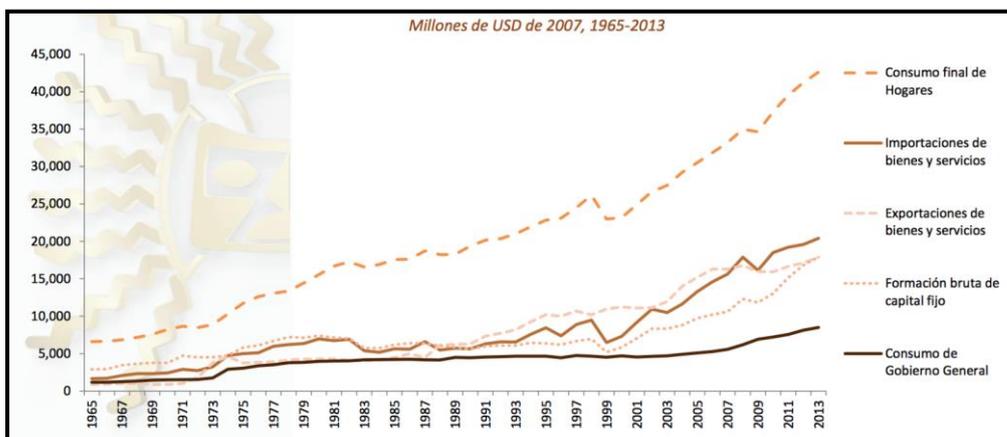
En el Ecuador ya se ha identificado el problema que yace en la necesidad de tener un manejo de residuos adecuado; sin embargo, aún no se ha logrado conseguir (Ministerio del Ambiente, 2014). En varias ocasiones se ha intentado dar solución al problema de los residuos sólidos. En fechas recientes, organizaciones como la Asociación de Municipalidades, (AME), en su modelo de gestión local descentralizado está intentando ayudar a las 7 regiones autónomas del Ecuador en todo lo que conlleva recolección y disposición final, a través asistencia técnica (Asociación de Municipalidades Ecuatorianas, 2013). De la misma forma en el 2010 el Ministerio de Medio Ambiente creó el Programa Nacional de Gestión Integral Desechos Sólidos (PNGIDS), con el objetivo de impulsar la gestión de residuos sólidos de forma general (Ministerio del Ambiente, 2014).

Como país en desarrollo el Ecuador cuenta con un ingreso mediano alto según los índices de desarrollo hasta el 2013 (The World Bank, 2013). Y como tal no cuenta con un nivel de industrialización que incurre en una generación de residuos crítica. Sin embargo, en la Figura 1.1 se puede ver como los productos industrializados exportados por el país han aumentado entre los años 2008 y 2013; y en la figura 1.2 se visualiza que el consumo final de hogares tiene una tendencia ascendente entre esos mismos años.



Fuente: (Banco Central del Ecuador, 2014)

Figura 1.1 Exportaciones, Productos Primarios e Industrializados 1993-2013 del Ecuador



Fuente: (Banco Central del Ecuador, 2014)

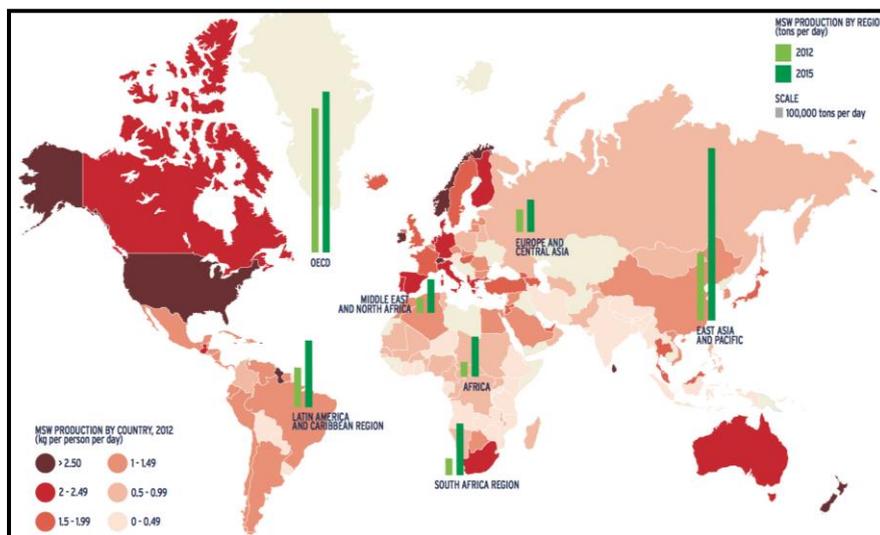
Figura 1.2 Evolución de los Principales Componentes del Producto Interno Bruto (PIB) del Ecuador

Es por esto que a nivel nacional no ha dejado de faltar la preocupación por encontrar métodos que permitan realizar una recolección de residuos eficiente (Organización Panamericana de la Salud, 2002); sin embargo, el cambio en estructura administrativa ha hecho que los principales actores en el manejo de residuos sólidos cambien, y vuelvan a

reestructurar planes o proyectos que se tenían destinados a la labor. Lo cual en algunos casos, hace que estos proyectos se prolonguen en su implementación, o cesen de existir.

Según el último censo realizado en el 2010, el Ecuador tiene 14'483499 habitantes de los cuales, solo el 77% de los hogares elimina la basura a través de carros recolectores, mientras que el restante 23% elimina la basura arrojándola a ríos, calles o terrenos baldíos, o, la incinera sin ningún control (INEC, 2010). Es así que al año se producen 4,06 millones de toneladas de residuos, con una generación per cápita de 0,74 kg (Ministerio del Ambiente, 2014).

La figura 1.3 a continuación contiene un pronóstico realizado por el Banco Mundial en el 2012, en lo que corresponde a generación de residuos sólidos municipales a nivel regional (indicadores en verde, que están en toneladas por día); y la generación de residuos municipales por país (indicadores en escala de rojos según nivel, que está en kilogramos por día).

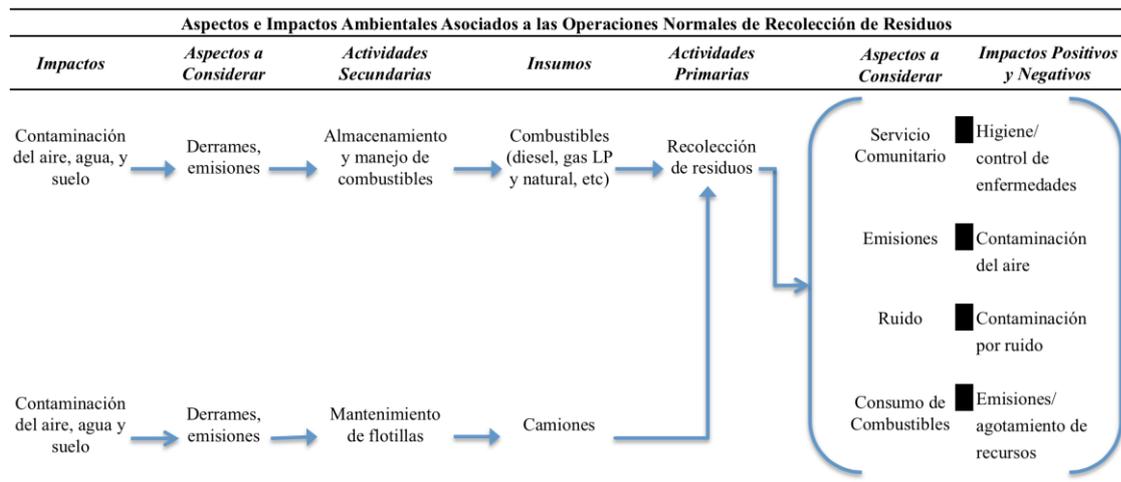


Fuente: The Economist (Banco Mundial, 2012).

Figura 1.3 Mapa de la Emisión de la Basura Mundial.

Según el Banco Mundial, (2012), en un rango de 3 años, el Ecuador producirá de 1 a 1.49 Kg por persona por día de residuos sólidos municipales. Esto muestra al Ecuador dentro de un nivel crítico, o elevado dentro Sudamérica (dónde el máximo es 2.50 Kg en la proyección); sin embargo, se puede ver en la figura 1.4, que en comparación con otros países como Estados Unidos, y Canadá, el Ecuador está en un nivel medio bajo. El Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos indica que el servicio de recolección nacional tiene una cobertura de 84.2% en el área urbana, y de un 54.1% en el área rural del país, las fracciones restantes en ambos casos pasan a formar parte de residuos que se eliminan de forma descontrolada (Ministerio del Ambiente, 2014).

El almacenamiento y recolección de residuos son actividades importantes, pues el almacenamiento adecuado impide el esparcimiento de los residuos, y la recolección permite que se pueda eliminar a los mismos (Colomer & Gallardo, 2011). Ambas actividades no realizadas de forma correcta pueden influir en el ambiente. Los riesgos de no controlar ambas operaciones se los puede ver de manera más detallada en la Figura 1.4, que muestra los diferentes aspectos de la recolección, los vectores contaminantes, y sus impactos negativos.

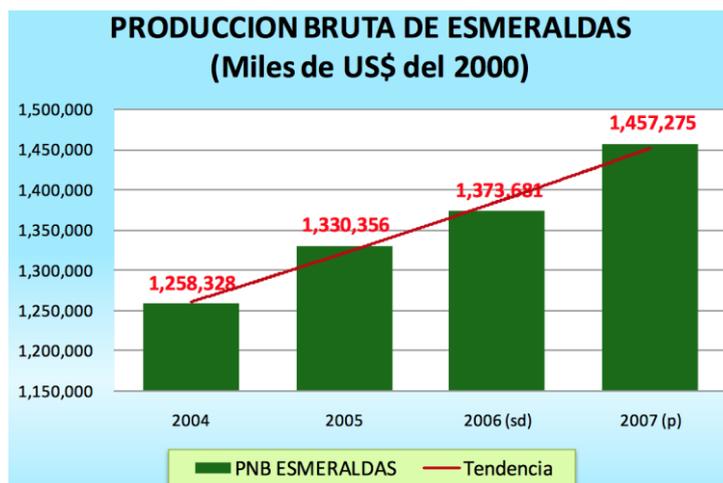


Fuente: Semarnat, 1999, Elaboración Propia

Figura 1.4 Aspectos e impactos Ambientales Asociados a las operaciones Normales de Recolección de Residuos.

1.2 Justificación

El Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos indica que el servicio de recolección nacional tiene una cobertura de 84.2% en el área urbana, y de un 54.1% en el área rural del país, las fracciones restantes en ambos casos son parte de la creación de micro basurales no controlados (Ministerio del Ambiente, 2014). A esta realidad se le puede sumar que en la recolección sólo el 24% de los 221 Municipios del Ecuador han iniciado procesos de separación de la fuente indicando un nivel de planificación en lo que corresponde a la gestión de Residuos. Sin embargo, es entre esta gran fracción del 76% se encuentra el Gobierno Autónomo Descentralizado de la Municipalidad del Cantón Esmeraldas (GADMCE).



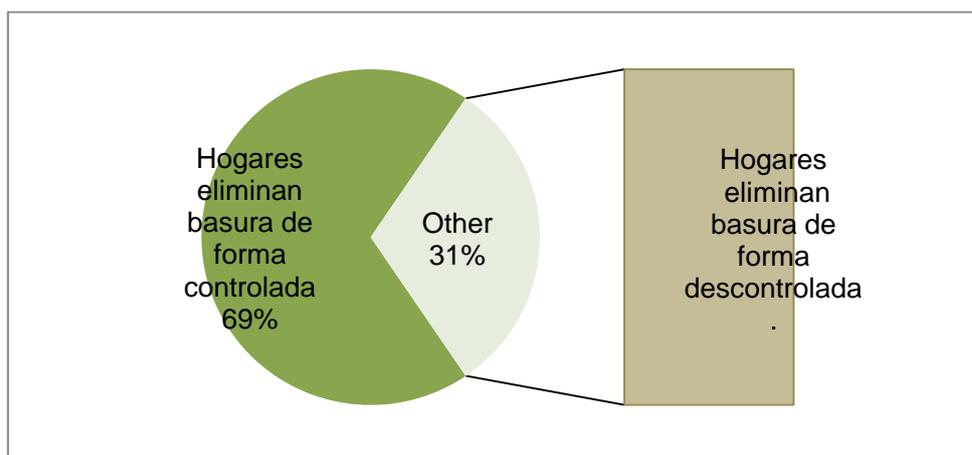
Fuente: Agenda para la Transformación Productiva Territorial de la Provincia de Esmeraldas (Ministerio de la Coordinación de la Producción, Empleo y Competitividad, 2011)
Figura 1.5 Producción Bruta de la Provincial de Esmeraldas

La provincia de Esmeraldas se encuentra dentro de la región autónoma norte del país, región la cual cuenta con 35 negocios reales que generan 269 millones en exportaciones al año, de estos 14 pertenecen solo a la provincia de Esmeraldas (Ministerio de la Coordinación de la Producción, Empleo y Competitividad, 2011). Además, como se puede ver en la figura 1.5 la producción bruta de Esmeraldas tiene una tendencia ascendente mayor a los 1450 millones de dólares en el 2007, lo cual indica que su generación de residuos debe ser correspondiente.

En el censo del 2010 se registro que, de los 159 411 hogares, el 69% elimina la basura por carro recolector, mientras que el restante 31% lo realiza de otra forma (INEC, 2010). Lo cual, si tomamos la referencia del MAE implica la formación de micro basurales en laderas, calles, e incineración descontrolada; ambas consecuencias afectando a la calidad de vida de la población, y al medio Ambiente (Ministerio del Ambiente, 2014).

Es así que el presente estudio en el manejo de residuos sólidos desarrolla una propuesta de cambio en la recolección de residuos en el barrio Centro, basándose en un

estudio de la misma. De esta forma, se considera que el estudio será beneficioso para el cantón Esmeraldas, ya que mostrará una solución logística en lo que conlleva la gestión de residuos urbanos y su recolección. Por lo cual se pretende, optimizar el uso de recursos disponibles, sugerir adquisición de otros y así organizarlos.



Fuente: INEC, 2010

Figura 1.6 Eliminación de Residuos en la Provincia de Esmeraldas.

La contenerización será como se atiende a la primera necesidad de mejorar el almacenamiento de los RSU. Primero, se toma una zona específica, un barrio de la parroquia Esmeraldas que cuente con las características donde se generen los RSU. De esta manera se puede atacar a una población objetivo estimada y determinar la cantidad contenedores que se necesitan. Adicionalmente, se plantea un modelo matemático de ubicación espacial óptima, que permita hallar la ubicación ideal de los mismos.

Para atender al segundo punto, que es el transporte de los RSU, se plantea un modelo matemático de transporte. Este modelo busca una solución para la recolección de RSU, estableciendo los recursos necesarios y suficientes que permitan un nivel de cobertura alto para la zona de servicio especificada.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Proponer un cambio en el sistema de manejo de residuos actual del centro de la Municipalidad de Esmeraldas mediante el análisis de la recolección de residuos actual, la ubicación de depósitos y su transporte.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Definir las características de la población sobre la cual se realizará el estudio y el análisis de la generación de residuos.
- Determinar el número de usuarios que habitan dentro de la zona geográfica de estudio, y la cantidad de residuos que generan.
- Determinar la cantidad de recursos necesarios a futuro, para satisfacer a los usuarios para almacenar sus residuos.
- Medir las coordenadas geográficas entre los puntos de origen y demanda, como base para el modelo p-mediana.
- Determinar la cantidad de recursos necesarios actualmente y a futuro, para recolectar los residuos.
- Medir las coordenadas geográficas de los puntos a visitar, como base para el análisis del problema del agente viajero.
- Proponer el número óptimo de contenedores de residuos sólidos en base a la generación de los mismos, y el crecimiento poblacional.
- Proponer la ubicación óptima de contenedores de residuos sólidos en el barrio Centro de la Parroquia Esmeraldas, empleando la resolución del modelo P-mediana

- Proponer nuevas rutas de recolección de residuos empleando la resolución del modelo del agente viajero.
- Proponer el tipo de los nuevos equipos (contenedores y vehículos).

2 CAPÍTULO 2.- MARCO TEÓRICO

2.1 Definición de Residuos

Los residuos son sustancias u objetos que se generan por una actividad productiva, o de consumo de la que uno se deshace por no ser más de utilidad (Elias, 2009). Los residuos pueden estar en estado líquido, sólido o gaseoso, y puede ser tratado con diferentes métodos (Jayarama, 2011).

2.1.1 Clasificación de Residuos

Por su origen existen 3 categorías muy generalizadas de los residuos sólidos: municipales, industriales y peligrosos (Colomer & Gallardo, 2011).

2.1.1.1 Definición de Residuos Sólidos Municipales o Urbanos (RSM, o RSU)

Son los residuos con los que más familiarización se tiene, puesto que se producen en el entorno directo, y tienen la tendencia, en lo que corresponde a su generación, de aumentar (Elias, 2009). “Los residuos urbanos o municipales son generados en domicilios particulares, comercios, oficinas y servicios, así como todos aquellos que no tengan la clasificación de peligrosos, y que por su naturaleza o composición puedan asimilarse a los producidos en los anteriores lugares o actividades” (Elias, 2009, p.19). Entre esta definición entran los residuos que provienen de limpieza de calles públicas, de áreas verdes, muebles, enseres, vehículos, abandonados, escombros, etc (Elias, 2009). Está compuesta comúnmente por comida, desperdicios de materia orgánica, papel, vidrio, cartones, residuos de jardines o parques (Campos, 2000).

2.2 Gestión de Residuos

2.2.1 Definición de Gestión o Manejo de Residuos

“El objetivo principal de esta actividad es minimizar los efectos negativos sobre el medio ambiente y llegar a un manejo donde se pueda tener un flujo de materiales como en una sociedad tecnificada” (Campos, 2000). Comprende las operaciones de recogida, almacenamiento, transferencia, transporte, valorización y eliminación de residuos (o disposición final), (Colomer & Gallardo, 2011). Estas actividades se pueden visualizar de mejor manera en a figura 2.1, donde se explica el flujo de materiales, y se puede ver que el manejo de residuos está en cada etapa.



Fuente: Saneamiento Ambiental (Campos, 2000)

Figura 2.1 Flujo de Materiales en una Sociedad Tecnificada.

Lo que busca un manejo de residuos es controlar la diseminación de enfermedades; evitar problemas de contaminación en el suelo, agua y aire; renovar la imagen de las ciudades; y optimizar el uso de los recursos (Jimenez, 2005).

2.2.2 Generación de Residuos Sólidos

“En la actualidad se generan o producen más residuos sólidos, por que la economía de mercado ofrece mayor cantidad de productos desechables” (Escamirosa, del Carpio, Castañeda, & Quintal, 2001). Existen varios factores que pueden afectar la generación de residuos sólidos municipales, y entre los conocidos se tiene a “la localización geográfica, la época del año, la frecuencia de recolección, las características socioeconómicas de la población, políticas de reciclaje, la reutilización de residuos y la legislación de cada país” (Campos, 2000).

2.2.3 Almacenamiento de los Residuos Sólidos

Puesto que los residuos que se generan no se pueden eliminar de inmediato se los almacena, durante un tiempo, en un depósito y lugar adecuado (Colomer & Gallardo, 2011). Es dónde los residuos esperan hasta que llega el momento en que son evacuados; un almacenamiento no adecuado puede influir de forma negativa en el manejo de residuos (INE, 2001).

2.2.4 Recolección de Residuos Sólidos

Es la operación que incluye a la toma de residuos sólidos de diversos orígenes, y el transporte de estos residuos hasta el lugar de donde vacían su carga los vehículos que recolectan; la recolección varía según el tipo de instalación, actividad, y lugar donde se

generen los residuos (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, Gestión Integral de Residuos Sólidos, 1994). Un ejemplo son los residuos municipales que se los que se recolectan en las residencias, oficinas y comercios.

2.2.4.1 Transporte de Residuos Sólidos

“Existen dos tipos de transporte de residuos, el primero es cuando el vehículo recolector realiza el viaje hasta el sitio de tratamiento, o disposición final, y el otro es cuando los RSM son llevados a sitios de transferencia, para un posterior traslado a sitios de tratamiento” (SEMARNAT, 1999). La actividad de **transferencia** se realiza ya que en algunas ocasiones hay grandes distancias entre las poblaciones y los lugares dispuestos para disposición final de RSM (SEMARNAT, 1999).

2.2.4.2 Servicio de Recolección de RSU

Mientras que las actividades asociadas con acarrear y descargar son similares para la mayoría de sistemas de recolección de residuos, el alzado de los residuos puede variar según las características, actividades, y ubicación de los puntos de generación de residuos (Tchobanoglous & Kreith, Handbook of Solid Waste Management, 2002). Los tipos de servicios según la generación de los mismos son: 1) residuos no separados en el origen, y 2) residuos separados en el origen. Y según la ubicación de los contenedores de recolección, se tiene: 1) recolección de acera “curb collection”, 2) recolección de acera mecanizada “curb mechanized collection”, 3) recolección de callejón “alley collection”, 4) recolección de sacado-recuperado “setout-setback collection”, 5) recolección de sacado “setout”.

2.2.4.2.1 Servicio de recolección de acera “curb collection service”.

“Este servicio de recolección comprende que se recojan los residuos de puerta a puerta” (Oberlin, 2011). Generalmente se lo utiliza para sectores domiciliarios. Los residuos son recogidos mediante una carreta o vehículo donde se transporta los residuos hasta la siguiente puerta, hasta completar la ruta. Así a pesar de que técnicamente este método involucra de forma independiente a cada domicilio, la basura se la suele encontrar en la acera, o portal de los mismos (Oberlin, 2011).

2.2.4.3 *Sistemas de Recolección de Residuos Sólidos*

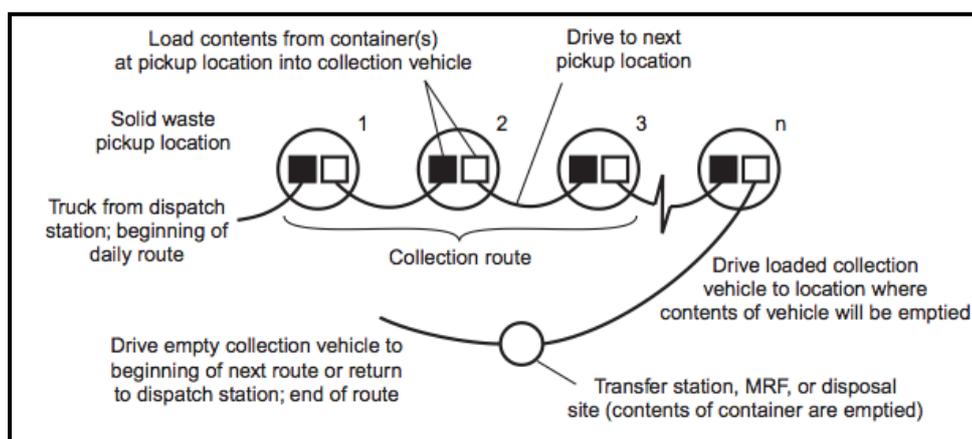
“El sistema de recolección puede ser clasificado según diferentes puntos de vista, como el modo de operación, el equipo utilizado, y los tipos de residuos recolectados” (Tchobanoglous & Kreith, Handbook of Solid Waste Management, 2002). Es así que existen: 1) sistemas de contenedor acarreado, y 2) sistemas de contenedor estacionario (Tchobanoglous & Kreith, Handbook of Solid Waste Management, 2002).

2.2.4.3.1 Sistemas de contenedor acarreado

Este sistema tiene dos modos, el convencional y el de intercambio de contenedor (Tchobanoglous & Kreith, Handbook of Solid Waste Management, 2002). El modo convencional consiste en llevar el contenedor del punto de generación al punto de transferencia o disposición final, vaciarlo, y regresarlo a su punto de origen (Tchobanoglous & Kreith, Handbook of Solid Waste Management, 2002). Luego el modo de intercambio de contenedor, el camión recolector lleva un contenedor vacío, que intercambio por el lleno; al tomarlo lo lleva al lugar de disposición final, y vuelve a repetir la misma actividad (Tchobanoglous & Kreith, Handbook of Solid Waste Management, 2002).

2.2.4.3.2 Sistema de contenedor estacionario.

“Este sistema es considerado un método comunal” (Tchobanoglous & Kreith, Handbook of Solid Waste Management, 2002). De esa forma, el vehículo recolector recorre una ruta de recolección, recogiendo los contenedores en el vehículo, de punto a punto de recolección hasta que el vehículo está lleno (Tchobanoglous & Kreith, Handbook of Solid Waste Management, 2002) . El desarrollo de este método se puede ver en la figura 2.2.



Fuente: (Tchobanoglous & Kreith, Handbook of Solid Waste Management, 2002, pp. 7-16)

Figura 2.2 Método de Recolección de Parada Fija o Estacionario.

La representación gráfica del método de recolección de parada fija de la figura 2.2, indica que el camión de recolección se moviliza al punto de recogida, vacía el contenedor en la esquina lleno de residuos dentro del vehículo, deja el contenedor en su lugar, y continúa al siguiente punto de recogida; en el gráfico se muestra una representación de n puntos de recogida. Luego al terminar de llenar el vehículo recolector se moviliza al sitio de disposición final y se vacía al contenedor del vehículo recolector.

2.3 Entrevista

“La entrevista es una forma específica de conversación en la que se genera conocimiento mediante la interacción entre un entrevistador y un entrevistado (Kvale, 2011, p.10). Es decir la entrevista se basa en el tema que elija indagar el entrevistador, y el conocimiento es generado a través de las opiniones y experiencias que da a conocer el entrevistado. Esto significa que el entrevistador debe tener el criterio de elegir a la persona que tenga el conocimiento específico del tema a tratar, sobre todo en una investigación (Kvale, 2011).

2.4 Diagrama de Causa y Efecto

Es una herramienta que muestra la relación entre una característica de calidad y sus factores (GYGI, 2012); este permite organizar ideas, e identificar las causas principales de un fenómeno o problema clasificándolas. Generalmente, el diagrama asume la forma de espina de pez de donde toma su nombre alternativo, “diagrama de espina de pescado” (Kume, 1992) La consulta a varias fuentes de información, personas involucradas permite que se realice un diagrama completo (Kume, 1992).

2.5 Problema de P-mediana “P-median” (PPM)

El problema *p*-median, o *p*-mediana en español, “se encarga de localizar *p* instalaciones para minimizar la demanda en peso promedio (o la distancia) entre nodos de demanda y las más cercanas instalaciones seleccionadas” (Laporte, Nickel, & Saldhana da Gama, 2015). Se lo considera parte de los problemas de localización NP-duro en un grafo general, sin embargo su resolución puede ser obtenida con una gran cantidad de heurísticas (Laporte,

Nickel, & Saldhana da Gama, 2015). Que sea NP-duro significa que es un problema donde contribuyen una gran cantidad de variables, donde cada una puede tener N valores distintos, el número de combinaciones de la mismas es exponencial, lo cual permite que se de gran cantidad de soluciones óptimas (Gómez & Maldonado, 2014).

Según Drezner & Hamacher, 2004, y Laporte et al., 2015, el problema de p-mediana formulado como un problema de programación entera se muestra a continuación:

Parámetros	
i	índice de áreas o nodos de demanda.
p	número de instalaciones a ser ubicadas.
j	índice de lugares potenciales, o candidatos para ubicar instalaciones
w_i	la cantidad de demanda en el área o nodo i.
d_{ij}	distancia más corta entre la demanda i y el lugar de la instalación j.
Variables	
Y_{ij}	1, si la demanda en i es asignada a una instalación en j. 0, de caso contrario.
X_{jj}	1, si una instalación es ubicada en un lugar j 0, de caso contrario.

Fuente: (Laporte, Nickel, & Saldhana da Gama, 2015)

Tabla 2-1 Parámetros y Variables del PPM

$$\text{Minimizar: } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_i d_{ij} Y_{ij} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^m Y_{ij} = 1, \quad i = 1 \quad (2)$$

$$X_j - Y_{ij} \geq 0, \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, m; \quad i \neq j \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^m X_{jj} = p \quad (4)$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad X_{jj} \in \{0, 1\} \quad (5)$$

Donde (1) minimiza la distancia (costo), por el peso de la cantidad de demanda, total entre el punto de demanda, y los puntos donde irá ubicada la instalación de servicio. Restricciones (2) aseguran que el punto de demanda sea asignado al punto de servicio más cercano solamente. Restricciones (3) aseguran que el punto de demanda sea asignado a un punto de servicio que haya sido abierto. Restricciones (4) aseguran que el número de puntos de servicio abierto sea solo p . Y la restricción (5) impone las variables binarias (Drezner & Hamacher, 2004).

El problema p -mediana es un problema de localización muy popular, pues hay una gran cantidad de situaciones que pueden ser formuladas a través de este problema (Drezner & Hamacher, 2004). Sin embargo, es importante desarrollar algoritmos que permitan resolverlo de forma efectiva; por ser un problema NP-duro, la mayoría de las investigaciones algorítmicas son de procedimientos de solución heurísticos (Drezner & Hamacher, 2004).

2.6 Problema del Agente Viajero “Traveling Salesman Problem” TSP

El Problema del Agente Viajero indica que un vendedor debe encontrar un camino que empiece en su ubicación de origen, visite a un grupo de ciudades previamente determinadas, y regrese a su ubicación original (Gutin & Punnen, 2004); de tal forma que la distancia viajada sea mínima, y cada ciudad sea visitada al menos una vez (Gutin & Punnen,

2004). Por lo tanto, el camino es el orden en que las ciudades serán visitadas, y ese orden es llamado, circuito o tour (Applegate, Bixby, Chvátal, & Cook, 2006).

El Agente Viajero es un problema complejo a lo que refiere en planificación de rutas, ya que en general representa un NP duro de optimización combinatoria (Gutin & Punnen, 2004). Esto significa que es un problema donde contribuyen varias variables, donde cada una puede tener N valores distintos, y el número de combinaciones de la mismas es exponencial, lo cual permite que se de gran cantidad de soluciones óptimas (Gómez & Maldonado, 2014). En lo que corresponde logística urbana el problema del agente viajero engloba dentro de la clasificación de cobertura por nodos.

2.6.1 Problema Asimétrico del Agente Viajero “Asymmetric Salesman Problem” (ATSP)

El ATSP es una variación del TSP, en cuanto a que el costo de viajar entre dos ciudades (ciudad 1 y ciudad 2) depende si el agente va de 1 a 2, o de 2 a 1, ya que ambos costos son diferentes (Applegate, Bixby, Chvátal, & Cook, 2006). Es así que la formulación de un ATSP es igual a la de un TSP si se deja a $G = (V, A)$ ser un grafo direccionado y F ser la familia de tours en G . Para cada arco (i, j) en A un costo d_{ij} está prescrito. Luego el TSP busca encontrar un tour en G , que la suma de costos de cada arco sea tan pequeño como sea posible (Gutin & Punnen, 2004). Se deja que el grupo de nodos (clientes, o ciudades) $V = \{1, 2, \dots, n\}$; entonces la matriz $D = (d_{ij})_{n \times n}$ es llamada la matriz de costos, también referida como la matriz de distancias, o de peso, donde la entrada (i, j) ésima d_{ij} corresponde al costo del arco que une al nodo i con el nodo j en G , y c_{ji} al costo del arco que une al nodo j con el nodo i en G (Gutin & Punnen, 2004). Entonces se puede dejar a una

variable binaria $Y_{ij}, (i, j) \in A$, sea de decisión binaria, igual a 1 si arco (i, j) es parte de la solución, y 0 si no (Gutin & Punnen, 2004). De esta forma, asumiendo que la inicialización del tour es en el nodo 1, el ATSP puede ser formulado así:

$$\text{Minimizar: } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} Y_{ij} \quad (6)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n Y_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, n. \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n Y_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, n. \quad (8)$$

$$(9)$$

$$Y_{ij} = 0, \text{ o } Y_{ij} = 1. \text{ Arcos } (i, j) \in A$$

Donde (6) minimiza la distancia (costo) de visitar a cada punto. (7) y (8) son llamadas restricciones de nivel, y se aseguran de que el agente tenga una sola entrada y una sola salida a cada nodo. (9) es una restricción de no negatividad, ya que Y_{ij} es una variable binaria de decisión.

Sin embargo, esta formulación permite la creación de sub-tours en G . Es así que a esta formulación se le tiene que agregar restricciones que eliminen los sub-tours.

2.6.1.1 Restricción MTZ

La restricción MTZ (10) tiene su nombre por sus creadores, Miller, Tucker y Zemlin, en 1960, quienes mostraron que usando $(n-1)^2$ restricciones adicionales y $(n-1)$ variables adicionales se pueden eliminar los sub-tours (Gutin & Punnen, 2004). Esta restricción está basada en considerar que un tour es una secuencia de ciudades (Chen, Batson, & Dang, 2011). Si definimos a u_i como la secuencia de números de ciudades j en un tour, tenemos la siguiente restricción:

$$u_i - u_j \leq n(1 - Y_{ij}) - 1, \quad (i, j) \in A, i \neq j, j \neq i, j \neq 1 \quad (10)$$

Esto quiere decir que si una solución factible, de todas las restricciones, tiene más que un sub-tour, entonces al menos 1 de estos no tendrá al nodo 1, y a lo largo de este tour los valores de u_i incrementarían al infinito. Este argumento también implica que el único valor factible de u_i sea la posición del nodo i en el tour (Chen, Batson, & Dang, 2011).

2.7 Google Maps

Esta herramienta dinámica fue desarrollada por Lars y Jens Rasmussen en el 2004, y luego adquirida por Google. Google Maps es la solución de mapeo más popular del mundo y fue introducida en un blog de Google en el 2005 de forma pública. Esta aplicación revolucionó la forma en que los mapas trabajan en las páginas web, ya que le permite al usuario arrastrar el mapa para navegarlo. A lo que se navega en los mapas esta aplicación manda información acerca de las coordenadas y niveles de zoom del mapa, para que le regrese una imagen al usuario de las mismas. Las coordenadas utilizadas por Google Maps

son las “World Geodetic System 84 (WGS 84)”, siendo el mismo sistema que utiliza GPS, *Global Positioning System*. Las coordenadas son expresadas usando longitud y latitud, y se pueden pensar como el valor de “x” y “y” en el plano.

2.8 Waze

“Waze es todo acerca de contribuir al bien común allá afuera en el camino” dice en su página web la aplicación, pues es una comunidad formada para el conductor (Waze, 2015). Esta aplicación conecta conductores, ayudando a las personas a crear comunidades de conducción locales que funcionan para mejorar la calidad de conducción de ellos en su vida diaria (Waze, 2015). Esta aplicación funciona después de ingresar la dirección de destino, y los usuarios siguen la ruta creada (Waze, 2015). También le permite al usuario un rol más activo ya que puede contribuir con reportes de las vías, por ejemplo: si hay accidentes, desvíos de la policía, o cualquier otro peligro en el camino (Waze, 2015). Además cuenta con un grupo de editores de mapas activo que se aseguran que los datos estén disponibles (Waze, 2015).

2.9 Coordenadas geográficas

“El sistema de coordenadas geográficas constituyen un clásico sistema de referencia en tres dimensiones: un punto cualquiera de la superficie terrestre queda posicionado respecto a tres ejes perpendiculares, que a su vez, dan lugar a tres planos ortogonales entre sí” (Melendo, Arbonés, Cancero, Mazar, & Lampre, 2002) . Es decir calcular el valor lineal del punto, es establecer el valor angular del punto : longitud respecto al meridiano de Greenwich (considerado como el origen) y latitud respecto al Ecuador (paralelo al origen)

(Melendo, Arbonés, Cancer, Mazar, & Lampre, 2002). Estas coordenadas son expresadas en valores angulares, como grados, minutos y segundos (Melendo, Arbonés, Cancer, Mazar, & Lampre, 2002).

2.10 Coordenadas cartesianas

“El sistema de coordenadas cartesianas consiste en dos ejes perpendiculares, el YY siguiendo la dirección de la meridiana, y el XX siguiendo la dirección perpendicular de ella” (García, Rosique, & Segado, 1994). Ambas coordenadas se cortan en un punto llamado punto de origen, donde $X=0$, y $Y=0$ (García, Rosique, & Segado, 1994). Las coordenadas X y Y forman un plano XY, y este está dividido en cuatro cuadrantes que se enumeran empezando por el cuadrante superior derecho, en el sentido de las manecillas del reloj (García, Rosique, & Segado, 1994). En este plano los valores de X son positivos a la derecha del origen, y Y en la parte superior del origen; ambas coordenadas toman valores negativos, X a lado izquierdo del origen, y Y en la parte inferior del origen (García, Rosique, & Segado, 1994).

2.11 Conglomerado k-media “Cluster k-means”

Los conglomerados son un método que permite organizar un grupo de datos en base a un criterio de asociación (Zhang, 2008). "El conglomerado k-media es un algoritmo no jerárquico, que divide a N items en K grupos categóricos" (Zhang, 2008). Los datos se reparten con respecto a sus variables de clasificación, formando subgrupos; para que esta clasificación se realice se necesita establecer previamente el número de subgrupos, k, que se requieren.

2.12 “Variable Neighborhood Search” (VNS) o Búsqueda Variable del Vecindario

EL VSN es una heurística, y una técnica global de optimización que maneja una búsqueda local (Brownlee, 2011). La estrategia está construida en 3 principios: (1) un mínimo local de una estructura de vecindario no es el mínimo de otro vecindario. (2) un mínimo global es un mínimo local para todos los posibles vecindarios (Brownlee, 2011). (3) los mínimos locales son relativamente cercanos al mínimo global para cualquier caso del problema (Brownlee, 2011). A continuación los pasos de “Reduced Variable Neighborhood Search” (RVNS), (Hansen & Mladenovic, 2005).

Inicialización

Seleccione un grupo de estructuras vecindario N_k , para $k=1, \dots, k_{\max}$, que serán usadas en la búsqueda; encuentre una solución inicial x ; escoja un condición de detención;

Repita la siguiente secuencia hasta parar, y la condición sea cumplida:

- 1) Establecer $k \leftarrow 1$;
- 2) Repetir los siguientes pasos hasta que $k = k_{\max}$:
- 3) Sacudiendo. Generar un punto x' de forma aleatoria del k -ésimo vecindario de x (x' pertenece a $N_k(x)$);
- 4) Mover o no. Si este punto es mejor que el anterior, muevase ahí ($x \leftarrow x'$), y continúe la búsqueda $N_1(k \leftarrow 1)$; de otra forma, establezca al grupo $k \leftarrow k+1$;

2.13 Lingo

Es una herramienta comprensiva diseñada para construir y resolver modelos de optimización matemática, de forma eficiente (LINDO, 2015). Esta herramienta provee un

paquete integrado que incluye un lenguaje que permite expresar modelos de optimización, y un ambiente excepcional para construirlos y editarlos (LINDO, 2015). Además cuenta con “solvers” previamente construidos capaces de resolver de forma eficaz la mayor cantidad de modelos de optimización (LINDO, 2015). Para los problemas de Programación Entera Mixta esta herramienta tiene heurísticas avanzadas y estrategias de pre-resolución (LINDO, 2015). Entre las principales ventajas de LINGO, sacadas del manual del usuario elaborado por LINDO, se tienen:

- Utiliza lenguaje algebraico de modelado
- Tiene opciones convenientes para datos.
- Brinda modelado interactivo.
- Brinda extensa documentación y ayuda.
- Provee “solvers” poderosos y herramientas adicionales.

2.14 Definiciones Ambientales

2.14.1 Buenas prácticas ambientales

Es el conjunto de medidas preventivas y correctoras que permiten implantar hábitos para evitar la reducción de recursos energéticos, y el consumo de agua, así como minimizar la generación de residuos y las emisiones atmosféricas (Menéndez, Fernández, Vázquez, Rodríguez, & Espeso, 2009). Estas tienen como objetivo racionalizar los recursos naturales (Menéndez, Fernández, Vázquez, Rodríguez, & Espeso, 2009).

2.14.2 Vectores ambientales

Los vectores ambientales son aire, agua y suelo, y son los que realizan la función receptora del entorno (Gómez & Gómez, 2007).

2.14.3 Vectores contaminantes o impactos ambientales

“Los diversos impactos ambientales, es decir los posibles efectos negativos provocados sobre el medio ocasionados por el flujo de materias primas, energías o emisiones,” (Castells, 2000), son considerados vectores contaminantes. Entre estos se tiene a los residuos, al ruido y olores (Castells, 2000). Los residuos ocasionan un gran impacto en el ambiente sobre todo lo que corresponde a las actividades de almacenamiento y transporte (Castells, 2000).

2.14.4 Efluentes

“Toda actividad en fase de funcionamiento produce bienes deseados, subproductos y efluentes: estos últimos en forma de emisiones (gases), vertidos (líquidos), y residuos (sólidos)” (Gómez & Gómez, 2007).

2.14.5 Lixiviado

Lixiviado es agua contaminada por componentes de residuos, cuando se infiltra a través de un sitio de disposición de los mismos (Manahan, 2007). Algunos componentes de los lixiviados son altamente dañinos, por lo que debe prevenir la formación de ellos (Manahan, 2007).

2.14.6 Emisiones de gases

“Cuando hay residuos biodegradables, se producen gases metano y dióxido de carbono por degradación anaeróbica en los vertederos” (Manahan, 2007). Esto quiere decir que la emisiones se da en la descomposición de residuos orgánicos.

3 CAPÍTULO 3.- REVISIÓN LITERARIA

El enfoque de esta sección es analizar la literatura existente que ha contribuido al manejo de residuos sólidos. De esta forma, el espectro de esta revisión abarca estudios donde se aplican herramientas, modelos, y buenas prácticas en el manejo de residuos sólidos urbanos; se realizará un mayor acercamiento en las actividades de recolección y transporte.

3.1 Modelos en Gestión de RSU

En los 70s se dieron los primeros pasos para un manejo de residuos adecuado (Chang, Pires, & Martinho, 2011). Ya para los 80 hubo la influencia de las computadoras lo cual ayudó a agilizar la construcción de los diferentes modelos, y la utilización de herramientas (Chang, Pires, & Martinho, 2011). Y de los 90s a años posteriores nos cuenta Chang et al., (2011), en su revisión, que es cuando prácticas como el reciclaje y el impacto ambiental del manejo de residuos entran en juego dentro esta gestión.

La clasificación y categorización de modelos ha permitido medir y evaluar factores importantes de los sistemas de manejo de residuos (Stypka, 2011). Varios autores han clasificado los modelos según el enfoque de los mismos y según la actividad de aplicación y resolución. MacDonald, (1996) identificó, en su revisión de varios trabajos, a 9 tipos de modelos, basándose en varias áreas de aplicación en lo que respecta al manejo de residuos sólidos, estos son: (1) Predicción de generación de residuos. (2) Selección de recursos de sitio. (3) Expansión de capacidad de recursos. (4) Operación de los recursos. (5) Enrutamiento de vehículos. (6) Asignación de mano de obra. (7) Operación de sistemas

totales. (8) Previsión del sistema. (9) Flujo de Basura. Esta división de modelos se dio en base a un estudio de 15 casos, donde Macdonald determinaba el enfoque de cada uno de los modelos revisados. Como se puede ver no pertenecen en si a una clasificación sino a varias categorías según el área y actividad del modelo correspondiente (MacDonald, 1996). La resolución de estos modelos podía variar según lo que se quisiera lograr, en su mayoría de forma cuantitativa (MacDonald, 1996).

Sin embargo, posteriormente Stypka, (2011), después de revisar las categorías de MacDonald, (1996) pudo clasificar a los modelos de manejo de residuos sólidos Municipales (RSM) en tres tipos: modelos blancos, modelos grises, y modelos verdes (Stypka, 2011). Los modelos blancos son los modelos matemáticos con datos determinísticos, para su resolución se usa programación lineal, programación entera mixta, y programación dinámica (Stypka, 2011). Los modelos grises, son los modelos de simulación por computadora, y estos modelos aceptan asunciones y no son del todo exactos, por lo general se resuelve con números grises, o probabilidad (Stypka, 2011). Y los modelos verdes tratan de resolver el problema de manejo de residuos sólidos implementando al desarrollo sostenible como el principal objetivo del análisis; este tipo de modelos se resuelven con análisis de ciclo de vida, sistemas de soporte de decisión, y modelos que utilicen un análisis multi-criterio (Stypka, 2011).

Chang et al, (2011) también da a conocer en su revisión de análisis de sistemas, 14 modelos de ingeniería de sistemas y herramientas de evaluación de sistemas. Estos modelos son en base a la construcción de los mismos, como (1) modelos de ingeniería de sistemas incluyendo análisis de costo-beneficio (*Cost-Benefit Analysis, CBA*), modelo de pronóstico (*Forecast Model, FM*), modelo de simulación (*Simulation Model, SM*), modelo de optimización (*Optimization Model, OM*), y sistema de modelamiento integrado (*Integrated Model System,*

IMS). También como (2) plataformas de análisis de sistemas, incluyendo sistemas de manejo de información (*Management Information System, MIS*), sistema de apoyo de decisiones (*Decision Support System, DSS*), sistema de expertos (*Expert System, ES*), finalmente herramientas de evaluación de sistemas: desarrollo de escenarios, análisis de flujo de materiales, evaluación de ciclo de vida, o inventario de ciclo de vida (*Life Cycle Assessment, LCA*), evaluación de riesgo, evaluación de impacto ambiental, evaluación ambiental estratégica, evaluación socioeconómica, y evaluación sostenible. Los cuales podemos ver, en algunos casos, se repiten con los de Stypka, (2011) .

Estos modelos o herramientas tienen limitaciones individuales, y ninguno de ellos, a excepción del LCA, ha considerado la visión completa de todo el ciclo de manejo de residuos, desde la prevención de residuos hasta su disposición final (Chang, Pires, & Martinho, 2011). Esto, según cuentan los autores, es debido al consumo de tiempo, y la cantidad de datos necesarios que cada uno de estos modelos y herramientas utiliza. De forma, que se enfoca en las actividades que más se pueden captar. Como es el caso específico de la construcción de modelos de optimización, para la creación de rutas de recolección (Chang, Pires, & Martinho, 2011).

3.2 Generación RSU

Abduli & Nasrabadi, (2007), realizaron un estudio que consistió en diagnosticar la situación del manejo de residuos municipales en la provincia de Kurdistán, Irán. Los autores realizaron un cuestionario a la población, el cual fue complementado con entrevistas a empleados, y departamentos relevantes dentro del ente encargado (Abduli & Nasrabadi, 2007). Adicionalmente, se realizó un muestreo de la basura por 10 días y así poder

determinar su composición (Abduli & Nasrabadi, 2007). Se pudo determinar, la cantidad de basura generada, el tipo de basura, la cobertura del servicio de recolección, los agentes involucrados, las ciudades que más producen, y se pudo hacer recomendaciones con respecto al manejo de residuos (Abduli & Nasrabadi, 2007). Entre estas recomendaciones esta la minimización de residuos, la medición cuantitativa y cualitativa de la generación de residuos, el reciclaje, el monitoreo, etc (Abduli & Nasrabadi, 2007).

En el estudio “Evaluación del sistema de contenerización de Residuos Sólidos Urbanos en el Cantón Rumiñahui” los autores realizan mediante revisión bibliografía una investigación de residuos sólidos (Duque & Tul, 2012); para luego poder evaluar el sistema de actual de recolección Rumiñahui (Duque & Tul, 2012). Se utilizó resultados de encuestas y observación en un medio controlado para determinar el estado del sistema, y poder realizar recomendaciones de mejora (Duque & Tul, 2012).

Freire, (2015), presenta “Proyecto para Implementación de un Sistema de Descarga y Recolección de Basura para un edificio de Departamentos en la Ciudad de Guayaquil” (Guerra, 2015). El proyecto desarrolla un sistema de descarga y recolección de basura para un edificio de departamentos. En este estudio Freire calcula con la generación de residuos per cápita, y la cantidad de personas que habitan el edificio y la densidad de los residuos, la cantidad de contenedores que se necesitan para almacenar la basura por 3 días (Guerra, 2015). Adicionalmente, diseña los ductos de transferencia y valora la propuesta.

3.3 Localización de Contenedores con “P-median”

En el estudio de Vijay et al., (2008), se determina la ubicación de depósitos de residuos en un área en India. Para esta actividad los autores utilizan el modelo *p-median* dentro de

una plataforma de Sistema de Información Geográfica (Vijay, Gautam, Kalamdhad, Gupta, & Devotta, 2008). Además, el estudio utilizó información actualizada de vías, y el mapa del área del caso, que se planteó como una primera fase; ya en la segunda fase con ayuda del sistema computacional, se identificó el lugar óptimo de los depósitos con un criterio de la distancia más corta según parámetros (Vijay, Gautam, Kalamdhad, Gupta, & Devotta, 2008).

Chalkias y Lasaridi, (2009), en “A GIS based model for the optimisation of municipal solid waste collection: the case of study of Nikea, Athens, Greece”, desarrollaron un método para optimizar el sistema de recolección en Nikea, Grecia; primeramente, enfocándose en información espacial y geográfica, realizaron la reubicación de los contenedores de RSU existentes, tomando criterios de capacidad y acceso de vías, con la ayuda de un análisis en un programa de Sistema de Información Geográfico (Chalkias & Lasaridi, 2009). Mostrando los beneficios en función del servicio (Chalkias & Lasaridi, 2009).

Zamorano , et al., 2009, realizan un estudio en Churriana de la Vega, Granada , España, y con la ayuda de Sistemas de Información Geográfica pudieron optimizar la gran cantidad de contenedores de reciclaje de residuos (Zamorano, Molero, Grindlay, Rodríguez, Hurtado, & Calvo, 2009). Se realizó un plan de recolección que contaba con: 1) tipo de contenedores utilizados para almacenar residuos sólidos; 2) vehículos para recolectar (Zamorano, Molero, Grindlay, Rodríguez, Hurtado, & Calvo, 2009). Se realizó una descripción del área de estudio, del sistema existente (Zamorano, Molero, Grindlay, Rodríguez, Hurtado, & Calvo, 2009). Luego se utilizó a ArcGis como herramienta para acceder a la información geográfica (Zamorano, Molero, Grindlay, Rodríguez, Hurtado, & Calvo, 2009). De esta forma se obtuvo ubicación de contenedores, y distancias (Zamorano, Molero, Grindlay, Rodríguez, Hurtado, & Calvo, 2009). Los contenedores existentes habían sido determinados en base a

criterios de servicio, para accesibilidad de recolección de los mismos, y disponibilidad de los usuarios (Zamorano, Molero, Grindlay, Rodríguez, Hurtado, & Calvo, 2009). Por lo que con los resultados nuevos se pudo obtener mejor servicio y una reducción de costos (Zamorano, Molero, Grindlay, Rodríguez, Hurtado, & Calvo, 2009).

Aremu et al., (2012), presenta en su estudio el uso de herramientas y modelos matemáticos para determinar la ubicación y el número de depósitos de residuos en un vecindario en Nigeria, país en desarrollo. Entre las herramientas de estos autores, se encuentra el proceso de análisis jerárquico para toma de decisiones; lo cual le permite integrar en la resolución el impacto ambiental, económico y cultural para su resolución (Aremu, Sule, Downs, & Mihercic, 2012). Y el modelo del problema de optimización *P-median*, para ubicar los depósitos.

3.3.1 “P-median” y Conglomerados

Figueiredo et al., (2013), realizan un estudio para ubicar terminales en Brasil. El caso divide la resolución del problema en 2 fases por el tamaño del mismo. Esto se debe a que problemas como el *p-median* cuenta con una gran número de variables, en este caso alrededor de 300 millones (Figueiredo, O'Kelly, & Pizzolato, 2013). Para ajustar el tamaño del problema se propone una racionalización geográfica, creando conglomerados o “clusters” (Figueiredo, O'Kelly, & Pizzolato, 2013). Este acercamiento se pudo dar, ya que el “*p-median*” puede ser interpretado como un modelo de conglomerados, en el que se trata de dividir el espacio en p grupos (Figueiredo, O'Kelly, & Pizzolato, 2013). Entonces en la primera fase de los 135 aeropuertos se escoge 33, y de esos solo 12 ciudades son nominadas

(Figueiredo, O'Kelly, & Pizzolato, 2013). El caso usa a AIMMS 3.9 como software de resolución (Figueiredo, O'Kelly, & Pizzolato, 2013).

Kaveh et al. (2010), propone un algoritmo para la solución del problema p-median capacitado, debido a la gran cantidad de tiempo que se requiere para realizarlo. El método utiliza el "K-means" algoritmo de conglomerados, y el algoritmo FNS (Fixed Neighborhood Search algorithm), logrando una solución óptima (Kaveh, Sabzevari, & Sahraeian, 2010). Es así que determinando primero el número de los k conglomerados el problema se segmenta, y luego se procede a resolver un problema de ubicación, para cada uno de los k conglomerados; el FNS mejora la calidad de soluciones obtenidas (Kaveh, Sabzevari, & Sahraeian, 2010).

3.4 Recolección de RSU con "TSP"

Beltrami & Bodin, (1972), en su estudio, realizan una revisión de problemas en lo que respecta al diseño de rutas para la recolección de residuos municipales en la ciudad de New York. Aquí los problemas están divididos en discretos, o problemas de rutas con nodos, y los continuos, o problemas de ramificación. Para la primera clase de problemas el objetivo es combinar los nodos en rutas para minimizar el número de vehículos necesarios para recolectar el residuo, sujetos a capacidad de vehículos, y restricciones de las cuadrillas. En este tipo de problemas se encuentra el "Traveling Salesman Problem". Para los problemas de ramificación, el objetivo es minimizar el tiempo total que los vehículos necesitan para ir a cada una de las ramas en la red, sujeto a restricciones de capacidad de los vehículos, y restricciones de tiempo de las cuadrillas.

Ayala y Gonzáles, (2001), aplicaron en su estudio, en una zona de Santa Fe de Bogotá, el ARV (Arc Routing Problem) para Microruteo. El problema de asignación de rutas que busca una secuencia de recolección para la flota de vehículos, es una variante del problema del Cartero Chino (Ayala & Gonzáles, 2001); todos los arcos de la red mixta deben ser recorridos. Por lo tanto se determina la información de entrada, se realiza la formulación matemática, una construcción del itinerario, y finalmente una comparación de resultados con los actuales y el realizado con sistema de información geográfica (Ayala & Gonzáles, 2001). Los autores mencionan que de haber tenido contenedores para recolectar, hubiesen modelado como un “Traveling Salesman Problem” (Ayala & Gonzáles, 2001).

Karadimas, et al., (2005), realizan un estudio en un suburbio de Atenas, Grecia donde deben crear rutas, para los vehículos recolectores de residuos. Debido a que los vehículos recolectores pueden recoger una capacidad específica limitada de residuos, el área es fragmentada en sub-programas de puntos de carga, los cuales producen residuos en menor o igual cantidad que la del vehículo recolector. Este problema es modelado como un “Traveling Salesman Problem”; los autores lo plantean como “dado un grupo de n puntos de carga, y el costo de transporte entre cada uno de los puntos de carga, el TSP puede estar planteado como el problema de encontrar el tour cerrado de mínimo costo que visite cada uno de los puntos de carga una vez” (Karadimas, Kouzas, Anagnostopoulos, & Loumos, 2005). En este caso el problema es resuelto con un Algoritmo *Ant Colony Optimization* (ACO), y se desarrolla el procedimiento basado en computadora implementado en un ambiente de lenguaje C++ (Karadimas, Kouzas, Anagnostopoulos, & Loumos, 2005) .

Bonomo y et. al , (2009) en su estudio de “Optimización de la Recolección de Residuos de la Zona Sur de la Ciudad de Buenos Aires” habla de la aplicación de herramientas de

programación lineal con la idea de minimizar la distancia recorrida por los camiones recolectores de Residuos. Para este caso, ellos modelan el *Traveling Salesman Problem*, y utilizan datos provistos por un sistema de información geográfica y el municipio a cargo (Bonomo, Durán, Larumbe, & Marengo, 2009); para el desarrollo de un procedimiento por computadora, utilizan el software Concorde que resuelve la instancia simétrica del problema del agente viajero (Bonomo, Durán, Larumbe, & Marengo, 2009). Se obtienen mejoras representativas del 43% en lo que compete a distancias recorridas (Bonomo, Durán, Larumbe, & Marengo, 2009).

Adicionalmente, Chalkias y Lasaridi, (2009), en “A GIS based model for the optimisation of municipal solid waste collection: the case of study of Nikea, Athens, Greece”, el método de mejora del sistema de recolección también realizó una mejora en transporte de RSU, y para esto utilizan el problema del agente viajero asimétrico (ATSP) y una herramienta de información geográfica (GIS) para desarrollarlo (Chalkias & Lasaridi, 2009). De tal forma, que los beneficios de tanto como la reubicación de contenedores como la optimización de rutas de recolección se pudieron ver en función de la reducción en distancia y emisiones de CO₂ (Chalkias & Lasaridi, 2009).

El estudio “Municipal Solid Waste Collection Routes Optimized with arc GIS network analyst”, de Bhambulkar, (2011), habla de cómo se realizó una simulación de escenarios con un software de sistemas de información geográfica ArcGIS Network Analyst, para un caso de recolección de residuos en la municipalidad Nagpur, India (Bhambulkar, 2011). El software permite al usuario resolver problemas de transporte, mediante el modelado de condiciones reales, como restricciones de giros en rutas, límites de velocidad, restricciones de altura, y condiciones de tráfico a diferentes tiempos en el día. Este Software utiliza el algoritmo de

Dijkstra's para resolver el problema de rutas (Bhambulkar, 2011). Este puede ser generado por medio de dos criterios, el de distancia y el de tiempo (Bhambulkar, 2011). En la distancia solo se considera la ubicación de los residuos a recoger y no el volumen del tráfico (Bhambulkar, 2011). "ArcGIS Network Analyst" puede buscar la distancia más corta dentro de una red determinada. En el caso dado se encontró la ruta optima, de menor tiempo y menor costo comparada con la existente; el autor logró reducir el costo en un 14% por mes (Bhambulkar, 2011).

Arias, 2012 en su estudio "Optimización Aplicada a un Problema de Recolección de Residuos Industriales" utiliza el *Traveling Salesman Problem*, con una heurística de resolución de la Búsqueda Tabú. Este problema considera la capacidad limitada de los vehículos y demandas constantes de cada nodo de generación, convirtiendo el problema en un problema de ruteo de vehículos capacitado (Arias, 2012). Se basa en las condiciones de la investigación para adaptar técnicas de resolución antes de aplicarlas (Arias, 2012).

3.4.1 Utilización del TSP

Basel y Willemain, (2001), indican que el problema del *Traveling Salesman Problem* es una instancia difícil de la optimización combinatoria. Ellos generaron y analizaron tours de forma aleatoria y descubrieron regularidades estadísticas; sin embargo, consiguieron resolverlo y recomiendan utilizar el algoritmo *branch and bound* como una heurística de resolución (Basel & Willemain, 2001).

Estrada et al., (2003), dice en su estudio que el cálculo de rutas comprende 6 problemas básicos: el problema del viajante de comercio, o TSP (*Traveling Salesman Problem*); el problema del cartero chino o CPP (*Chinese Postman Problem*); el problema de las multi-rutas

de viajantes (m-TSP); el de las rutas de nodos para un almacén y múltiples vehículos, el de rutas de nodos para múltiples almacenes y múltiples vehículos, el problema de rutas de nodos con demandas estocásticas para un depósito y múltiples vehículos, y el del cartero chino con restricciones de capacidad (Estrada, Galván, Magín, & Robusté, 2003). Los autores muestran esta división por la complejidad diversificada que representa cada uno de estos problemas (Estrada, Galván, Magín, & Robusté, 2003).

Lim y et. Al., 2005, utilizan un algoritmo de 2 aproximaciones para resolver el TSP capacitado con recogida y entrega en un árbol. El objetivo de esta variación del TSP es determinar la distancia mínima posible que recolecte y entregue las cargas sin violar la capacidad del vehículo recolector. Este algoritmo construye una serie de rutas para todos los vértices, recurrentes a las ramas de un árbol (Lim, Wang, & Xu, 2005).

El problema del agente viajero es un problema conocido de optimización combinatoria utilizado por la comunidad en la construcción (Klansek, 2011). En el presente estudio se utiliza la solución del problema para previsión de rutas, en lo que corresponde al abastecimiento, realización de órdenes de compra, supervisión de rutas, y planeación (Klansek, 2011). También se indica el exitoso uso del TSP como una alternativa de solución para problemas de optimización (Klansek, 2011).

4 CAPÍTULO 4.- METODOLOGÍA

4.1 Método Científico y su enfoque de Modelado de Investigación de Operaciones

“El método científico es el proceso secuencial, en el que el análisis de los fenómenos permite al hombre transformar el conocimiento común en conocimiento cierto con características de verificado, verificable, tentativo y transitorio”(Pazmiño, 1997, p. 71). De esta forma, el método científico provee pasos que permiten plantear problemas científicos, poniendo a prueba la hipótesis, para obtener resultados confiables (Rodríguez, 2005). Adicionalmente, una de las ventajas de utilizar este método es que las reglas, o pasos, son un procedimiento flexible, y se podrá modificar según el tipo, o diseño de investigación (Pazmiño, 1997).

Guarch, Ortiz y Vicens, (1997) en su libro Métodos Cuantitativos, indican que para resolver cualquier situación se debe “identificar el estado actual de las cosas y el estado deseado, y luego emprender una acción para reducir o eliminar la diferencia”. Es así que nace el enfoque de modelado de Investigación de Operaciones para tratar de lograr el estado deseado de una situación (Hillier & Lieberman, 2010). Pues el enfoque de Modelado de Investigación de Operaciones (IO) lo que hace es proveer etapas o fases, para dar a las cosas una mejor dimensión. Estas fases describen un estudio característico de IO (Hillier & Lieberman, 2010).

1. Definición del problema de interés y recolección de datos relevantes.
2. Formulación de un modelo matemático que represente el problema.

3. Desarrollo de un procedimiento para derivar una solución al problema a partir del modelo.
4. Prueba del modelo y mejoramiento de acuerdo a las necesidades.
5. Preparación para la aplicación del modelo prescrito por la administración.
6. Implementación.

4.2 Metodología aplicada

En el presente estudio se utiliza el Método Científico y su enfoque de Modelado en Investigación de Operaciones, que se describió previamente. Este enfoque es utilizado para el desarrollo de la propuesta, utilizando modelos matemáticos, como los modelos de localización y de transporte. Se utiliza el problema de *p-median* para la ubicación óptima de contenedores de residuos, basándose en la aplicación del mismo en casos similares dados en la revisión literaria (Aremu, et al. 2012; Vijay et al. 2008; Zamorano et al. 2009); y el problema del agente viajero para crear las rutas de recolección de los contenedores de residuos basándose de igual manera en la aplicación del mismo por parte de estudios parecidos (Arias 2012; Bonomo et al. 2009; Chalkias & Lasaridi, 2009; Klansek 2011; Lim et. al 2005) . Estos pasos se aplican de la siguiente forma para ambos modelos:

1. Recolección de datos relevantes.
2. Formulación de Modelo Matemático que represente el problema.
3. Desarrollo de un procedimiento para derivar una solución.
4. Prueba del modelo y mejoramiento de acuerdo a las necesidades.

4.2.1 Recolección de datos relevantes

Se procedió a levantar información relevante para el estudio, la cual ayudó a identificar alternativas y criterios. Se determinaron las condiciones de observación, y además, se revisó información histórica y las distintas prácticas. Esto permitió obtener los datos para desarrollar la propuesta.

- Análisis global: revisión libros, estudios realizados y estadísticas.
- Análisis específico: entrevistas a personas involucradas, y revisión de normativas.
- De forma continua, y con ayuda de la revisión literaria e investigación de campo del panorama nacional, se planteó los modelos para la mejora en el almacenamiento temporal y recolección de RSU (Guarch, Órtiz, & Vicens, 1997).

Una vez identificada la necesidad de la propuesta se procede al levantamiento de información para alimentar a los modelos escogidos por la revisión literaria, PPM y TSP.

Estos son:

- Identificar el área de estudio.
- Identificar a los usuarios del área de estudio.
- Obtener datos de generación de RSU.
- Determinar puntos de servicio.
- Determinar los recursos que forman parte de la propuesta.

4.2.1.1 Entrevistas

Se realizó entrevistas a personas involucradas en el manejo de RSU del cantón Esmeraldas; al Director de Higiene del Cantón, y al Supervisor de Operaciones. Se realizaron 2 cuestionarios, los cuales fueron diseñados con la idea de identificar sobre las necesidades

que tiene el manejo de RSU. Estas fueron de elaboración propia, y se pueden encontrar en el **Anexo 1**. Sus diferencias yacen en la diferencia de labores de los entrevistados, mientras que el primer cuestionario fue más enfocado en el manejo y administración, el segundo fue más técnico y detallado en las operaciones que se realizan.

4.2.1.2 Diagrama de Causa y Efecto

Este diagrama permitió identificar y definir el fenómeno que ocurre y las causas del mismo. Este análisis se lo puede dividir en 3 fases según Galgano, en su libro, Los Siete Instrumentos de la Calidad Total, 1995:

1. **Definición del efecto:** en esta fase se planteó de forma específica el fenómeno (Galgano, 1995).
2. **Construcción del diagrama:** se realizó una lista de las razones, y causas que pueden estar ocasionando el efecto o fenómeno. Aquí se realizó el espinazo, con el efecto o fenómeno como la cabeza del mismo. Y de esa forma se comenzó a dividir al espinazo en su clasificación respectiva. En este caso las 6 M's: Método, Maquinaria, Medio Ambiente, Mediciones, Materiales, Mano de Obra (Galgano, 1995).
3. **Análisis del causa y efecto del diagrama construido:** esta fase se examinó de forma crítica cada una de las causas definidas con el objetivo de señalar las causas más importantes, las más probables, y así verificar si son causas verdaderas (Galgano, 1995).

4.2.1.3 Investigación de Campo

La investigación de campo requirió de la visita a diferentes municipios del país que se encuentran en mejores condiciones que el área de estudio en manejo de residuos. Se

recolectó información sobre los métodos, y procedimientos utilizados de cada uno de los municipios visitados a través de información de primer plano con los entes administrativos de cada cantón al que se visitó. De la misma forma creando una recolección de datos que servirán para el desarrollo de la propuesta.

4.2.1.4 Delimitación Área de Estudio

En esta fase se incluye una breve descripción del área de estudio y se delimita.

- Se utiliza la herramienta de localización geográfica Google Maps, y Earth para mapear la zona implicada.

4.2.2 Modelado para Ubicación de Contenedores

Los contenedores fueron ubicados gracias a la aplicación del PPM. Primeramente con la ayuda de Google Maps y Earth se determinan las coordenadas de los puntos de demanda: que son los centros de cada una de las manzanas que componen el área de estudio. Luego se determinaron los puntos candidatos que pueden convertirse en puntos donde se localizaran a los contenedores de RSU. Estos puntos cumplen con 2 características de accesibilidad: como lo es (1) el acceso del vehículo que los recolecte, al poder llegar de dos o más direcciones; (2) y que los contenedores tengan la opción de ser ubicados en más de 2 manzanas diferentes en un mismo sector. Volviendo así los posibles puntos de localización a cada intersección dentro del área de estudio.

Adicionalmente, para saber cuántos contenedores se necesitan, se utiliza un método utilizado actualmente por la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC), que ayuda a obtener una estimación cercana de la generación de residuos de un área

determinada. Esto es en base a la cantidad de viviendas en un sector (o número de medidores de luz de viviendas), y el número promedio de habitantes por vivienda.

Consiguientemente, por la naturaleza del problema, se planteó el modelo, y se aplicó un algoritmo de solución basándose en la revisión literaria para ubicar p contenedores previamente definidos, en m puntos de servicio candidatos potenciales de una red para servir a n puntos de generación.

El algoritmo *cluster k-means* permite segmentar el problema, y así determinar la ubicación de los contenedores. Los conglomerados k-media funcionan de la siguiente forma (Duda, 2007):

1. Primeramente los ítems (nodos de clientes) se asignan aleatoriamente a los k conglomerados.
2. Luego los ítems son movidos entre los conglomerados, usando un método que permita clasificarlos. De forma que internamente los conglomerados son similares, pero externamente son disímiles a otros conglomerados.
3. El análisis se detiene cuando mover más ítems entre conglomerados hace que haya mayor variabilidad.
4. Los resultados dependen del valor que tomó k (número de contenedores).

La variabilidad de los conglomerados se mide con respecto a la media de las variables de clasificación (Duda, 2007). Si más de una variable es utilizada para definir los conglomerados, las distancias entre conglomerados son medidas de forma multidimensional (distancia euclidiana) (Duda, 2007).

4.2.2.1 “Variable Neighborhood Search” (VNS)

La heurística VNS permitió resolver cada segmento del PPM, establecidos por el algoritmo previo (k-medias). Aquí cada uno de los conglomerados se convirtió en un vecindario N_k ; y para cada uno de estos vecindarios se encontró una solución x que minimizó la función objetivo. Cabe mencionar que por el tamaño de los problemas se pudo escoger el nodo que representaba a un mínimo global para cada vecindario fácilmente.

4.2.3 Modelado para Creación de Rutas de Recolección

Los datos relevantes de las rutas creadas se obtuvieron de la resolución del problema previo, PPM, que brindó el número de puntos a visitar, y su localización. Además se obtuvo información de las calles y distancias entre puntos con ayuda de la aplicación Waze. Así con la cantidad de residuos como tal en cada contenedor a recolectar, se decide segmentar el problema, de acuerdo a la capacidad del vehículo recolector (Arias, 2012; Karadimas, Kouzas, Anagnostopoulos, & Loumos, 2005).

4.2.3.1 Formación de Conglomerados

Se realizó una segmentación de los puntos a visitar, formando conglomerados por cercanía en su ubicación en el mapa del área de estudio, tratando de que cada conglomerado no sobrepase la capacidad del vehículo recolector; así cada conglomerado se convirtió en un problema de TSP a resolver. Adicionalmente, dependiendo del tipo de contenedor se realizó la división del área de estudio en conglomerados de diferentes tamaños.

4.2.3.2 ATSP

Se planteó el ATSP para cada uno de los conglomerados formados previamente. Estos problemas fueron resueltos con ayuda del software de optimización LINGO, el cual usa la heurística "Branch-and-Bound", y se logró sacar buenas soluciones. Al ingresar los datos a LINGO se codificó a cada punto de forma distinta a la inicial, esto permitió resolver los problemas y generar las rutas. Para la presentación de resultados se utiliza la codificación original de los puntos de servicio para así poder identificar cada punto en cada una de las rutas generadas.

5 CAPÍTULO 5.- INVESTIGACIÓN DE CAMPO

Esta sección describirá el manejo de residuos en varios cantones del Ecuador que hacen uso de las buenas prácticas en lo que respecta a la recolección de residuos sólidos. La investigación de campo presente sirve de apoyo a la revisión literaria de los diferentes casos de estudio. El propósito de esta investigación es poder describir los sistemas de manejo de residuos que forman parte de la realidad del país, y así proveer una guía en el estudio. Adicionalmente, estos cantones serán comparados con el catón Esmeraldas, que es donde se encuentra el área de estudio.

Primeramente, las provincias son escogidas con respecto a su ubicación provincial en los siguientes esquemas según las bases de información nacional (INEC, 2010). (1) El porcentaje de eliminación de residuos por vehículo recolector; (2) el porcentaje de hogares que almacenan la basura en fundas; y (3) el porcentaje de hogares que realizan clasificación de desechos. Puesto que estos esquemas forman parte de las buenas prácticas ambientales en la recolección de residuos (Lin, Tsai, Chen, & Kao, 2011).

5.1 Buenas Prácticas de la Gestión Ambiental en el Ecuador

5.1.1 Eliminación de Residuos por Carro Recolector

En el Ecuador la recolección de residuos es realizada por vehículo recolector, la cual es considerada la única forma adecuada de eliminación de residuos existente. Pues es así como se lleva los residuos al lugar de disposición final. En promedio el 77% de los hogares del país elimina los residuos de esta forma (INEC, 2010); y a nivel provincial este porcentaje se encuentra distribuido como se puede ver en la figura 5.1, donde las provincias como:

Esmeraldas (69%), Azuay (76.9%), Tungurahua(70.8%), Imbabura (82.7%), Santa Elena (94.5%), Pichincha (94.6) están en algunos casos por encima del porcentaje nacional.

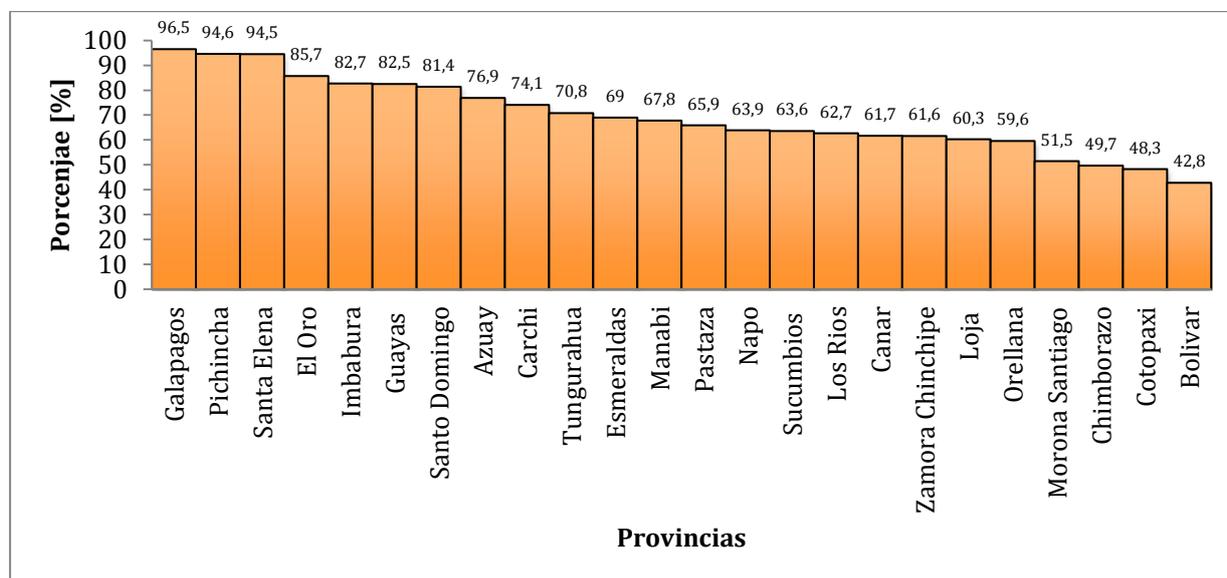


Figura 5.1 Porcentaje de Eliminación de Residuos por Provincia

Fuente: Ecuador en Cifras (INEC, 2010)

5.1.2 Almacenamiento de Residuos en Fundas Plásticas

El porcentaje de hogares que almacenan la basura en fundas está catalogado como una estadística de buenas prácticas ambientales, de disposición final de la basura (INEC, 2010), ya que evita que los residuos se segreguen y contribuyan a la contaminación. Esta es una actividad previa a la recolección y eliminación de residuos y usualmente es llamada almacenamiento temporal. Es así que en la figura 5.2 se puede visualizar el porcentaje de hogares que almacenan la basura en fundas plásticas, como parte del mapa del Ecuador por provincia. Este está clasificado en 4 categorías por porcentaje de hogares dentro de diferentes rangos en varios tonos de verde, siendo el mayor rango verde oscuro 20,6% a 28.6%, seguido por un rango de 12,6% a 20,5%. Entre las provincias con un mayor porcentaje

de almacenamiento temporal en fundas de plásticas, se tiene a Pichincha, Carchi, Imbabura, Santo Domingo, Tungurahua y Azuay.

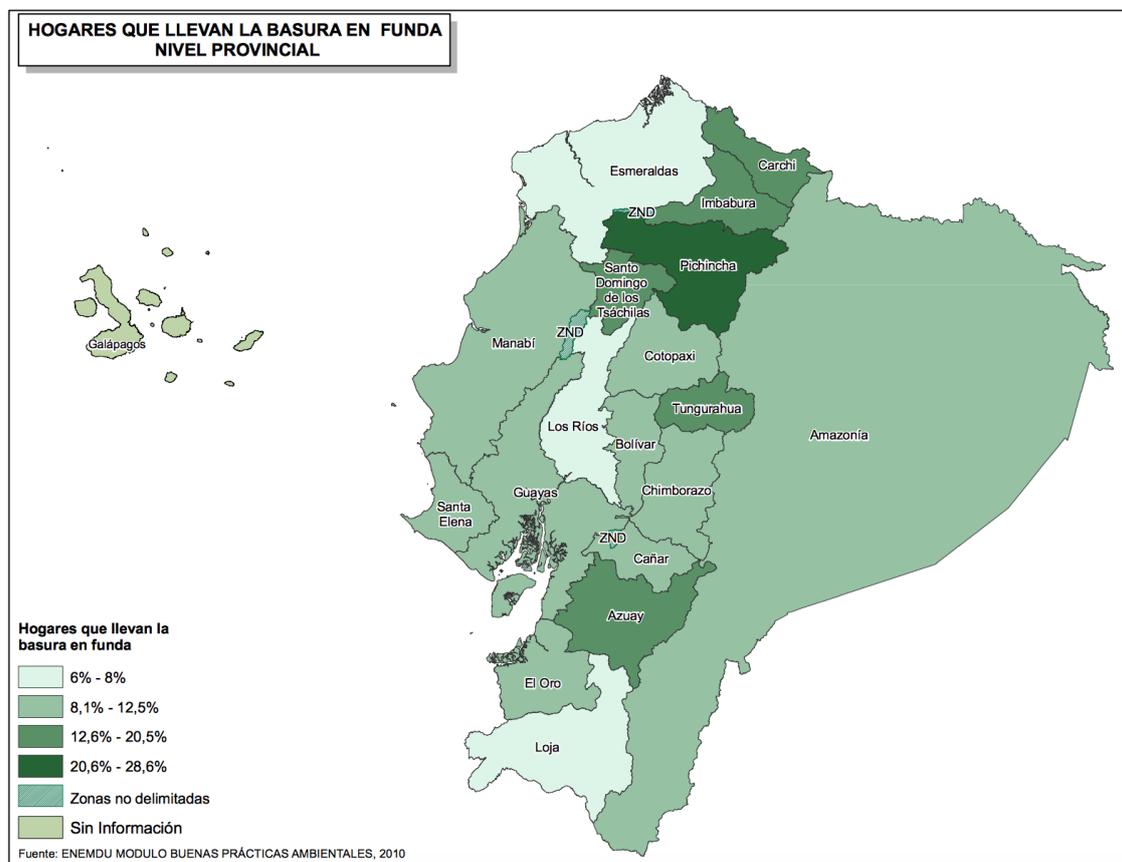


Figura 5.2 Hogares Almacenan la Basura en Fundas a Nivel Provincial

Fuente: Ecuador en cifras, 2010 Estadísticas Ambientales.

5.1.3 Clasificación de Desechos en el Origen

La separación de desechos en las diferentes provincias del país consta en la actualidad de 2 tipologías: residuos no orgánicos (vidrio, cartón, plástico, etc) y residuos orgánicos. El porcentaje de hogares que realizan clasificación de desechos orgánicos no es muy alto entre provincias, ya que existen aquellas que no lo realizan, sin embargo se puede visualizar en la figura 5.3 al Ecuador por provincia, clasificado en 4 categorías por porcentaje de hogares

dentro de los diferentes rangos. En el rango mas alto se encuentra a la provincia del Azuay y Loja, pues están entre el 28.2% y 44.9% de los hogares que realizan esta actividad.

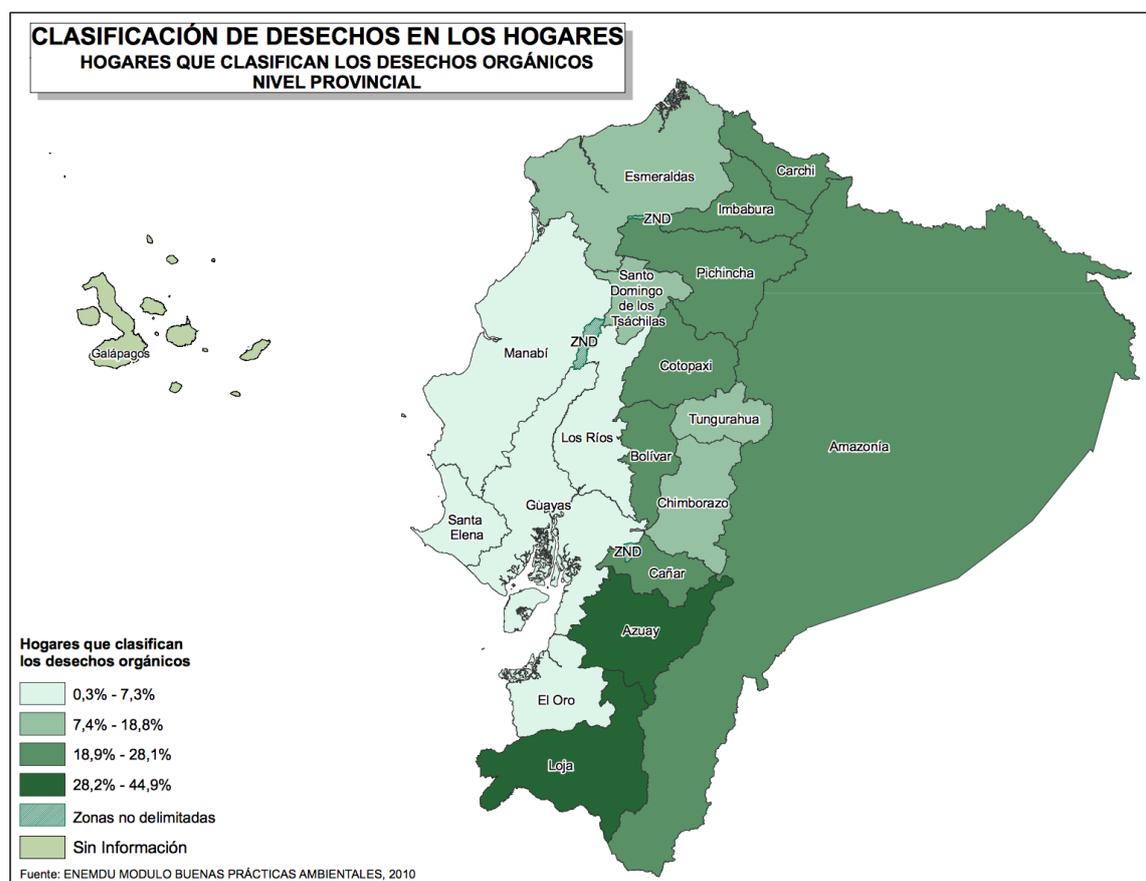


Figura 5.3 Clasificación de Desechos en los Hogares a Nivel Provincial

Fuente: Ecuador en cifras, 2010 Estadísticas Ambientales.

5.2 Panorama Cantonal

Por el enfoque del estudio se escogieron a 5 provincias, y de esas se tomaron a 5 de sus cantones respectivamente. Estos cantones pertenecientes a las provincias con las mejores prácticas son: Salinas perteneciente a la provincia de Santa Elena; Otavalo perteneciente a la provincia de Imbabura; Quito perteneciente a la provincia de Pichincha; Cuenca

perteneciente a la provincia del Azuay y Ambato perteneciente a la provincia de Tungurahua.

5.2.1 Resultados del Panorama Cantonal

Tabla 5-1 Resumen de Resultados de Investigación de Campo

<i>Provincia- Cantón</i>	<i>Santa Elena</i>	<i>Imbabura</i>	<i>Pichincha</i>	<i>Azuay</i>	<i>Tungurahua</i>
	<i>Salinas</i>	<i>Otavallo</i>	<i>Quito</i>	<i>Cuenca</i>	<i>Ambato</i>
<i>Entidad Publica Encargada</i>	Si	Si	Si	Si	Si
<i>Entidad Privada Encargada</i>	No	No	No	No	Si
<i>Separación en el origen</i>	No	Si	No	Si	No
<i>Diferenciación de almacenamiento</i>	No	Si	No	Si	No
<i>Tipo de almacenamiento temporal</i>	Fundas plásticas, u otros.	Fundas plásticas de diferentes colores	Contenedores/ Fundas plásticas u otros	Fundas plásticas de diferentes colores	Contenedores
<i>Tipo de recolección</i>	Puerta a puerta.	Puerta a puerta	De acera consolidada/Puerta a puerta	Puerta a Puerta/ De acera consolidada Edificios	De acera consolidada
<i>Cantidad de Rutas</i>	12	11	229	22	28
<i>Cobertura de recolección</i>	70-80%	90%	100%	98%	100%
<i>Rastreo Satelital</i>	No	Si - GPS vehiculos	Si - Vehículos y Contenedores	Si- Vehículos	No
<i>Control de MRSU</i>	No	Si	Si	Si	Si
<i>Proyección de Generación de RSU</i>	No	Si	Si	Si	Si

Elaboración propia.

Fuente: (Salinas, 2014; EMASEO, 2014; GAD Municipal del Cantón Otavallo, 2015; Empresa Municipal de Aseo de Cuenca, 2014; Mena, 2015)

Se puede ver en la tabla 5.1 que sistemas como Quito y Ambato tienen una cobertura de servicio del 100% (Mena, 2015).; en este caso ambos sistemas cuentan con una contenerización de residuos sólidos urbanos. No realizan separación de residuos en el

origen. Y realizan una proyección de generación de residuos para tener el número óptimo de contenedores a la disposición de los usuarios (Mena, 2015; EMASEO, 2014). Ambos cantones realizaron la contenerización a través de la empresa Themac Tecnologías para el Ambiente (EMASEO, 2014).

La propuesta de esta compañía señaló que para ambos cantones la recolección tradicional (manual, o semi-manual) de RSU presenta falencias como: basura en las calles, contaminación del entorno medio-ambiental, proliferación de plagas y enfermedades, contaminación de aguas, impacto negativo para actividades económicas y turísticas, entre otros (Mena, 2015). En Ambato en Octubre del 2006 se empezaron a colocar 560 contenedores metálicos 2400 y de 3200 lt (Mena, 2015). Siendo su recolección manejada hasta el 2015 por la empresa Global Parts S.A. como operador de servicio privado (Mena, 2015). En Quito el cambio de servicio se esta realizando por partes, y se inicio en Enero del 2012, colocando 642 contenedores; el operador de servicio para Quito es la EMASEO, empresa pública (EMASEO, 2014).

En el caso de Cuenca y Otavalo se puede ver que existe una cercanía en la cobertura, con un 98%, y 90% respectivamente (Empresa Municipal de Aseo de Cuenca, 2014; GAD Municipal del Cantón Otavalo, 2015). Ambos realizan separación de los residuos en el origen, y proyección de la generación de residuos a través del conteo de viviendas y el número promedio de habitantes en las mismas. Según ambos Municipios, debido a la naturaleza del sistema de recolección, “puerta a puerta”. El almacenamiento temporal es controlado, de tal forma que si los usuarios no cumplen en almacenar los residuos en la bolsa de color adecuada, no se le recolecta sus residuos, o se lo puede llegar a multar (Empresa Municipal de Aseo de Cuenca, 2014; GAD Municipal del Cantón Otavalo, 2015). Sin embargo, Salinas

que también realiza recolección de puerta a puerta como Cuenca y Otavalo, no realiza esta separación de residuos en el origen, y su cobertura no sobrepasa la media nacional de residuos recolectados que es del 77% (Salinas, 2014).

6 CAPÍTULO 6.- DESCRIPCIÓN Y DIAGNÓSTICO PRELIMINAR

6.1 Área de Estudio

El presente estudio es realizado en un típico barrio, principalmente residencial en un casco urbano. Aún así, en este barrio también se cuenta con establecimientos comerciales, escuelas, estadios, y parques. El nombre de esta zona es Barrio Centro. Este se encuentra localizado en la Parroquia, Cantón y Provincia del mismo nombre, Esmeraldas; ubicado al noroccidente del Ecuador, en la región costa. El barrio es administrado como el resto del cantón por el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Esmeraldas (GADMCE), donde el Alcalde es el Dr. Lenin Lara Rivadeneira.

6.1.1 Características Físicas y Climáticas

El Barrio Centro, como el resto de la provincia de Esmeraldas pertenece a una región tropical, con un gran nivel de pluviosidad (Dirección de Higiene del GADMCE, 2012). Su temperatura se mantiene en un rango de 26,2 – 25 °C anuales, bastante estables. Adicionalmente, en lo que se refiere a características físicas el cantón cuenta con gran cantidad de colinas altas y una gran cantidad de terrazas aluviales (Dirección de Higiene del GADMCE, 2012). El Barrio Centro es una plataforma plana, sin ninguna elevación, más colinda con el Río Esmeraldas.

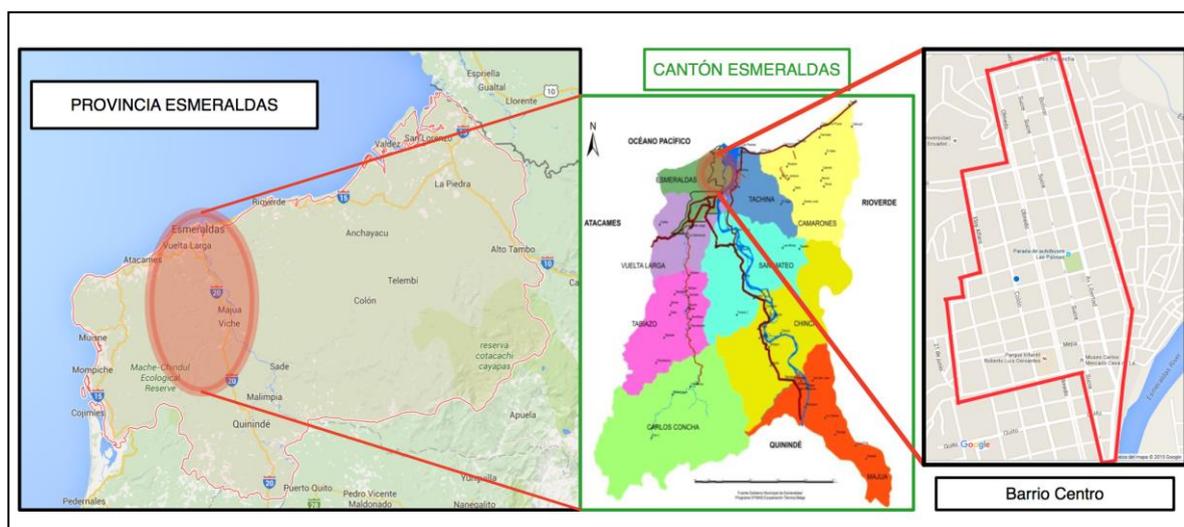
6.1.2 Actividades Económicas

El cantón Esmeraldas cuenta con una producción agropecuaria de palma africana, banano y madera; además, está la ganadería, la pesca artesanal, y los servicios de comercio

(Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón de Esmeraldas, 2013). Según el Censo del 2010, el 8.88% de la Población Económicamente activa (PEA) del cantón labora en agricultura, ganadería, silvicultura, y pesca (INEC, 2010). Por otro lado, este dispone de un aeropuerto, puerto comercial, terminales petroleros, la refinería mas grande del país en la actualidad, y una planta termoeléctrica, que así como las demás entidades publicas también brindan trabajo a la población del cantón (Dirección de Higiene del GADMCE, 2012). El Barrio Centro como tal se caracteriza por la gran actividad comercial; hay vendedores de artículos al por menor, ropa, y artículos de primera necesidad.

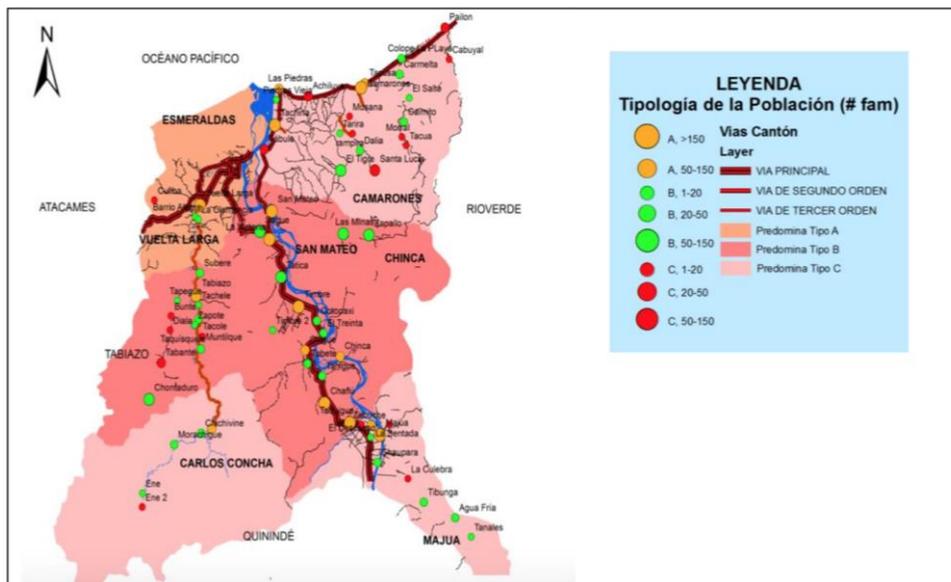
6.1.3 Aspecto Geográfico y Demográfico

El Barrio Centro ocupa un área de 0.616 km² dentro de la Parroquia Esmeraldas, la cual tiene una extensión de 70.5 km². Esta parroquia es parte de la división política urbana del cantón del mismo nombre, el cual tiene una extensión de 1338.67 Km² (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón de Esmeraldas, 2013). Este se puede ver a continuación en la figura 6.1 donde se puede ver específicamente la ubicación del Barrio respecto a la división política del cantón Esmeraldas, y la Provincia del mismo nombre.



Fuente: Google Maps

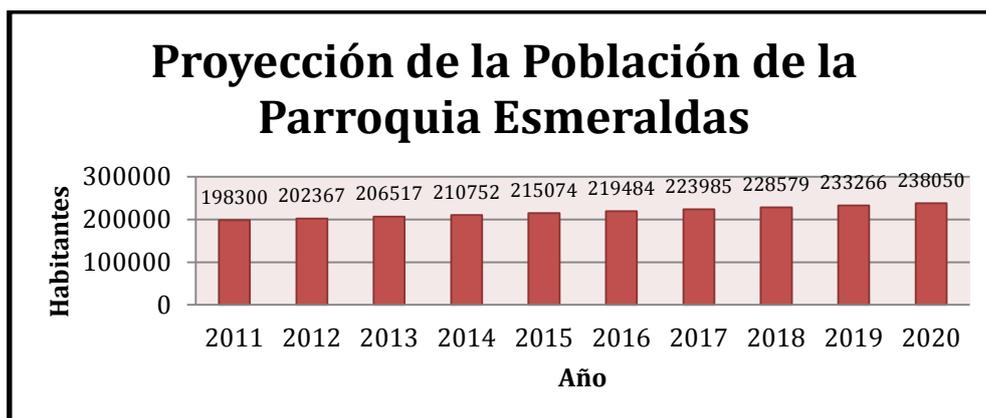
Figura 6.1 Mapa de Ubicación del Barrio Centro a nivel Cantonal y Provincial



Fuente: GADMCE, 2013.

Figura 6.2 Segmentación de la Población según Tipología de Concentración de Vivienda

La figura 6.2 muestra al mapa del cantón Esmeraldas y su división política, y también la tipología de la población según los colores descritos en la misma; donde la Parroquia de Esmeraldas solo cuenta con población urbana y el Barrio Centro ubicado en esta parroquia se caracteriza por tener un gran cantidad de viviendas concentradas, que según la clasificación de asentamientos y vivienda, corresponde a la tipología A (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón de Esmeraldas, 2013). También se puede ver a las demás parroquias del cantón están dentro de las otras tipologías de población. La tipología B se refiere a viviendas apartadas con servicios básicos limitados; y la tipología C a viviendas apartadas dispersas que casi no cuentan con servicios básicos (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón de Esmeraldas, 2013).



Fuente: GADMCE, 2013. Elaboración propia

Figura 6.3 Proyección de la Población Urbana en la Parroquia de Esmeraldas

Como se explicó anteriormente, en la parroquia Esmeraldas se encuentra toda la población urbana del cantón, que son 161868 habitantes con una densidad poblacional de 2297.63 hab./km² (INEC, 2010). Las proyecciones del GADMCE, 2013, en el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de Esmeraldas (PDOT), plantean una proyección de crecimiento de la población como se puede ver en la figura 6.3. Esta proyección utiliza las tasas de natalidad, de mortalidad, y de crecimiento urbano del cantón para determinar la tasa de crecimiento anual, la cual es de 2.03% (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón de Esmeraldas, 2013). Por lo cual para el 2020 se espera que la Parroquia de Esmeraldas tenga 238050 habitantes.

6.1.4 Generación y Recolección de RSU en la Municipalidad de Esmeraldas

Actualmente

6.1.4.1 Normativa de los RSU

La dirección de higiene del cantón Esmeraldas cuenta con una ordenanza municipal, la cual regula el barrido, la recolección, transporte, transferencia y disposición final de los

residuos sólidos urbanos (Municipalidad de Esmeraldas, 2005); así mismo en esta también se ha incluido a los residuos domésticos, comerciales, industriales y biológicos del cantón (Municipalidad de Esmeraldas, 2005). Esta ordenanza fue elaborada en el 2005 con el objetivo de complementar a la ordenanza elaborada en el 2002, en la administración del cantón del en ese entonces alcalde, Ernesto Estupiñán Quintero (Municipalidad de Esmeraldas, 2005).

La ordenanza es de carácter público y da una base regulatoria de la relación del usuario con el municipio en el servicio realizado por la dirección de higiene, en lo que respecta al aseo de la ciudad (Municipalidad de Esmeraldas, 2005). Presentando las sanciones de incumplimiento, las regulaciones a cumplir, y la responsabilidad de las partes mencionadas. De esta forma, el cumplimiento de la Ordenanza está a cargo del Director de Higiene Municipal y la Comisaría municipal. Más el control es responsabilidad de la Dirección de Higiene, la unidad de Saneamiento Ambiental, la Policía Nacional, y las demás autoridades competentes (Municipalidad de Esmeraldas, 2005).

6.1.4.2 Etapas de los RSU

Las etapas de los RSU definen como se maneja el sistema de RSU en todo el cantón. En la figura 6.4 se puede observar cuales son las etapas en la gestión de residuos manejada en el casco urbano. Estas son la generación de residuos, la recolección y transporte, el barrido y la disposición final. Las cuales siguen ese orden y son dependientes una de la otra.

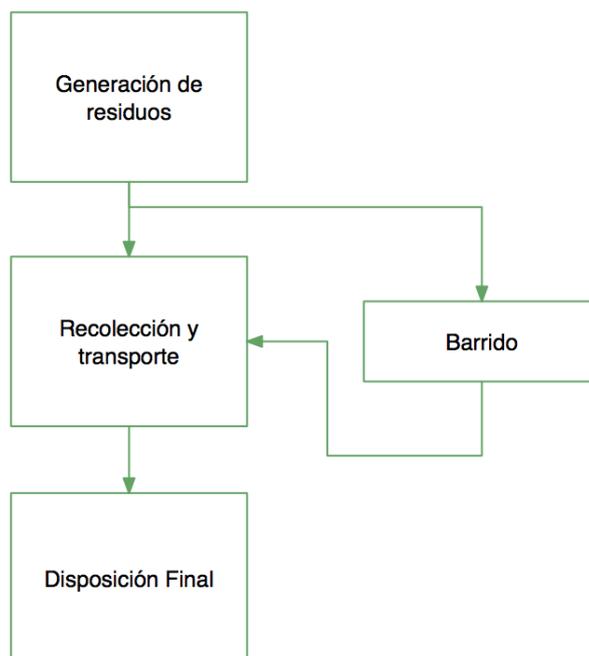


Figura 6.4 Sistema de Gestión de Residuos en el Cantón de Esmeraldas

Fuente: Elaboración propia.

6.1.4.3 Descripción de la Generación de RSU

En el Barrio Centro, 66 manzanas del casco urbano de la Parroquia Esmeraldas, la generación de residuos es realizada por el usuario o cliente del servicio, y comprende actividades de almacenar temporalmente, y situar los RSU en la acera fuera de casa; en su mayoría dentro de envases plásticos (bolsas) como se puede ver en la figura 6.5. Según datos de la última medición realizada por el GADMCE en el 2012, la producción per cápita de residuos en el cantón es de 0.798 kg/hab*día (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón de Esmeraldas, 2013).



Fuente: Elaboración Propia

Figura 6.5 Residuos sacados a la acera para su recolección

6.1.4.4 Descripción de la Recolección y Transporte de RSU

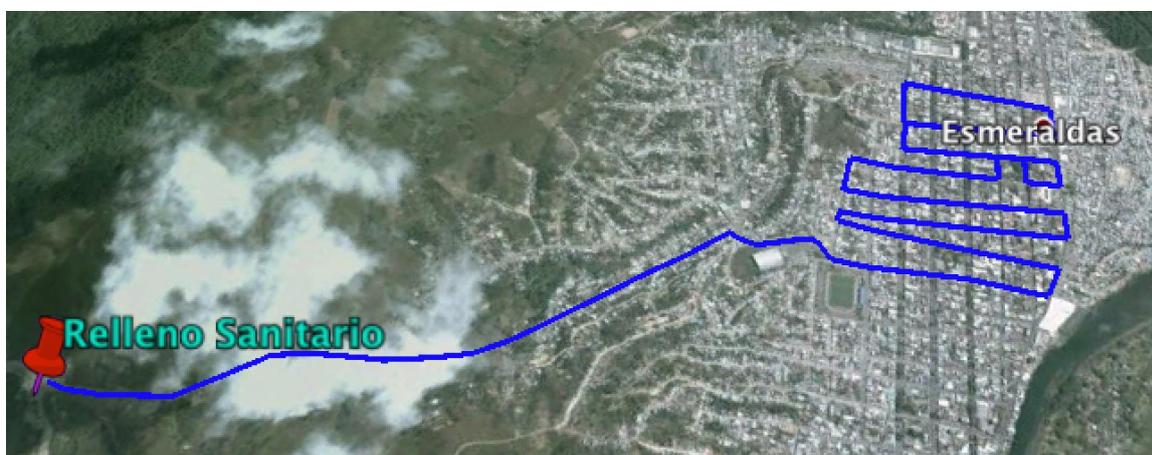
Según datos del INEC, (2010), solo el 69% de los RSU de la Provincia se eliminan por carro recolector, y lo demás de forma descontrolada. Ese porcentaje recolectado por el vehículo esta atado a un tipo de servicio de recolección realizado puerta-a-puerta. Sin embargo, el servicio es llamado formalmente “de acera”, donde los residentes y usuarios del servicio tienen la responsabilidad de sacar sus residuos a la acera, cumpliendo con los horarios del vehículo recolector. El sistema de recolección es estacionario no contenerizado. Eso quiere decir que los envases usados para el almacenamiento temporal (fundas, sacos, cartones) son provistos por los usuarios, y permanecen en el punto fuente de generación de residuos (en la acera de cada vivienda).

La recolección consta de actividades de alzado manual de los RSU realizado por cuadrillas de 3 personas, y transporte de RSU a la estación de disposición final en un vehículo que puede ser un recolector o volqueta (Dirección de Higiene del GADMCE, 2012). Los RSU recolectados no son separados en la fuente, lo cual implica que todo está revuelto, y por lo tanto el servicio de recolección no este diversificado por composición física de los RSU (Dirección de Higiene del GADMCE, 2012). A pesar de que por un estudio, realizado en el 2012, se pudo identificar que el 56.80% de los RSU es orgánico, el 41.75% es inorgánico (vidrio, cartón, aluminio, etc), y el 1.45% residuos peligrosos (Dirección de Higiene del GADMCE, 2012)

Una encuesta de satisfacción del sistema de recolección realizado a 695 usuarios del cantón Esmeraldas pertenecientes al casco urbano, indican en su mayoría conformidad con el proceso de recolección realizado (Dirección de Higiene del GADMCE, 2012); sin embargo se puede notar desconocimiento en general de las responsabilidades y obligaciones de los usuarios, ya que aproximadamente, el 56% de las personas encuestadas desconoce la ordenanza para el buen manejo de residuos (Dirección de Higiene del GADMCE, 2012).

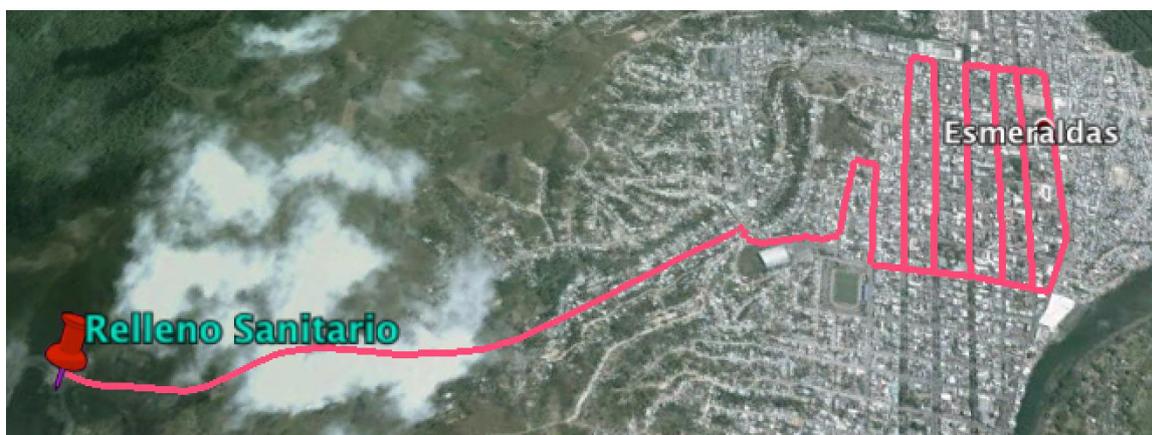
En lo que se refiere al transporte de RSU, existen 4 recolectores de los cuales 2 son de 10yd³ (7.65 m³), 1 de 16yd³ (12.23 m³), y 1 de 25yd³ (19.11 m³) pertenecientes al GADMCE (Dirección de Higiene del GADMCE, 2012). En la actualidad los vehículos de 7.65m³ son los que recorren las 2 rutas del Barrio Centro de la Parroquia Esmeraldas, y los otros 2 recorren otras rutas en barrios perimetrales. Las rutas del Barrio Centro fueron creadas de acuerdo a la necesidad de la comunidad, por la Dirección de Higiene de la administración previa, del ex Alcalde del cantón Ernesto Estupiñán (Dirección de Higiene del GADMCE, 2012). Estas rutas se realizan entre 4 y 3 veces al día.

El proceso de recolección se inicia cuando los choferes correspondientes retiran los vehículos del garaje del GADMCE y se dirigen a la calle Pedro Vicente Maldonado (Malecón) y 9 de Octubre, donde se toma presencia del personal y se recoge a las cuadrillas con las indicaciones del supervisor, (horarios) (Dirección de Higiene del GADMCE, 2012). La mayoría de la ciudad tiene una frecuencia de recolección inter-diaria, sin embargo, para el casco urbano en la parroquia de Esmeraldas, el recolector recorre diariamente el sector (Dirección de Higiene del GADMCE, 2012).



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.6 Ruta de Recolección Transversal diaria del Barrio Centro, 2015.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.7 Rutas de Recolección Longitudinal diaria del Barrio Centro de la Ciudad, 2015.

En el Barrio Centro de la Ciudad que se encuentra en el casco urbano, los RSU se recolectan de manera diaria a través de 2 rutas (Dirección de Higiene del GADMCE, 2012); la primera llamada ruta longitudinal y la segunda llamada ruta transversal. En la figura 6.6 y la figura 6.7 se pueden ver las rutas de recolección diarias del barrio Centro de la Ciudad de Esmeraldas (Dirección de Higiene del GADMCE, 2012). Primeramente, esta la ruta transversal diaria que inicia en la avenida Eloy Alfaro y Rocafuerte (de color azul), tiene una longitud de 9.45km (empezando y terminando en el Relleno Sanitario). Y la ruta longitudinal diaria que inicia en la calle Gustavo Becerra y Salinas (de color rosa) tiene una longitud de 8.14km (empezando y terminando en el Relleno Sanitario). Esto significa que hoy en día se recorre regularmente un total de 44.63km. Para la disposición final de RSU en el Barrio Centro, se lleva los RSU al Relleno Sanitario del cantón, ubicado en las afueras de la ciudad, al extremo de la carretera Carlos Concha, en el barrio Esmeraldas Libre; este Vertedero Municipal esta localizado a 2.5 Km de la intersección de las calles Gustavo Becerra y Salinas.

6.2 Diagnóstico

Mediante la observación de las actividades de manejo de residuos, se pudo determinar que la Dirección de Higiene a través de sus operaciones no logra recolectar todos los RSU. El 31% de los residuos son eliminados de forma descontrolada, y eso implica un impacto ambiental alto (emisiones de gases, contaminación de vectores ambientales, ruido, decaída de higiene, etc) (INEC, 2010). Además de que afecta a la estética de la provincia (con la

formación de micro basurales, obstrucción de alcantarillado, malos olores, y aspecto visual desagradable).

Las actividades relacionadas a la recolección de residuos son el alzado, y el transporte al vertedero municipal (Dirección de Higiene del GADMCE, 2012). Sin embargo, se pudo observar en diferentes ocasiones que previamente al alzado, algunas veces, se realiza la conglomeración de residuos en un punto, por la cuadrilla de recolección. Lo cual proporciona variabilidad, ya que no se realiza siempre.

Planteamiento

El problema se lo describirá a través de un diagrama de causa y efecto, una herramienta de análisis para todo tipo de fenómeno (Galgano, 1995). Este diagrama se lo realizará con información provista por el GADMCE, obtenida de la indagación de datos históricos y entrevistas realizadas al Director de Higiene del GADMCE, y el Supervisor de recolección de RSU ver **Anexo 1**. Lo cual permitirá ver como la propuesta de mejora, en la recolección de RSU, a continuación puede representar una solución factible aplicada de forma integral.

6.2.1 Diagrama de Causa y Efecto

6.2.1.1 Definición del Efecto o Fenómeno

En las entrevistas y por datos de estudios previamente realizados se supo plantear al fenómeno como: “El casco urbano central de la parroquia de Esmeraldas tiene residuos en las aceras y calles”.

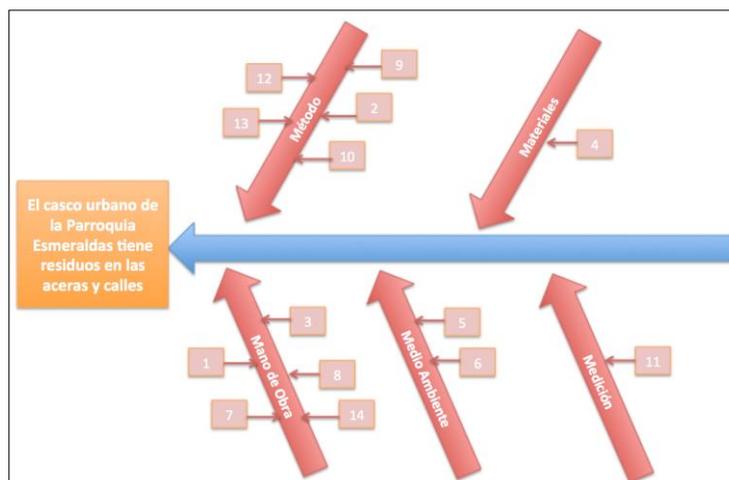
6.2.1.2 Construcción del Diagrama

Después de realizar un listado de las causas, se depuró resultando en la siguiente lista:

1. Los usuarios no sacan los RSU cuando se debe.

2. Las rutas de recolección de RSU no son controladas.
3. Se derraman desechos de las fundas en la acera por parte cuadrillas de recolección.
4. Los envases temporales de RSU no están unificados.
5. Existen carroñeros y animales de la calle que riegan la basura y ocasionan disturbios en la misma.
6. Hay “basureros” (recolectores independientes que no pertenecen al GADMCE) que riegan la basura en la calle.
7. Los usuarios botan residuos en las aceras y calles de la ciudad y crean micro basurales.
8. Los usuarios incineran los RSU en las calles.
9. No se barre lo suficiente.
10. No se controla las rutas de recolección de RSU.
11. No se controla la generación de RSU.
12. No se consolida los RSU.
13. La recolección de RSU no se realiza de forma adecuada.
14. Las cuadrillas de recolección se olvidan de puntos de generación de RSU.

Es así como se consigue clasificar y construir el siguiente diagrama de espina de pescado en la figura 5.2.



Fuente: Elaboración propia, 2015

Figura 6.8 Diagrama de Causa y Efecto para Análisis de Causas del Problema en Manejo de Residuos

6.2.1.3 Análisis del Diagrama

Como se puede ver en la figura 5.2 las causas 1, 3, 7, 8 y 14 están relacionadas a la mano de obra, e implican la no participación e irresponsabilidad del usuario y las cuadrillas que trabajan en el proceso de recolección de RSU no realizan bien su trabajo. La causa 4 relacionada a materiales, menciona que no se utiliza un envase unificado para el almacenamiento temporal de los RSU para la recolección. Las causas 2, 9, 10, 12, 13 están relacionadas al método en como se recolecta los RSU de las aceras y calles. La causa 11 relacionada a la medición y control de RSU. La mayoría de las causas que ocasionan que las aceras del casco central de la ciudad de Esmeraldas tengan RSU están ligadas a como se recolectan los RSU (2,9,10,12,13), en conjunto de cómo se manejan los recursos disponibles para la recolección y transporte (4, 3, 14). Por lo cual sería factible proponer una mejora en la actividad de recolección y transporte de residuos urbanos.

Como se mencionó anteriormente solo el 69% de los RSU de la Provincia se eliminan por carro recolector, y lo demás por otras formas. Lo cual indica que la operación no se realiza correctamente. En la actualidad el barrio Centro de la Ciudad cuenta con 2 rutas designadas para la recolección de residuos. La ruta de recolección diaria transversal y la ruta de recolección diaria longitudinal; se traslapan en varias avenidas, sin embargo así no son suficientes. Estas rutas sirven a 51 manzanas dentro del perímetro del barrio "Centro de la Ciudad" que equivale a .48 km² del barrio; las 15 manzanas restantes, ubicadas en el perímetro del Barrio, son servidas por otras dos rutas del cantón. Las manzanas ubicadas al sur son servidas por la ruta Lomas-a-la-Altura-de-la-ciudad, y las manzanas ubicadas al norte son servidas por la ruta de recolección el-mercado-colegio-Eloy-Alfaro; las cuales también sirven por el sur a Barrio Caliente, y al Barrio San José Obrero, y por el norte al sector Parada 7 y Barrio Juventud Progresista respectivamente.

7 CAPÍTULO 7.- DESARROLLO DE LA PROPUESTA

La propuesta de mejora de manejo de residuos que se desarrolla a continuación presenta el escenario óptimo para la recolección de RSU en el Barrio Centro, a través de un cambio del servicio actual; primeramente en el almacenamiento temporal de los RSU, y luego en la recolección y transporte de los mismos. Buscando así poder eliminar más del 69% de residuos por carro recolector, y que el servicio brinde una cobertura del 100% al área de estudio.

7.1 Ubicación de Contenedores de RSU

7.1.1 Información de Entrada

7.1.1.1 Descripción de Contenedores

El presente estudio utiliza 2 tipos de contenedores para armar una solución en la propuesta de almacenamiento temporal. Ambos contenedores son estacionarios, con pedal de apertura y cierre de tapas amortiguado. Este tipo de contenedor es utilizado con equipos de carga lateral, compactadores y lavado.



Fuente: (Duque & Tul, 2012).

Figura 7.1 Contenedores Metálicos utilizados en el Ecuador

En la figura 7.1 se puede ver como luce uno de estos contenedores, que pueden venir de varios colores y distintos materiales. Estos pueden ser encontrados dentro del Ecuador, más no son elaborados nacionalmente. Agentes de servicio como Global Parts (Ambato) y EMASEO (Quito) los utilizan como parte de sus soluciones de almacenamiento temporal. Las dimensiones pueden variar, pero el presente estudio utiliza contenedores de 2.4m³, y de 3.2m³ respectivamente, ver las dimensiones de los contenedores en el **Anexo 2**.

7.1.1.2 Características de la Demanda

La generación de residuos depende de los habitantes del área. Es así que la población del Barrio Centro se obtiene de conseguir el número de medidores de viviendas en 2015 a través de CNEL EP (Corporación Nacional de Electricidad Empresa Pública) en Esmeraldas; adicionalmente se obtiene el número promedio de habitantes por vivienda, de 3.78 (INEC, 2010). Esto da una población para el Barrio Centro de 15,630 habitantes para el 2015.

El último dato registrado de la generación de residuos del área de estudio per capita, como se mencionó anteriormente es de 0.798 kg/hab*día (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón de Esmeraldas, 2013). Por lo cual, asumiendo que la producción per cápita no ha cambiado para el 2015, se puede estimar una generación de 12 472.98 kg/día de RSU.

Tabla 7-1 Proyección de la Población del Barrio Centro 2015-2020

Proyección de la Población del Barrio Centro 2015-2020					
2015	2016	2017	2018	2019	2020
15630	16193	16776	17380	18006	18654

Sin embargo, sabiendo que se requiere la presente propuesta sea viable en el futuro se realiza una proyección de la población con una tasa de crecimiento anual de 3.60% (INEC, 2010); esta es la última tasa registrada en el último censo poblacional y la proyección dada para 5 años, asumiendo la misma tasa como se muestra en la tabla 7.1. Adicionalmente, gracias a las proyecciones realizadas por el Banco Mundial, se registra que dada la situación para el 2020 habrá una producción per capital del 1.49 kg/hab*día a nivel nacional (The World Bank, 2012). Entonces para el Barrio Centro se estima una generación de RSU para el 2020 de 27 794.08 kg/día de RSU.

Para el modelamiento se considera que los clientes del Barrio Centro son cada una de las manzanas que lo componen, que es donde están ubicadas las diferentes viviendas. Como se explicó anteriormente la generación de residuos por manzana se la pudo obtener al determinar el número de viviendas y habitantes en las mismas. En el **Anexo 3** se encuentra la codificación de las manzanas y la demanda de las mismas tanto en kg, como en litros. Los clientes cuentan con coordenadas de ubicación en el área de estudio, que corresponde al centro de gravedad de cada manzana, ver **Anexo 4**.

7.1.1.3 Requerimiento de Capacidad de Almacenamiento de RSU

El presente estudio toma como base y guía la investigación de campo previamente realizada, y en específico las prácticas de los cantones que hacen uso de contenedores de residuos (EMASEO, 2014). Es así que se considera dos tipos de contenedores de diferente capacidad: 2400 y 3200 lt (EMASEO, 2014). La cantidad mínima necesaria de los mismos se

determinó de acuerdo a la cantidad de residuos total generada del área de estudio calculada previamente (Guerra, 2015).

Tabla 7-2 Cantidad de Contenedores para el 2020

Cantidad Contenedores para el 2020		
Tipo de Contenedores	Contenedores CMR de [lt]	Contenedores CMR de [lt]
	3200	2400
Cantidad de Contenedores	49	65

Es así que la tabla 7-2 indica que para los 27 794.08 kg/día de RSU que se generarían por día en el 2020, que equivalen a 153 813.41 lt., se necesitaran 49 contenedores metálicos de 3200 lt., o 65 contenedores metálicos de 2400 lt, mínimo de forma respectiva.

7.1.1.4 Características de Puntos de Servicio



Elaboración Propia

Figura 7.2 Puntos candidatos de servicio

Los puntos candidatos donde pueden ir ubicados los contenedores se los escogió con criterios utilizados en casos similares (Chalkias & Lasaridi, 2009); ya que de la misma forma, con ayuda de las herramientas de Sistemas de Información Geográfica (*GIS*, siglas en ingles), se eligen de preferencia las intersecciones viales, por la ventaja que muestran sobre el espacio de servicio, y accesibilidad, como se ve en a figura 7.2. Las intersecciones viales

cuenta con 4 o 3 esquinas de las diferentes manzanas, dando una disponibilidad espacial para personas que circulan aceras y carreteras; y permite ubicar a más de un contenedor por intersección. Adicionalmente, hay un mayor acceso para posterior recolección de los mismos, en lo que corresponde a vehículos recolectores. En total hay 88 puntos de servicio ver **Anexo 5**.

Los puntos servicio candidatos cuentan con coordenadas de ubicación en el área de estudio, que corresponden al centro de gravedad de cada intersección, ver **Anexo 5**. Las coordenadas de estos puntos permiten calcular la distancia que tendrán que transitar los clientes hacia su contenedor más cercano, de forma correspondiente.

7.1.2 Formulación

Para el caso de los contenedores de 2400 lt. el modelo consiste en 66 clientes (manzanas), de 88 puntos candidatos para poder ubicar 65 contenedores, que se convierten en puntos de servicio. El criterio de optimización es ubicar los contenedores, minimizando la distancia recorrida por los clientes (la cual es la distancia del centro de gravedad de cada manzana hacia el punto de servicio); asegurando que todos los RSU sean recogidos, y que todos los clientes tengan acceso a un punto de servicio disponible. Es así que el problema se lo plantea de la siguiente forma:

$$\text{Minimizar: } Z = \sum_{i=1}^{66} \sum_{j=1}^{88} w_i d_{ij} Y_{ij} \quad (11)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^{88} Y_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, 66 \quad (12)$$

$$X_j - Y_{ij} \geq 0, \quad i = 1, \dots, 66; \quad j = 1, \dots, 88; \quad i \neq j \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^{88} X_{jj} = 65 \quad (14)$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad X_{jj} \in \{0, 1\} \quad (15)$$

Donde (11) minimiza la distancia (costo), por el peso de la cantidad de demanda, total entre el punto de demanda, y los puntos donde irá ubicada la instalación de servicio. Restricciones (12) aseguran que el punto de demanda sea asignado al punto de servicio más cercano solamente. Restricciones (13) aseguran que el punto de demanda sea asignado a un punto de servicio que halla sido abierto. Restricciones (14) aseguran que el número de puntos de servicio abierto sea solo p . Y la restricción (15) impone las variables binarias (Drezner & Hamacher, 2004).

Y en el caso de los contenedores de 3200 lt. el modelo consiste en 66 clientes (manzanas), de 88 puntos candidatos para poder ubicar 49 contenedores de 3200 lt, que se convierten en puntos de servicio. El criterio de optimización es ubicar los contenedores, minimizando la distancia recorrida por los clientes (la cual es la distancia del centro de gravedad de cada manzana hacia el punto de servicio); asegurando que todos los RSU sean recogidos, y que todos los clientes tengan acceso a un punto de servicio disponible.

Es así que el problema se lo plantea de la siguiente forma:

$$\text{Minimizar: } \sum_{i=1}^{66} \sum_{j=1}^{88} w_i d_{ij} Y_{ij} \quad (16)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^{88} Y_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, 66 \quad (17)$$

$$X_j - Y_{ij} \geq 0, \quad i = 1, \dots, 66; \quad j = 1, \dots, 88; \quad i \neq j \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^{88} X_{jj} = 49 \quad (19)$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad X_{jj} \in \{0, 1\} \quad (20)$$

Donde (16) minimiza la distancia (costo), por el peso de la cantidad de demanda, total entre el punto de demanda, y los puntos donde irá el ubicada la instalación de servicio. Restricciones (17) aseguran que el punto de demanda sea asignado al punto de servicio más cercano solamente. Restricciones (18) aseguran que el punto de demanda sea asignado a un punto de servicio que halla sido abierto. Restricciones (19) aseguran que el número de puntos de servicio abierto sea solo p . Y la restricción (20) impone las variables binarias (Drezner & Hamacher, 2004).

7.1.2.1 Formación de Conglomerados

Para la resolución de los problemas p-median antes detallados se forma conglomerados de acuerdo a la cantidad de contenedores. El número mínimo de contenedores de 2400 lt, y 3200 lt, crean dos variaciones del mismo problema de ubicación. En el primer caso el problema es segmentado en 65 conglomerados, que equivale al mínimo número de contenedores de 2400 lt. requeridos, con k-medias, y luego cada uno de los 65 conglomerados se vuelve un problema de p-median. Para el segundo caso el problema es segmentado en 49 conglomerados, que equivale al mínimo número de contenedores de 3200 lt. requeridos, con k-medias, y luego cada uno de los 49 conglomerados se vuelve un problema de p-median.

Cuando se formula los problemas para ubicar los contenedores de 2400 lt, los primeros 64 clientes se convierten en los primeros 64 conglomerados, y el cliente 65 y 66 se convierten en un solo conglomerado, el conglomerado 65; es decir para el 65 y 66 solo les corresponde 1 contenedor, y el mismo conglomerado pasa a ser el p-median capacitado más grande del grupo, con 2 clientes y 6 puntos candidatos a volverse puntos de servicio, ver **Anexo 6**.

Cuando se formula los problemas para ubicar los contenedores de 3200 lt. los primeros 41 clientes se convierten en los primeros 41 conglomerados; posteriormente, los clientes 42, 47, 48 son el conglomerado 42; los clientes 43 y 44 son el conglomerado 43; los clientes 45, 46, 54 y 56 son el conglomerado 44; los clientes 62 y 66 son el conglomerado 45; los clientes 56, 57, 60, 61 son el conglomerado 46; los clientes 59, 63, 64, 65 son el conglomerado 47; los clientes 51, 52, 53, 58 son el conglomerado 48; los clientes 49, 50 son el conglomerado 49, ver **Anexo 6**. De igual manera, a cada uno de los conglomerados le corresponde 1 solo

contenedor a ser asignado, donde dependiendo de su tamaño, varían el número de clientes y el número de puntos de servicio en donde puede ser ubicado un punto de servicio.

7.1.2.2 Contenedores de 2400 lt.

7.1.2.2.1 Parte 1a

Los primeros 64 conglomerados fueron resueltos, cada uno, con el siguiente planteamiento ya que tienen el mismo número de clientes y el mismo número de puntos de servicio disponibles que pueden abrirse:

$$\text{Minimizar: } \sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^4 w_i d_{ij} Y_{ij} \quad (21)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^4 Y_{ij} = 1, \quad i = 1 \quad (22)$$

$$X_{jj} - Y_{ij} \geq 0, \quad i = 1; \quad j = 1, \dots, 4; \quad i \neq j \quad (23)$$

$$\sum_{j=1}^4 X_{jj} = 1 \quad (24)$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad X_{jj} \in \{0, 1\} \quad (25)$$

Donde (21) minimiza la distancia, por el peso de la cantidad de demanda, total entre el punto de demanda, y los puntos donde irá el ubicada la instalación de servicio. Restricciones (22) aseguran que el cliente sea asignado al punto de servicio más cercano solamente.

Restricciones (23) aseguran que el cliente sea asignado a un punto de servicio que halla sido abierto. Restricciones (24) aseguran que el número de puntos de servicio abierto sea solo 1. Y la restricción (25) impone las variables binarias.

7.1.2.2.2 Parte 1b

El conglomerado 65 compuesto por el cliente 65 y 66, tuvo un planteamiento donde aumentan los puntos disponibles que pueden convertirse en puntos de servicio abiertos. El conglomerado tiene 2 clientes, sin embargo se convierte en 1 sólo, con 6 puntos de servicio candidatos:

$$\text{Minimizar: } \sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^6 w_i d_{ij} Y_{ij} \quad (26)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^6 Y_{ij} = 1, \quad i = 1 \quad (27)$$

$$X_{jj} - Y_{ij} \geq 0, \quad i = 1; \quad j = 1, \dots, 6; \quad i \neq j \quad (28)$$

$$\sum_{j=1}^6 X_{jj} = 1 \quad (29)$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad X_{jj} \in \{0, 1\} \quad (30)$$

Donde (26) minimiza la distancia, por el peso de la cantidad de demanda, total entre el punto de demanda, y los puntos donde irá el ubicada la instalación de servicio. Restricciones

(27) aseguran que el cliente sea asignado al punto de servicio más cercano solamente. Restricciones (28) aseguran que el cliente sea asignado a un punto de servicio que halla sido abierto. Restricciones (29) aseguran que el número de puntos de servicio abierto sea solo 1. Y la restricción (30) impone las variables binarias.

7.1.2.3 Contenedores de 3200 lt.

7.1.2.3.1 Parte 2a

Los primeros 41 conglomerados fueron resueltos, cada uno, con el planteamiento de las ecuaciones (21), (22), (23), (24), (25), que fueron descritas anteriormente. Este problema tiene 1 cliente y 4 puntos disponibles para convertirse en puntos de servicio.

7.1.2.3.2 Parte 2b

El conglomerado 43, compuesto por los clientes 43 y 44; el conglomerado 45 compuesto por los clientes 62 y 66; y el conglomerado 49 compuesto por los clientes 49 y 50 tuvieron un planteamiento donde aumentan los puntos disponibles, que pueden convertirse en puntos de servicio abiertos, a 6. El modelo se plantea con las ecuaciones (26), (27), (28), (29) y (30), que fueron descritas anteriormente. Este problema tiene 1 cliente y 6 puntos disponibles para convertirse en puntos de servicio.

7.1.2.3.3 Parte 2c

El conglomerado 42, compuesto por los clientes 42, 47, y 48, y el conglomerado 44 compuesto por los clientes 45, 46, 54, y 55 tuvo un planteamiento donde aumentan los puntos disponibles que pueden convertirse en puntos de servicio abiertos. Este problema tiene 1 cliente y 8 puntos disponibles para convertirse en puntos de servicio. El modelo tiene el siguiente planteamiento:

$$\text{Minimizar: } \sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^8 w_i d_{ij} Y_{ij} \quad (31)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^8 Y_{ij} = 1, \quad i = 1 \quad (32)$$

$$X_{jj} - Y_{ij} \geq 0, \quad i = 1; \quad j = 1, \dots, 8; \quad i \neq j \quad (33)$$

$$\sum_{j=1}^8 X_{jj} = 1 \quad (34)$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad X_{jj} \in \{0, 1\} \quad (35)$$

Donde (31) minimiza la distancia, por el peso de la cantidad de demanda, total entre el punto de demanda, y los puntos donde irá ubicada la instalación de servicio. Restricciones (32) aseguran que el cliente sea asignado al punto de servicio más cercano solamente. Restricciones (33) aseguran que el cliente sea asignado a un punto de servicio que halla sido abierto. Restricciones (34) aseguran que el número de puntos de servicio abierto sea solo 1. Y la restricción (35) impone las variables binarias.

7.1.2.3.4 Parte 2d

El conglomerado 46, compuesto por los clientes 56, 57, 60, 61 aumentan los puntos disponibles que pueden convertirse en puntos de servicio abiertos. Este problema tiene 1 cliente y 9 puntos disponibles para convertirse en puntos de servicio. El modelo tiene el siguiente planteamiento:

$$\text{Minimizar: } \sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^9 d_{ij} Y_{ij} \quad (36)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^9 Y_{ij} = 1, \quad i = 1 \quad (37)$$

$$X_{jj} - Y_{ij} \geq 0, \quad i = 1; \quad j = 1, \dots, 9; \quad i \neq j \quad (38)$$

$$\sum_{j=1}^9 X_{jj} = 1 \quad (39)$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad X_{jj} \in \{0, 1\} \quad (40)$$

Donde (36) minimiza la distancia, por el peso de la cantidad de demanda, total entre el punto de demanda, y los puntos donde irá ubicada la instalación de servicio. Restricciones (37) aseguran que el cliente sea asignado al punto de servicio más cercano solamente. Restricciones (38) aseguran que el cliente sea asignado a un punto de servicio que halla sido abierto. Restricciones (39) aseguran que el número de puntos de servicio abierto sea solo 1. Y la restricción (40) impone las variables binarias.

7.1.2.3.1 Parte 2e

El conglomerado 47, compuesto por los clientes 59, 63, 64 y 65; y el conglomerado 48, compuesto por los clientes 51, 52, 53, 58, aumentan los puntos disponibles que pueden convertirse en puntos de servicio abiertos. Este problema tiene 1 cliente y 10 puntos

disponibles para convertirse en puntos de servicio. El modelo tiene el siguiente planteamiento:

$$\text{Minimizar: } \sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^{10} d_{ij} Y_{ij} \quad (41)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^{10} Y_{ij} = 1, \quad i = 1 \quad (42)$$

$$X_{jj} - Y_{ij} \geq 0, \quad i = 1; \quad j = 1, \dots, 9; \quad i \neq j \quad (43)$$

$$\sum_{j=1}^{10} X_{jj} = 1 \quad (44)$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad X_{jj} \in \{0, 1\} \quad (45)$$

Donde (41) minimiza la distancia, por el peso de la cantidad de demanda, total entre el punto de demanda, y los puntos donde irá ubicada la instalación de servicio. Restricciones (42) aseguran que el cliente sea asignado al punto de servicio más cercano solamente. Restricciones (43) aseguran que el cliente sea asignado a un punto de servicio que halla sido abierto. Restricciones (44) aseguran que el número de puntos de servicio abierto sea solo 1. Y la restricción (45) impone las variables binarias.

7.1.3 Resultados.

Tabla 7-3 Resultados de los 2 casos mostrando los puntos de servicios disponibles

Caso	Tipo de Contenedor	Puntos de Servicio donde irán contenedores	Número Total de Puntos de Servicio Abiertos
k=65	2400 lt. (2.4m ³)	2, 3, 4, 5, 7, 9, 15, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 34, 35, 36, 37, 39, 42, 43, 45, 46, 47, 49, 51, 52, 53, 56, 58, 59, 60, 63, 64, 66, 69, 70, 71, 72, 74, 76, 78, 79, 82, 84	51
k=49	3200 lt. (3.2m ³)	2, 3, 4, 5, 7, 9, 15, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 34, 35, 36, 37, 39, 42, 43, 45, 46, 47, 52, 53, 56, 58, 60, 63, 66, 70, 75, 81, 83	41

Elaboración Propia.

7.1.3.1 Contenedores de 2400lt.

El problema p-median fue segmentado con la formación de conglomerados, y fue resuelto con ayuda de la heurísticas k-medias y la VNS, probadas anteriormente en la revisión literaria (Kaveh, Sabzevari, & Sahraeian, 2010; Figueiredo, O'Kelly, & Pizzolato, 2013). Los contenedores de 2.4m³. fueron ubicados de tal forma que ha cada conglomerado le tocó 1 contenedor. Por lo tanto como hubo 65 conglomerados, también hubo 65 contenedores ubicados, ver **Anexo 7**, con los resultados del VNS para cada conglomerado.

Tabla 7-4 Resultados totales en la ubicación de 65 contenedores de 2400 lt.

TOTAL	Demanda [m ³]	Número de Contenedores	Distancia Total Recorrida [km]	Función Objetivo
	153.81	65	4.22	10.163

Elaboración Propia.

Se cumple con la demanda total del área de estudio ya que con 65 contenedores de 2.4m³ se puede almacenar la generación de RSU en su totalidad. Además, la tabla 7.4

también muestra la distancia recorrida total de 4.22 km, y una función objetivo de 10.163, que corresponde a la distancia mínima, por el peso de la cantidad de demanda, total entre el punto de demanda, y los puntos donde irá ubicada la instalación de servicio, ver **Anexo 7**.

7.1.3.2 Contenedores de 3200lt.

El problema p-median fue segmentado con la formación de conglomerados, y fue resuelto con ayuda de la heurísticas k-medias y el VNS, probadas anteriormente en la revisión literaria (Kaveh, Sabzevari, & Sahraeian, 2010; Figueiredo, O'Kelly, & Pizzolato, 2013). Los contenedores de 3.2m³ fueron ubicados de tal forma que ha cada conglomerado le tocó 1 contenedor. Por lo tanto como hubo 49 conglomerados, también hubo 49 contenedores ubicados, ver **Anexo 8**, con los resultados del VNS para cada conglomerado.

Tabla 7-5 Resultados totales en la ubicación de 65 contenedores de 2400 lt.

TOTAL	Demanda [m³]	Número de Contenedores	Distancia Total Recorrida [km]	Función Objetivo
	153.81	49	3.32	12.107

Elaboración Propia.

Se puede ver que se cumple con la demanda total del área de estudio ya que con 49 contenedores de 3.2m³ se puede almacenar la generación de RSU en su totalidad. Además, la tabla 7.5 también muestra la distancia recorrida total de 3.32km, y una función objetivo de 12.107, que corresponde a la distancia mínima, por el peso de la cantidad de demanda, total entre el punto de demanda, y los puntos donde irá ubicada la instalación de servicio, ver **Anexo 8**.

7.2 Rutas de Recolección de RSU

7.2.1 Información de Entrada

7.2.2 Características de Vehículo Recolector

El presente estudio utiliza 1 tipo de vehículo para armar una solución en la propuesta de recolección y transporte de RSU. Este vehículo cuenta con un cabezal y tiene una caja recolectora cerrada desmontable. Además, permite el alzado lateral de contenedores como los descritos previamente y que se utilizan en el estudio.



Fuente: Empresa Themac, 2015

Figura 7.3 Vehículo Recolector de Residuos

En la figura 7.2 se puede ver como luce un vehículo recolector utilizado en este estudio. Estos pueden ser encontrados dentro del Ecuador, más no son elaborados nacionalmente. Agentes de servicio como Global Parts (Ambato) y EMASEO (Quito) los utilizan como parte de sus soluciones de recolección y transporte de RSU. Las dimensiones pueden variar, pero el presente estudio utiliza un compactador con capacidad para 23m^3 , ver dimensiones en **Anexo 9**.

7.2.2.1 Características de la Demanda

Los RSU que serán recolectados son todos los que se encuentran en los contenedores previamente definidos. Para el primer caso, se encuentra a 65 contenedores de 2.4 m^3 (2400 lt), cada uno, ubicados en el área de estudio. Y para el segundo caso se encuentra a 49 contenedores de 3.2 m^3 (3200 lt). cada uno, ubicado en el área de estudio. Se asume que cada uno de estos contenedores es utilizado al 100%, por lo tanto, se recolectan, 156 m^3 (que es la suma total de 65 contenedores de 2.4 m^3) para el primer caso, y 156.8 m^3 (que es la suma total de 49 contenedores de 3.2 m^3).

Cada uno de los contenedores son considerados los clientes del servicio de recolección. Estos son visitados en las diferentes rutas, y su ubicación está dada en coordenadas de latitud y longitud antes mencionadas, en el mapa se los puede ver en el **Anexo 10**. Las distancias entre unos y otros está dada por los desplazamientos en vehículo de un punto a otro. En un punto de coordenadas (intersecciones) puede haber más de un contenedor a ser recolectado, por cual se lo llama punto de servicio.

7.2.2.2 Requerimiento de Recolector de RSU

Para el presente estudio se utiliza un vehículo recolector de 23 m^3 , el cual visita a cada uno de los contenedores una sola vez, en una ruta determinada. Para que esto suceda los puntos de servicio son divididos en subgrupos de acuerdo a la cercanía de los mismos, para que la cantidad de residuos total del área de estudio no sobrepase la del camión. El número de subgrupos obtenidos al recolectar contenedores de 2.4 m^3 es 8, y el número de subgrupos obtenidos al recolectar contenedores de 3.2 m^3 es 7, ver **Anexo 11**.

7.2.3 Formulación

La creación de rutas de recolección fue realizada en base al problema de TSP. Cada subgrupo de puntos de servicio debe generar una ruta, por lo tanto cada subgrupo cuenta con un problema del mismo tipo; sin embargo, para cada uno varía en algunos casos la cantidad de RSU a recolectar, y el número de puntos de servicio a visitar. El criterio de optimización es minimizar la distancia recorrida por el agente (recolector), visitando cada uno de los puntos de servicio especificados.

7.2.3.1 Contenedores de 2.4m³.

En el caso donde los puntos de servicio tienen contenedores de 2.4m³, se dan 4 diferentes planteamientos del TSP. Estos planteamientos varían en la cantidad de puntos de servicio. Se tiene un TSP de 2 puntos de servicio, 2 TSP de 6 puntos de servicio, 3 TSP de 7 puntos de servicio, 2 TSP de 8 puntos de servicio.

7.2.3.1.1 TSP de 2 Puntos de Servicio

$$\text{Minimizar: } \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 d_{ij} Y_{ij} \quad (46)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^3 Y_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, 3. \quad (47)$$

$$\sum_{j=1}^3 Y_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, 3. \quad (48)$$

$$Y_{ij} = 0, \text{ o } Y_{ij} = 1. \text{ Arcos } (i, j) \in A \quad (49)$$

$$u_i - u_j \leq n(1 - Y_{ij}) - 1, \quad (i, j) \in A, i \neq j, j \neq i, j \neq 1 \quad (50)$$

Donde (46) minimiza la distancia recorrida por el agente recolector al visitar los puntos de servicio 1 sola vez. (47) y (48) son llamadas restricciones de nivel, y se aseguran de que el agente tenga una sola entrada y una sola salida a cada nodo. La restricción (49) es una restricción de no negatividad, ya que Y_{ij} es una variable binaria de decisión. Y (50) es la restricción del modelo que previene la formación de subtoures. Para este problema la matriz de distancia d_{ij} y las coordenadas de cada punto de servicio están en el **Anexo 12**.

7.2.3.1.2 TSP de 6 Puntos de Servicio

$$\text{Minimizar: } \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^7 d_{ij} Y_{ij} \quad (51)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^7 Y_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, 7. \quad (52)$$

$$\sum_{j=1}^7 Y_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, 7. \quad (53)$$

$$Y_{ij} = 0, \text{ o } Y_{ij} = 1. \text{ Arcos } (i, j) \in A \quad (54)$$

$$u_i - u_j \leq n(1 - Y_{ij}) - 1, \quad (i, j) \in A, i \neq j, j \neq i, j \neq 1 \quad (55)$$

El subgrupo 2 y 6 se modelan de esta forma, ya que incluyen a 6 puntos de servicio, y el punto de ubicación del relleno sanitario, que es donde inicia y termina la ruta generada por este problema. Donde (51) minimiza la distancia recorrida por el agente recolector al visitar los puntos de servicio 1 sola vez. (52) y (53) son llamadas restricciones de nivel, y se aseguran de que el agente tenga una sola entrada y una sola salida a cada nodo. La restricción (54) es una restricción de no negatividad, ya que Y_{ij} es una variable binaria de decisión. Y (55) es la restricción del modelo que previene la formación de subtoures. Para estos problemas la matriz de distancia d_{ij} y las coordenadas de cada punto de servicio están en el **Anexo 12**.

7.2.3.1.3 TSP de 7 Puntos de Servicio

$$\text{Minimizar: } \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^8 d_{ij} Y_{ij} \quad (56)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^8 Y_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, 8. \quad (57)$$

$$\sum_{j=1}^8 Y_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, 8. \quad (58)$$

$$Y_{ij} = 0, \text{ o } Y_{ij} = 1. \text{ Arcos } (i, j) \in A \quad (59)$$

$$u_i - u_j \leq n(1 - Y_{ij}) - 1, \quad (i, j) \in A, i \neq j, j \neq i, j \neq 1 \quad (60)$$

El subgrupo 1, 4 y 7 se modelan de esta forma, ya que incluyen a 7 puntos de servicio, y el punto de ubicación del relleno sanitario, que es donde inicia y termina la ruta generada por este problema. Donde (56) minimiza la distancia recorrida por el agente recolector al visitar los puntos de servicio 1 sola vez. (57) y (58) son llamadas restricciones de nivel, y se aseguran de que el agente tenga una sola entrada y una sola salida a cada nodo. La restricción (59) es una restricción de no negatividad, ya que Y_{ij} es una variable binaria de decisión. Y (60) es la restricción del modelo que previene la formación de subtoures. Para estos problemas la matriz de distancia d_{ij} y las coordenadas de cada punto de servicio están en el **Anexo 12**.

7.2.3.1.4 TSP de 8 Puntos de Servicio

$$\text{Minimizar: } \sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^9 d_{ij} Y_{ij} \quad (61)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^9 Y_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, 9. \quad (62)$$

$$\sum_{j=1}^9 Y_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, 9. \quad (63)$$

$$Y_{ij} = 0, \text{ o } Y_{ij} = 1. \text{ Arcos } (i, j) \in A \quad (64)$$

$$u_i - u_j \leq n(1 - Y_{ij}) - 1, \quad (i, j) \in A, i \neq j, j \neq i, j \neq 1 \quad (65)$$

El subgrupo 3 y 5 se modelan de esta forma, ya que incluyen a 8 puntos de servicio, y el punto de ubicación del relleno sanitario, que es donde inicia y termina la ruta generada por este problema. Donde (61) minimiza la distancia recorrida por el agente recolector al visitar los puntos de servicio 1 sola vez. (62) y (63) son llamadas restricciones de nivel, y se aseguran de que el agente tenga una sola entrada y una sola salida a cada nodo. La restricción (64) es una restricción de no negatividad, ya que Y_{ij} es una variable binaria de decisión. Y (65) es la restricción del modelo que previene la formación de subtours. Para estos problemas la matriz de distancia d_{ij} y las coordenadas de cada punto de servicio están en el **Anexo 12**.

7.2.3.2 Contenedores de 3.2m³

En el caso donde los puntos de servicio tienen contenedores de 3.2m³, se dan 3 diferentes planteamientos del TSP. Estos planteamientos varían en la cantidad de puntos de servicio. Se tiene 3 TSP de 5 puntos de servicio, 2 TSP de 6 puntos de servicio, y 2 TSP de 7 puntos de servicio.

7.2.3.2.1 TSP de 5 Puntos de Servicio

$$\text{Minimizar: } \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 d_{ij} Y_{ij} \quad (66)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^6 Y_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, 6. \quad (67)$$

$$\sum_{j=1}^6 Y_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, 6. \quad (68)$$

$$Y_{ij} = 0, \text{ o } Y_{ij} = 1. \text{ Arcos } (i, j) \in A \quad (69)$$

$$u_i - u_j \leq n(1 - Y_{ij}) - 1, \quad (i, j) \in A, i \neq j, j \neq i, j \neq 1 \quad (70)$$

El subgrupo 2, 3 y 5 se modelan de esta forma, ya que incluyen a 5 puntos de servicio, y el punto de ubicación del relleno sanitario, que es donde inicia y termina la ruta generada por este problema. Donde (66) minimiza la distancia recorrida por el agente recolector al visitar los puntos de servicio 1 sola vez. (67) y (68) son llamadas restricciones de nivel, y se aseguran de que el agente tenga una sola entrada y una sola salida a cada nodo. La restricción (69) es una restricción de no negatividad, ya que Y_{ij} es una variable binaria de decisión. Y (70) es la restricción del modelo que previene la formación de subtours. Para

estos problemas la matriz de distancia d_{ij} y las coordenadas de cada punto de servicio están en el **Anexo 13**.

7.2.3.2.2 TSP de 6 Puntos de Servicio

El subgrupo 1 y 4 se modelan de esta forma, ya que incluyen a 6 puntos de servicio, y el punto de ubicación del relleno sanitario, que es donde inicia y termina la ruta generada por este problema. Donde (51) minimiza la distancia recorrida por el agente recolector al visitar los puntos de servicio 1 sola vez. (52) y (53) son llamadas restricciones de nivel, y se aseguran de que el agente tenga una sola entrada y una sola salida a cada nodo. La restricción (54) es una restricción de no negatividad, ya que Y_{ij} es una variable binaria de decisión. Y (55) es la restricción del modelo que previene la formación de subtours. Para estos problemas la matriz de distancia d_{ij} y las coordenadas de cada punto de servicio están en el **Anexo 13**.

7.2.3.2.3 TSP de 7 Puntos de Servicio

El subgrupo 6 y 7 se modelan de esta forma, ya que incluyen a 7 puntos de servicio, y el punto de ubicación del relleno sanitario, que es donde inicia y termina la ruta generada por este problema. Donde (56) minimiza la distancia recorrida por el agente recolector al visitar los puntos de servicio 1 sola vez. (57) y (58) son llamadas restricciones de nivel, y se aseguran de que el agente tenga una sola entrada y una sola salida a cada nodo. La restricción (59) es una restricción de no negatividad, ya que Y_{ij} es una variable binaria de decisión. Y (60) es la restricción del modelo que previene la formación de subtours. Para estos problemas la matriz de distancia d_{ij} y las coordenadas de cada punto de servicio están en el **Anexo 13**.

7.2.4 Resultados

7.2.4.1 Contenedores de 2.4m³

Para cada uno de los 8 subgrupos de puntos de servicios formados, se crearon rutas con la resolución de los diferentes planteamientos del TSP; estos se resolvieron con ayuda de la heurística Branch And Bound de LINGO ver **Anexo 14** donde está el código en lenguaje Algebraico de Modelado para LINGO. Las rutas incluyen a todos los puntos de servicio y se aseguran de visitar cada uno de ellos una sola vez.

Tabla 7-6 Resultados de las 8 Rutas obtenidas en LINGO para la Recolección de RSU con contenedores de 2.4m³

Número de ruta	Secuencia	Distancia
1	RS, 7, 5, 2, 3, 4, 15, 9, RS	6,512
2	RS, 23, 22, 20, 19, 18, 17, RS	6,224
3	RS, 24, 31, 30, 26, 29, 28, 27, 34, RS	6,223
4	RS, 43, 42, 39, 45, 37, 36, 35, RS	6,444
5	RS, 46, 47, 58, 56, 53, 52, 51, 49, RS	7,376
6	RS, 59, 60, 64, 66, 69, 63, RS	5,373
7	RS, 70, 71, 72, 78, 76, 74, 79, RS	7,806
8	RS, 84, 82, RS	7,8
DISTANCIA TOTAL RECORRIDA:		53.758

En la tabla 7.5 se puede ver cada una de las rutas creadas, luego la secuencia en que se visitaran los puntos de servicio y la distancia recorrida mínima por cada una de ellas. Es así que se obtiene una distancia total de recorrido, en la recolección de los 65 contenedores de 2.4m³ ubicados en los 51 puntos de servicio, de 53.758km. La generación de cada una de las

rutas muestran una buena solución de la heurística aplicada por el software, ver solución de LINGO de cada problema en el **Anexo 15**.

7.2.4.2 Contenedores de 3.2m³

Para cada uno de los 7 subgrupos de puntos de servicios formados, se crearon rutas con la resolución de los diferentes planteamientos del TSP; estos se resolvieron con ayuda de la heurística Branch And Bound de LINGO, ver **Anexo 14** donde está el código en lenguaje Algebraico de Modelado para LINGO. Las rutas incluyen a todos los puntos de servicio y se aseguran de visitar cada uno de ellos una sola vez.

Tabla 7-7 Resultados de las 7 Rutas para la Recolección de RSU con contenedores de 3.2m³

Número de ruta	Secuencia	Distancia
1	RS, 24, 23, 5, 4, 3, 2, RS	5,729
2	RS, 7, 17, 15, 9, 31, RS	7,025
3	RS, 22, 27, 20, 19, 18, RS	6,132
4	RS, 36, 35, 34, 29, 30, 28, RS	6,833
5	RS, 39, 37, 43, 42, 26, RS	5,980
6	RS, 52, 53, 56, 47, 58, 46, 45, RS	7,009
7	RS, 60, 70, 66, 63, 83, 81, 75, RS	8,342
DISTANCIA TOTAL RECORRIDA:		47.05

En la tabla 7.6 se puede ver cada una de las rutas creadas, luego la secuencia en que se visitaran los puntos de servicio y la distancia recorrida mínima por cada una de ellas. Es así que se obtiene una distancia total de recorrido, en la recolección de los 49 contenedores de 3.2m³ ubicados en los 41 puntos de servicio, de 47.05km. La generación de cada una de las

rutas muestran una buena solución de la heurística aplicada por el software, ver solución de LINGO de cada problema en el **Anexo 16**.

8 CAPÍTULO 8.- ANÁLISIS DE LA PROPUESTA

8.1 Análisis de sensibilidad

En la resolución de ubicación de contenedores se pudo identificar que se asigna a cada conglomerado solamente 1 contenedor, ya sea este de 2.4m^3 , o de 3.2m^3 . Ambos casos permitieron satisfacer la demanda del área total de estudio según los valores de generación de RSU estimados; y en ambos casos se da un porcentaje de subutilización que permite un pequeño excedente de capacidad, y que el número de contenedores asignados sea el mínimo.

Al asignar a cada conglomerado 1 solo contenedor a través del P-median, se pudo notar que si, dado el caso, los conglomerados estuviesen aislados uno de otro, los contenedores asignados no cumplirían con la demanda existente. Por ejemplo, en el caso de los contenedores de 2.4m^3 , el conglomerado 19 de este problema genera 2.7m^3 de RSU aproximadamente; si este conglomerado solo tuviese acceso a ese único contenedor que se le asignó, el contenedor fallaría su función, ya que tendría excedentes.

Es así que se realiza un aumento de contenedores para cada uno de los conglomerados que su generación de RSU sobrepasa la capacidad de su contenedor asignado. Por ejemplo, el conglomerado 19 antes mencionado, ya no sólo tendrá un contenedor, si no 2 contenedores que permitirán que todos sus RSU sean almacenados. Este aumento se realiza en el mismo punto de servicio habilitado para este mismo conglomerado.

Tabla 8-1 Resultados del Análisis de Sensibilidad

Opción	Tipo de Depósito	Número de depósitos extra	Número Total de Depósitos	Porcentaje del incremento en capacidad	Capacidad Total
1	2.4m ³	34	99	52%	237.6m ³
2	3.2m ³	16	65	34.7%	208.2m ³

8.1.1 Contenedores de 2400lt.

Para el caso de los contenedores de 2400 lt. al realizar este ajuste se asignan 34 contenedores adicionales a los ya existentes 65, que equivale a un aumento del 52% de capacidad de almacenamiento en la zona de estudio. Estos contenedores son ubicados en aquellos puntos de servicio donde los conglomerados sobrepasan la capacidad de almacenamiento previamente asignada, ver **Anexo 17**.

En el caso de no aumentar los 34 contenedores, se cumple en totalidad la demanda del área de estudio; sin embargo, como se mencionó anteriormente, si se toma a cada conglomerado como un problema aislado de los demás, la generación de RSU actual de 30 de los 65 conglomerados existentes, sobrepasaría la capacidad de almacenamiento que tienen a disposición de forma individual. Este aumento no se refleja a la configuración de los puntos de servicio habilitados, pues estos siguen siendo los mismos.

8.1.2 Contenedores de 3200lt.

Para el caso de los contenedores de 3200 lt. al realizar este ajuste se asignan 16 contenedores adicionales a los ya existentes 49, que equivale a un aumento del 34.7% de capacidad de almacenamiento en la zona de estudio. Estos contenedores son ubicados en

aquellos puntos de servicio donde los conglomerados sobrepasan la capacidad de almacenamiento previamente asignada , ver **Anexo 17**.

En el caso de no aumentar los 16 contenedores, se cumple en totalidad la demanda del área de estudio; sin embargo, como se mencionó anteriormente, si se toma a cada conglomerado como un problema aislado de los demás, la generación de RSU actual de 8 de los 49 conglomerados existentes, sobrepasaría la capacidad de almacenamiento que tienen a disposición de forma individual. Así mismo, este aumento no afecta a la configuración de los puntos de servicio habilitados.

Al incrementar la cantidad de depósitos hay que hacer cambios en el transporte de RSU, ya que cada uno de los ATSP previamente resueltos asume que todos los depósitos son utilizados a su máxima capacidad. En el primer caso con 99 depósitos de 2.4m^3 cada uno y un vehículo de 23m^3 usado a su capacidad máxima, tendrá que realizar 11 rutas aproximadamente. Y para los 65 depósitos de 3.2m^3 de capacidad, un vehículo de 23m^3 usado a su capacidad máxima, tendrá que realizar 10 rutas aproximadamente. El problema de rutas es sensible al aumento de contenedores.

8.2 Análisis de los Resultados

8.2.1 Opción 1

Para esta opción se consideró contenedores de 2.4m^3 de capacidad, por lo que con una generación de residuos de 153.81m^3 estimada para el 2020, se necesitan 65 contenedores mínimo de este tipo para cubrir la demanda. Esta cantidad de contenedores provee una capacidad de 156m^3 , lo cual significa una subutilización de 1.4% de la capacidad disponible por ellos.

Con la resolución del problema p-median, de los 88 puntos de servicio candidatos se abrió 51, ubicando a los 65 contenedores. Esto permitió obtener una distancia mínima de recorrido por los clientes hacia los puntos de servicio de 4.22km en total. El cliente más lejano tiene que recorrer una distancia de 0.09km, y el cliente más cercano tiene que recorrer una distancia de 0.04km. La función objetivo fue menor comparada con la opción 2, y dio 10.16. Lo cual indica que es importante determinar el tipo de contenedor que se va a utilizar ya que la accesibilidad del cliente depende del mismo.

Luego se diseña 8 rutas con el ATSP; cada una de estas rutas fue creada con la asunción de que los contenedores son llenados a su máxima capacidad en 24h. Esta asunción hace que el vehículo recolector no se llene a su máxima capacidad. Por lo tanto, las rutas 1-7 tienen una subutilización de 6%, y la ruta 8 del 79%. La subutilización de la ruta 8 es alta, pues más de la mitad del vehículo recolector estará vacío. La distancia mínima total recorrida por el vehículo recolector es de 53.758, mayor a la opción 2. Este resultado muestra que la recolección incurrirá en mayores costos operativos de transporte en la recolección de RSU que la opción 2.

8.2.2 Opción 2

Para esta opción se consideró contenedores de 3.2m^3 de capacidad, por lo que con una generación de residuos de 153.81m^3 estimada para el 2020, se necesitan 49 contenedores mínimo de este tipo para cubrir la demanda. Esta cantidad de contenedores provee una capacidad de 156.8m^3 , lo cual significa una subutilización de 1.9% de la capacidad disponible por ellos.

Con la resolución del problema p-median, de los 88 puntos de servicio candidatos se abrió 41, ubicando a los 49 contenedores. Esto permitió obtener una distancia mínima de recorrido por los clientes hacia los puntos de servicio de 3.32km en total. El cliente más lejano tiene que recorrer una distancia de 0.14km, y el cliente más cercano tiene que recorrer una distancia de 0.04km. La función objetivo fue mayor comparada con la opción 1, y dio 12.108. Lo cual indica que hay una menor accesibilidad para el cliente.

Luego se diseña 7 rutas con el ATSP, ver **Anexo 18**; cada una de estas rutas fue creada con la asunción de que los contenedores son llenados a su máxima capacidad en 24h. Esta asunción hace que el vehículo recolector no se llene a su máxima capacidad. Por lo tanto, cada una de las 7 rutas tiene una subutilización del 3%. La distancia mínima total recorrida por el vehículo recolector es de 47.05km, menor a la opción 1. Este resultado muestra que la recolección incurrirá en menores costos operativos de transporte en la recolección de RSU que la opción 1.

Para demás análisis se utilizará la opción 2, ya que esta opción muestra reducción de recursos, y una menor subutilización de los mismos. La subutilización de los contenedores y el vehículo recolector pueden incurrir en mayor gastos operativos para un ente municipal. Esta propuesta busca que el ente municipal pertinente la encuentre útil para la toma de decisiones con respecto a la recolección de residuos en un futuro.

8.2.3 Otras consideraciones de la propuesta

Entre otras consideraciones se tiene al usuario, a los recolectores informales, y al aspecto estético. Como en todo sistema de recolección de RSU, se requiere que el usuario coopere, esto es que lleve sus residuos al lugar donde estará el contenedor, ahí radica la

importancia de educar al usuario. Se debe profundizar en una cultura de cambio que le permita al usuario adaptarse a un sistema como el de la presente propuesta.

Luego, colocar contenedores en la acera influencia la parte estética de la ciudad, puesto que un contenedor de RSU en la vereda interfiere con el campo visual, y puede influir en el flujo del peatón. Sin embargo, se pudo medir que la acera tiene un espacio 1.90m en el área de estudio. Esto quiere decir que el contenedor más grande, de 3.2m³, que ocupa 1.47m de espacio en la acera, dejaría un espacio para la circulación de los peatones de 0.40m.

Existe también consideraciones en lo que se refiere a recolectores informales, pues estos también deberían acatarse al nuevo sistema. Se cree que estos deben ser tomados en cuenta en la fase posterior a la recolección, que es la eliminación de RSU; ya que su objetivo es recolectar material reciclable con valor económico (plástico, vidrio, metal).

La propuesta utilizó dos tipos de contenedores, y un solo tipo de vehículo recolector, en base a lo observado en sistemas estacionarios de recolección dentro del país. Se hizo 2 opciones exclusivas de los recursos, como se mencionó anteriormente: opción 1 con contenedores de 2.4m³, y la opción 3.2m³, y en ambos casos un vehículo de 23m³ de consideró para el transporte de residuos. Sin embargo, a pesar de que este estudio no considera la opción de mezclar la contenedores de diferente capacidad, es posible crear una propuesta de este tipo.

Se realiza una asunción hecha en la utilización de la generación de residuos sólidos totales para el área de estudio. Sin embargo, en el análisis de sensibilidad se pudo ver que cada cuadra tiene una generación de residuos distinta, en algunos casos una demanda que requiere tener más de un depósito cercano. Como estudio preliminar esta situación no se

consideró como resultado final de la propuesta, pero esta cantidad puede ser integrada en un futuro, tanto para el problema de ubicación como el problema de recolección.

8.3 Situación Actual vs. Propuesta

Las características de la situación actual y la propuesta se pueden ver en la tabla 8.2. Ahí se puede ver que la propuesta muestra un cambio significativo, ya que cuenta con la utilización de depósitos para almacenar los RSU en la acera, antes de que estos sean recolectados. Además, la cobertura aumenta a un 100% en la zona centro, ya que la cantidad de residuos captada es mayor en la propuesta. El servicio de la situación actual se muestra deficiente al no atender a toda el área del barrio centro que corresponde al 0.616km² y a recorrer una distancia de 62.22km, que es mayor a la propuesta, con 47.05km. Se puede ver que se necesita menor cantidad de trabajadores en la propuesta, de los que actualmente laboran en la zona de estudio, puesto que el alzado de los contenedores para la propuesta desarrollada se considera mecanizado.

Tabla 8-2 Situación Actual vs. Propuesta

Características	Situación Actual	Propuesta
Requiere Cooperación del Usuario	Si	Si
Requiere horario de servicio	Si	No
Requiere depósitos para almacenamiento en acera	No	Si
• Número de depósitos		49 contenedores de 3.2m ³
Requiere mantenimiento de depósitos	No	Si
Cantidad de rutas de recolección	2	7 (Anexo 17)
Frecuencia de ruta de recolección	3 veces al día ruta longitudinal. 4 veces al día ruta transversal.	1 vez al día cada ruta.
Distancia recorrida por vehículo recolector	62.22km	47.05km
Cantidad de RSU recolectados	53.55m ³	153.81m ³
Área de Cobertura de Servicio	0.49km ²	0.616km ²
Porcentaje de cobertura	80%	100%
Tamaño de Cuadrilla por vehículo recolector	1 chofer, 3 cuadrilleros	1 chofer, 1 cuadrillero.
Cantidad de vehículos recolectores	2	1
Capacidad de cada vehículo recolector	7.65m ³	23m ³

Elaboración Propia

Se consideró que la frecuencia de las rutas de la situación actual se debe a la variación del servicio. El recolector al llenarse en un punto regresa al punto de inicio de la ruta para repetirla y así poder cubrir partes que tal vez no han sido atendidas por el incumplimiento de horarios. Es por eso que se puede ver una distancia recorrida mayor a la propuesta, a pesar de que la propuesta tiene más rutas.

En lo que se relaciona al vehículo recolector, en la propuesta se utilizó un vehículo con una capacidad mucho más alta, en vez de los 2 vehículos de una capacidad de 7.65m³ utilizados en la actualidad. Esto se llevó a cabo con la idea de considerar un vehículo que permita prever el peor escenario en el futuro; esto es una generación como la utilizada que es la generación de residuos para el 2020.

8.4 Impacto Económico

Se pudo estimar que el consumo de diesel por un camión recolector de 7.65m³ es de 17km/galón. El precio de la gasolina diesel esta en \$1.03 por galón; lo cual significa que recorriendo 1928.82km al mes (62.22km diarios), el costo de trasportar los RSU es de \$116.86 al mes. Por otro lado, un vehículo recolector de 23m³ tiene un consumo, con las características antes señaladas en la propuesta, de 15km/galón; si este recorre 1458.25km al mes (47.05km diarios), el costo de transportar los RSU es de \$100.15. Se determinó que la propuesta tendrá un ahorro del 14%.

9 CAPÍTULO 9.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 Conclusiones

- Se pudo cumplir con todos los objetivos que se plantearon inicialmente para la elaboración de este estudio, que fueron todos relacionados a la creación de una propuesta en el manejo de residuos; específicamente en proponer un almacenamiento temporal y recolección del mismo.
- Se pudo determinar el número de usuarios que habitan dentro de la zona geográfica de estudio, y la cantidad de residuos que generan con ayuda de datos provistos por la CNEL, el GADMCE y el INEC.
- También se pudo determinar el número de contenedores óptimos dada la población estimada para el 2020. Y se pudo plantear diferentes opciones en la propuesta por las características de los mismos.
- Se puede concluir que la cantidad de depósitos es sensible al tamaño de los mismos, ya que si tienen mayor capacidad estos serán menos en cantidad, y si tienen menor capacidad estos serán más en cantidad.
- El enfoque descrito en el presente estudio demuestra como es posible modelar la localización y el ruteo, para desarrollar estrategias óptimas que permitan resolver la ubicación y recolección de contenedores de residuos sólidos.
- El estudio utilizó el problema P-median para la ubicación de contenedores y el problema de ATSP para el ruteo de la recolección de residuos; con una población estimada para el año 2020, y con la infraestructura espacial actual del área del Barrio Centro en el Cantón Esmeraldas.

- La metodología aplicada permitió determinar ubicaciones óptimas para los contenedores, de tal forma que haya mayor accesibilidad y flexibilidad a la hora de llevar los residuos al lugar donde se tendrá los depósitos; y así mismo la metodología dejó que se determinaran rutas con distancias mínimas para recolectar los residuos y transportarlos a su lugar de disposición final.
- Se obtuvo 2 opciones de acuerdo al tamaño de los contenedores. En la primera opción con contenedores de 2.4m^3 se determinó que hay una mayor accesibilidad para el usuario; sin embargo la distancia recorrida por el vehículo recolector será mayor, y existirá un alto porcentaje de subutilización del mismo. En la opción 2 con contenedores de 3.2m^3 se determinó que hay una menor accesibilidad para el usuario; sin embargo, la distancia recorrida por el vehículo recolector será menor, y existirá un porcentaje de subutilización mínimo, lo cual da una ventaja para el proveedor de servicio.
- La propuesta desarrollada muestra ser óptima frente a situación actual en la recolección de residuos, ya el vehículo recolector recorre menos distancia, y recolecta casi el triple de residuos.
- Adicionalmente, el método requiere de gran cantidad de información geográfica (coordenadas, y distancias), la cual fue medida por herramientas de Sistema de Información Geográfica como Google Maps, y Waze, las cuales son confiables y viables.
- Las herramientas de solución como LINGO y las diferentes heurísticas aplicadas permitieron obtener buenas soluciones para ambos problemas. Se pudo ver en

los resultados que el problema de ubicación buscó un alto porcentaje de cobertura en lo que fue asignación de contenedores.

- Aunque este estudio está limitado a un área pequeña del cantón Esmeraldas, este representa el punto de inicio para una extensión de áreas urbanas más extensas; ya que el mismo puede ser replicado.

9.2 Recomendaciones

- Si se pretende en un futuro aplicar esta propuesta se recomienda revisar todos los valores aquí obtenidos, ya que estos son sensibles al tiempo, y a pesar de que se puede aplicar el mismo método para llevar a cabo esta propuesta, se los debe actualizar.
- Si se da el caso y se quiere implementar esta propuesta, se recomienda crear una estrategia de implementación que tome en consideración el abastecimiento de recursos, el desarrollo de puntos de servicio, la financiación, la administración, y la toma de decisiones; las cuales están excluidas en el presente estudio.
- Es recomendable evaluar la inversión inicial que requiere una propuesta como esta, y considerar el intercambio de adquirir más recursos, considerando que no halla tanta subutilización o de caso contrario sobreutilización.
- En el futuro sería muy aconsejable diseñar rutas que prioricen el consumo y reducción de combustibles, relacionadas a otras variables, además de la distancia recorrida por la ruta. Por ejemplo, a la reducción de emisiones de gases al ambiente.

- Un punto muy importante del presente estudio es el impacto que puede causar si se toman en cuenta otras variables de impacto social y ambiental; por lo tanto es recomendable en estudios a futuro añadir este tipo de evaluaciones junto con un costo relacionado a ellas.
- Se recomienda realizar encuestas de satisfacción a la población con cierta frecuencia para poder determinar en qué aspectos podría fallar el manejo de residuos actual, y llegar a las mejoras con mayor facilidad.
- En lo que corresponde a operaciones, es aconsejable añadir a esta propuesta los requerimientos de tiempo, y los costos relacionados al mismo.
- Es recomendable contar con un sistema de medición para el control continuo de un sistema de manejo de residuos.
- La asunción de considerar la generación total del área de estudio fue una limitación para el estudio, ya que el mismo es uno preliminar. Se recomienda tomar en cuenta la generación por cuadras en el área de estudio a través de la cantidad de viviendas por cuadra gracias a CNELP; ya que esto permitirá ubicar más contenedores cercanos a los clientes con más alta generación de residuos.

Bibliografía

Abduli, M. A., & Nasrabadi, T. (2007). Municipal Solid Waste in Kurdistan Province, Iran.

Journal of Enviromental Health , 69 (7), 51-55.

Applegate, D. L., Bixby, R. E., Chvátal, V., & Cook, W. J. (2006). *The Traveling Salesman*

Problem: A Computational Study. Estados Unidos: Princeton University Press.

Aremu, A. S., Sule, B. F., Downs, J., & Mihercic, J. R. (2012). Framework to Determine the

Optimal Spatial Location and Number of Municipal Solid Waste Bins in a Developing

World Urban Neighborhood. *Journal of Enviromental Engineering* , 138 (6), 645-653.

Arias, J. (2012). Optimización Aplicada a un Problema de Recoleccion de Residuos

Industriales. *Gerencia Tecnológica Informativa* , 11 (29), 25-33.

Asociación de Municipalidades Ecuatorianas. (31 de Mayo de 2013). AME. Recuperado el 30

de Octubre de 2014, de [http://www.ame.gob.ec/ame/index.php/noticias/noticias-](http://www.ame.gob.ec/ame/index.php/noticias/noticias-institucionales/845-gad-municipales-avanzan-en-gestion-integral-de-residuos-solidos)

[institucionales/845-gad-municipales-avanzan-en-gestion-integral-de-residuos-solidos](http://www.ame.gob.ec/ame/index.php/noticias/noticias-institucionales/845-gad-municipales-avanzan-en-gestion-integral-de-residuos-solidos)

Ayala, A., & Gonzáles, E. (Mayo de 2001). Asignación de Rutas de Vehículos para un Sistema

de Recolección de Residuos Sólidos en la Acera. *Revista de Ingeniería de la Universidad de*

los Andes (13), págs. 5-11.

Banco Central del Ecuador. (2014). *Estadísticas Económicas*. Recuperado el 19 de 9 de 2014,

de Banco Central del Ecuador: <http://www.bce.fin.ec/index.php/estadisticas-economicas>

Basel, J., & Willemain, T. (2001). *Computational Optimization and Applications* , 20, págs.

211-217.

Bhambulkar, A. V. (2011). Municipal Solid Waste Collection Routes Optimized with Arc GIS

Network Analyst. *International Journal of Adcanced Engineering and Sciences and*

Technologies , 11 (1), 202-207.

- Bonomo, F., Durán, G., Larumbe, F., & Marengo, J. (2009). Optimización de la Recolección de Residuos de la Zona Sur de la Ciudad de Buenos Aires. *Revista de Ingeniería de Sistemas*, 22.
- Brownlee, J. (2011). *Clever Algorithms: Nature-Inspired Programming Recipes*. Australia.
- Campos, I. (2000). *Saneamiento Ambiental*. Costa Rica: Universidad Estatal.
- Castells, X. E. (2000). *Reciclaje de Residuos Industriales*. Madrid: Ediciones Diaz Santos S.A.
- Chalkias, C., & Lasaridi, K. (2009). A GIS based model for the optimisation of municipal solid waste collection: the case of study of Nikea, Athens, Greece. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 5 (10), 640-650.
- Chang, N., Pires, A., & Martinho, G. (2011). Empowering Systems Analysis for Solid Waste Management: Challenges, Trends, and Perspectives. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 41 (16), 1449-1530.
- Chen, D., Batson, R. G., & Dang, Y. (2011). *Applied Integer Programming: Modeling and Solution*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Colomer, F., & Gallardo, A. (2011). *Tratamiento y Gestión de Residuos Sólidos* (Segunda ed.). (U. P. Vaéncia, Ed.) Comunidad Valenciana, España.
- Dirección de Higiene del GADMCE. (2012). *Reingeniería del Subproceso de Recolección en la ciudad de Esmeraldas*. Copia, GADMCE, Dirección de Higiene, Esmeraldas.
- Drezner, Z., & Hamacher, H. W. (2004). *Facility Location Applications and Theory*. Berlin, Alemania: Springer.
- Duda, R. O. (2007). (S. J. University, Productor, & Princeton) Recuperado el Abril de 2015, de The k-means Procedure:
http://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall08/cos436/Duda/C/k_means.htm

- Duque, J. L., & Tul, A. P. (Septiembre de 2012). *Escuela Politécnica Nacional*. Recuperado el 1 de Noviembre de 2015, de Evaluación de Sistemas de Contenerización de Residuos Sólidos Urbanos en el Cantón Rumiñahui:
<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5914/1/CD-4721.pdf>
- Elias, X. (2009). *Reciclaje de Residuos Industriales, Residuos Sólidos Urbanos y fangos de depuradora* (2da ed.). España: Diaz De Santos.
- EMASEO. (2014). *EMASEO: Informe de Gestión 2009-2014*. Recuperado el 10 de Octubre de 2015, de http://www.emaseo.gob.ec/documentos/pdf/Informe_Gestion_2009-2014.pdf
- Empresa Municipal de Aseo de Cuenca. (16 de Octubre de 2014). Recuperado el 30 de Abril de 2015, de Servicios: <http://www.emac.gob.ec/?q=content/recolección-0>
- Escamiroso, L. F., del Carpio, C. U., Castañeda, G., & Quintal, C. A. (2001). *Manejo de los Residuos Sólidos Domiciliarios en la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez Chiapas*. México: Plaza y Valdés.
- Escudero, A., Molineros, N., Logreira, N., Sisa, A., & Isaacs, M. (2009). *La gestión sostenible de residuos. Memorias II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de residuos*. (Uninorte, Ed.)
- Estrada, M., Galván, D., Magín, J., & Robusté, F. (2003). Las Nuevas Tecnologías de la Información y la Distribución Urbana de Mercancías. *Economía Industrial*, 353, 51-63.
- Figueiredo, R., O'Kelly, M. E., & Pizzolato, N. D. (24 de Agosto de 2013). A two-stage hub location method for air transportation in Brazil. *International Transactions In Operational Research*, 1-15.
- GAD Municipal del Cantón Otavalo. (2015). Recuperado el 10 de Abril de 2015, de GAD Municipal del Cantón Otavalo: <http://www.otavalo.gob.ec>
- Galgano, A. (1995). *Los Siete Instrumentos de la Calidad Total*. Madrid: Diaz de Santos.

- García, A., Rosique, M., & Segado, F. (1994). *Topografía Básica para Ingenieros*. Murcia: Servicio de Publicaciones de Universidad de Murcia.
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón de Esmeraldas. (2013). Recuperado el 20 de Enero de 2015, de Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de Esmeraldas: www.gadmesmeraldas.gob.ec/site/images/stories/.../PDyOT%20FINAL.pdf
- Guarch, J., Órtiz, A., & Vicens, E. (1997). *Métodos Cuantitativos* (Vol. Volumen 1). España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Guerra, S. M. (2015). *ESPOL*. Recuperado el 1 de Noviembre de 2015, de Guayaquil, Proyecto para Implementación de un Sistema de Descarga y Recolección de Basura para un edificio de Departamentos en la Ciudad de:
<http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/29973/D-79978.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- Gómez, D., & Gómez, M. (2007). *Consultoria e Ingeniería Ambiental*. España: Grupo Mundi-Prensa.
- Gómez, P., & Maldonado, B. (2014).
- Gutin, G., & Punnen, A. P. (2004). *The Traveling Salesman Problem and Its Variations*. Estados Unidos: Kluwer Academic Publishers.
- GYGI, W. (2012). *SIX SIGMA FOR DUMMIES*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons.
- Hansen, P., & Mladenovic, N. (2005). *SEARCH METHODOLOGIES. Introductory Tutorial in Optimization and Decision Support Techniques*. (E. K. Burke, & G. Kendall, Edits.) Springer.
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). *Introduction to Operations Research* (9na ed.). New York: McGraw-Hill.

INE. (2001). *Guía para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Municipales*. México:

SEMARNAT.

INEC. (2010). Recuperado el 10 de 10 de 2014, de Mapa de Estadísticas Ambientales:

http://www.inec.gob.ec/sitio_carto/

INEC. (2010). *Ecuador en Cifras*. Recuperado el 10 de Octubre de 2014, de Instituto Nacional

de Estadística y Censos: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/resultados/>

Jayarama, P. R. (2011). *Municipal Waste Management: Processing Energy Recovery*. Leiden,

The Netherlands: BS Publications.

Jimenez, B. E. (2005). *La Contaminación Ambiental en México*. Mexico D.F.: Limusa.

Karadimas, N. V., Kouzas, G., Anagnostopoulos, I., & Loumos, V. (Noviembre de 2005). Urban

Solid Waste Collection and Routing: The Ant Colony Strategic Approach. *International*

Journal of Simulation: Systems, Science & Technology, 45-53.

Kaveh, P., Sabzevari, A., & Sahraeian, R. (2010). Solving Capacitated P-median Problem by

Hybrid K-means Clustering and FNS Algorithm. *International Journal of Innovation,*

Management and Technology, 1 (4), 405-410.

Klansek, U. (2011). Using the TSP Solution for Optimal Route Scheduling in Construction

Management. *Organization, Technology and Management in Construction-An*

International Journal, 3 (1), 243-249.

Kume, H. (1992). *Herramientas Estadísticas Básicas para el Mejoramiento de la Calidad*.

Bogotá, Colombia: Norma.

Kvale, S. (2011). *Las Entrevistas en Investigación Cualitativa*. (Morata, Ed.) Madrid:

Ministerio de Cultura Gobierno de España.

Laporte, G., Nickel, S., & Saldhana da Gama, F. (2015). *Location Science*. Suiza: Springer.

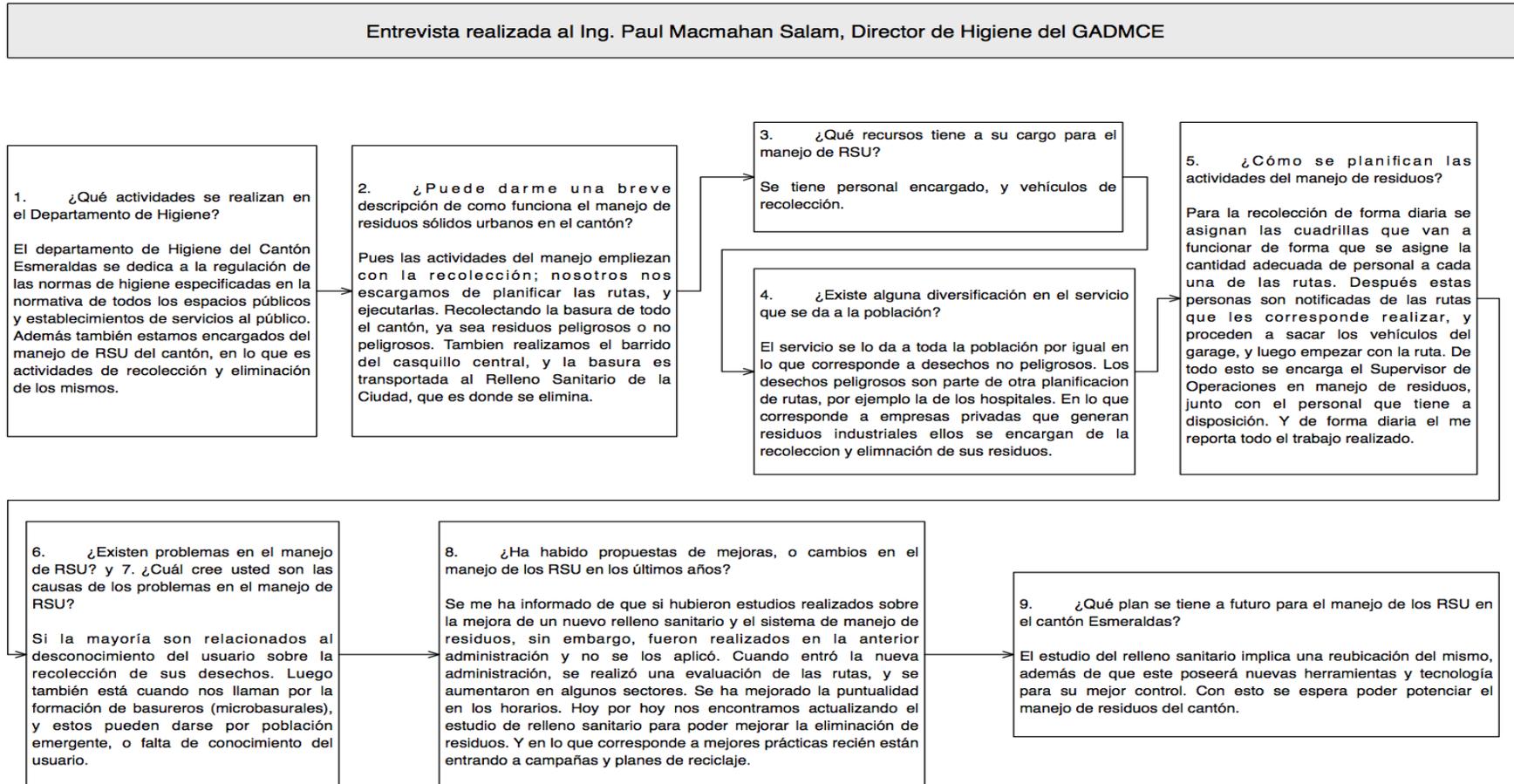
- Lim, A., Wang, F., & Xu, Z. (2005). The Capacitated Traveling Salesman Problem with Pickups and Deliveries on a Tree. *Algorithms and Computation* , 3827, págs. 1061-1070.
- Lin, H., Tsai, Z., Chen, G., & Kao, J. (2011). A Model for the Implementtation of a Two-Shift Municipal Solid Waste and Recycable Material Collection Plan That Ofers Greater Convenience to Residents. *Journal of the Air & Waste Management Association (Air & Waste Management Association)* , 61 (1), 55-62.
- LINDO. (2015). *LINDO 15 Online Users Manual*. Recuperado el 15 de Noviembre de 2015, de http://www.lindo.com/doc/online_help/lingo15_0/lingo4_content.htm
- MacDonald, M. L. (1996). Solid Waste Management Models: a state of the art review. *Journal of Solid Waste Technology and Management* , 23 (2), 73-83.
- Manahan, S. E. (2007). *Introduccion a la Química Ambiental*. Mexico D.F.: Reverté Ediciones.
- Melendo, J. A., Arbonés, N., Cancer, L., Mazar, P., & Lampre, F. (2002). *Manual de técnicas de montaña e interpretación de la naturaleza*. Barcelona: Paidotribo.
- Mena, B. (20 de Mayo de 2015). Entrevista al Gerente de GIDSA para información sobre el Manejo de Residuos. (G. Cevallos, Entrevistador)
- Menéndez, F., Fernández, F., Vázquez, I., Rodríguez, J. A., & Espeso, M. (2009). *Formación Superior en Prevención de Riesgos Laborales*. España: Lex Nova.
- Ministerio de la Coordinación de la Producción, Empleo y Competitividad. (Mayo de 2011). *Ministerio de la Coordinación de la Producción, Empleo y Competitividad*. Recuperado el 31 de Octubre de 2014, de <http://www.produccion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/02/AGENDA-TERRITORIAL-ESMERALDAS.pdf>
- Ministerio del Ambiente. (2014). *Programa 'PNGIDS' Ecuador*. Recuperado el 10 de Marzo de 2014, de <http://www.ambiente.gob.ec/programa-pngids-ecuador/>

- Municipalidad de Esmeraldas. (21 de Marzo de 2005). Ordenanza Municipal que regula el barrido, recolección, transporte, transferencia y disposición final de los residuos sólidos urbanos, domésticos, comerciales, industriales y biológicos del cantón Esmeraldas. 22. Esmeraldas, Esmeraldas, Ecuador.
- Naciones Unidas. (22 de 6 de 2012). Recuperado el 3 de 8 de 2014, de División de Desarrollo Sostenible:
<http://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/agenda21spchapter21.htm>
- Oberlin, A. S. (2011). *The Role of Households in Solid Waste Management in East Africa Capital Cities*. Holanda: Wageningen Academic Publishers.
- Organización Panamericana de la Salud. (Mayo de 2002). *Biblioteca Virtual de desarrollo sostenible y salub ambiental*. Recuperado el 19 de Agosto de 2014, de
<http://www.bvsde.paho.org/bvsars/e/fulltext/analisis/ecuador.pdf>
- Pazmiño, I. C. (1997). *Metodología de la Investigación Científica*. Ecuador.
- Rodríguez, E. A. (2005). *Metodología de la Investigación*. Villahermosa, México: Universidad Autónoma de Tabasco.
- Salinas, P. E. (2014). Recuperado el 23 de Enero de 2015, de Salinas Ecuador:
<http://www.salinasecuador.com/salinas/autores.htm>
- SEMARNAT. (1999). *Minimización y Manejo Ambiental de los Residuos Sólidos*. México: SEMARNAT.
- Stypka, T. (17 de 10 de 2011). Municipal Solid Waste Management Models: Present Situations and Future Trends. 1-10.
- Tchobanoglous, G., & Kreith, F. (2002). *Handbook of Solid Waste Management* (2da ed.). Estados Unidos: McGraw-Hill.

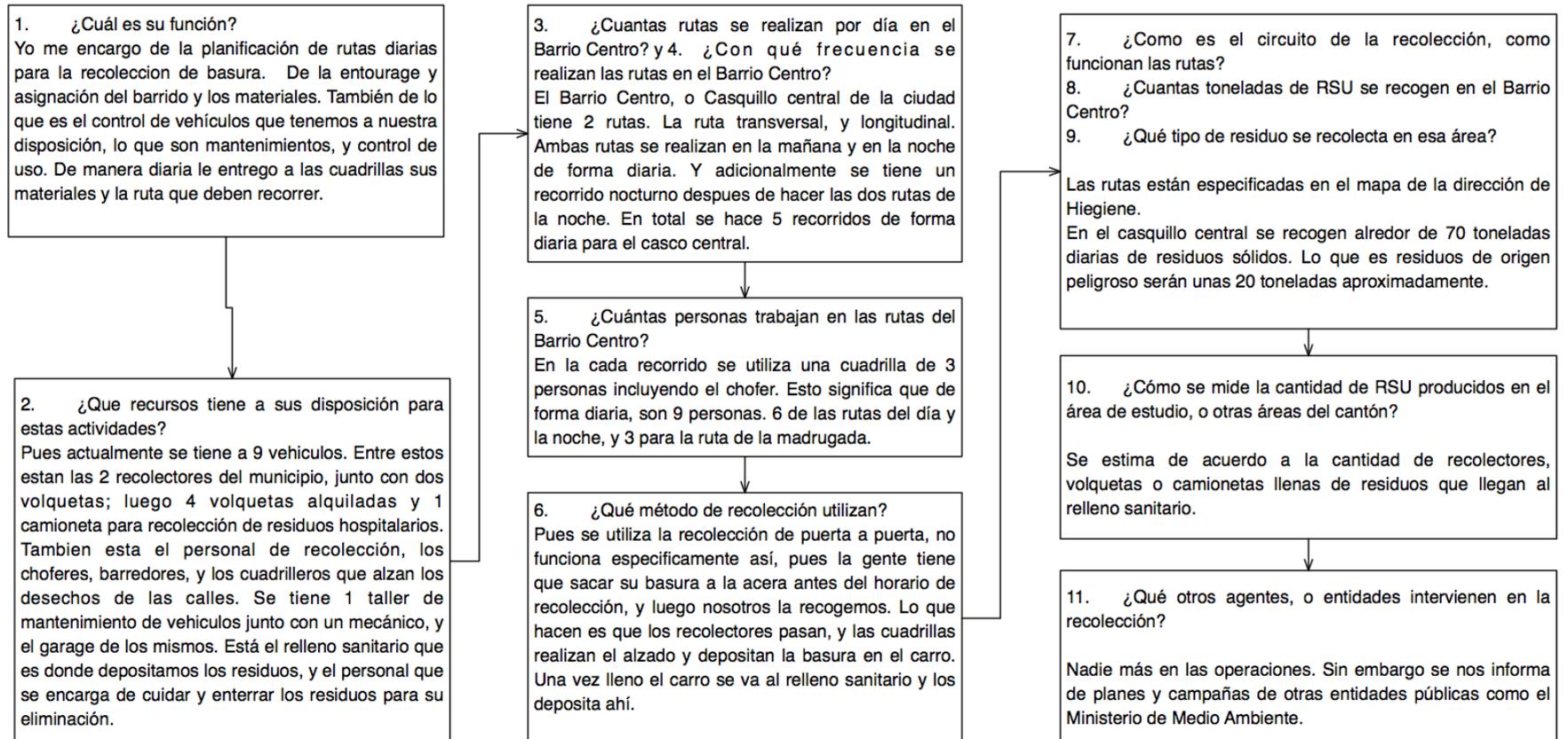
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. A. (1994). *Gestión Integral de Residuos Sólidos* (Vol. 1). México Distrito Federal, México: McGraw-Hill.
- The World Bank. (2013). *Datos Ecuador*. Recuperado el 12 de Septiembre de 2014, de The World Bank: http://datos.bancomundial.org/pais/ecuador#cp_wdi
- The World Bank. (2012). *Global Review of Solid Waste Management*. Recuperado el 1 de Noviembre de 2014, de The World Bank: <http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/TOPICS/EXTURBANDEVELOPMENT/EXTUSWM/0,,menuPK:463847~pagePK:149018~piPK:149093~theSitePK:463841,00.html>
- Vijay, R., Gautam, A., Kalamdhad, A., Gupta, A., & Devotta, S. (2008). GIS-based Locational Analysis of Collection Bins in Municipal Solid Waste Management Systems. *Journal of Environmental Engineering and Science* , 7 (1), 39-43.
- Waze. (2015). *Waze*. Recuperado el 10 de Abril de 2015, de <https://www.waze.com/about>
- Zamorano, M., Molero, E., Grindlay, A., Rodríguez, M. L., Hurtado, A., & Calvo, F. J. (2009). A planning scenario of the application of geographical information systems in municipal waste collection: A case of Churriana de la Vega (Granada, Spain). *Resources Conservation and Recycling* , 54, 123-133.
- Zhang, J. (2008). *Visualization for Information Retrieval*. Milwaukee: Springer.

ANEXOS

Anexo 1 Entrevistas realizadas al Director de Higiene y Supervisor Operativo del Cantón Esmeraldas.

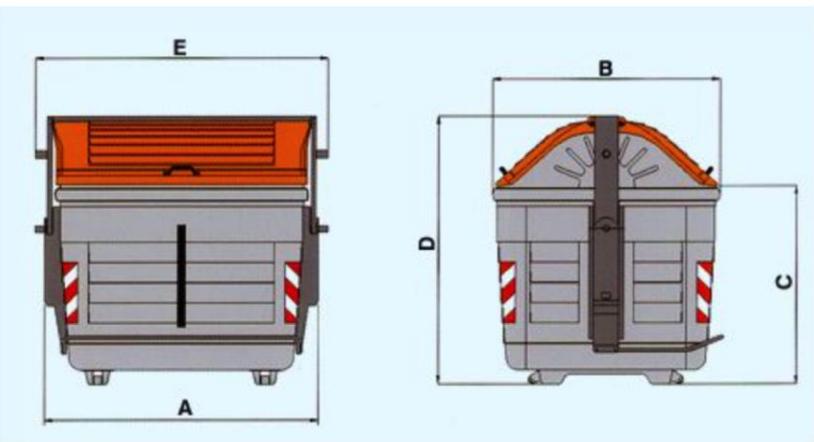


Entrevista realizada al Sr. Alfredo Maffare, Supervisor de Operaciones de Manejo de Residuos del GADMCE



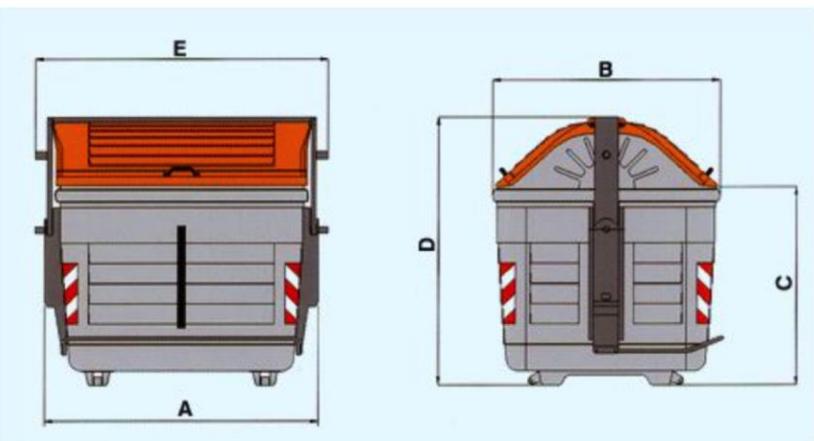
Anexo 2 Dimensiones de Contenedores

Contenedor Metálico de 2400 lt.	
A	176 cm
B	126.5 cm
C	120 cm
D	160 cm
E	188 cm



The technical drawing shows two views of the 2400-liter metal container. The front view (left) shows a rectangular container with a width dimension 'A' and a height dimension 'E'. The side view (right) shows the container's profile with a height dimension 'D' and a width dimension 'B'. The container has a grey body, a red and white striped safety pattern on the sides, and a red lid.

Contenedor Metálico de 3200 lt.	
A	176 cm
B	146.5 cm
C	130 cm
D	173.5 cm
E	188 cm



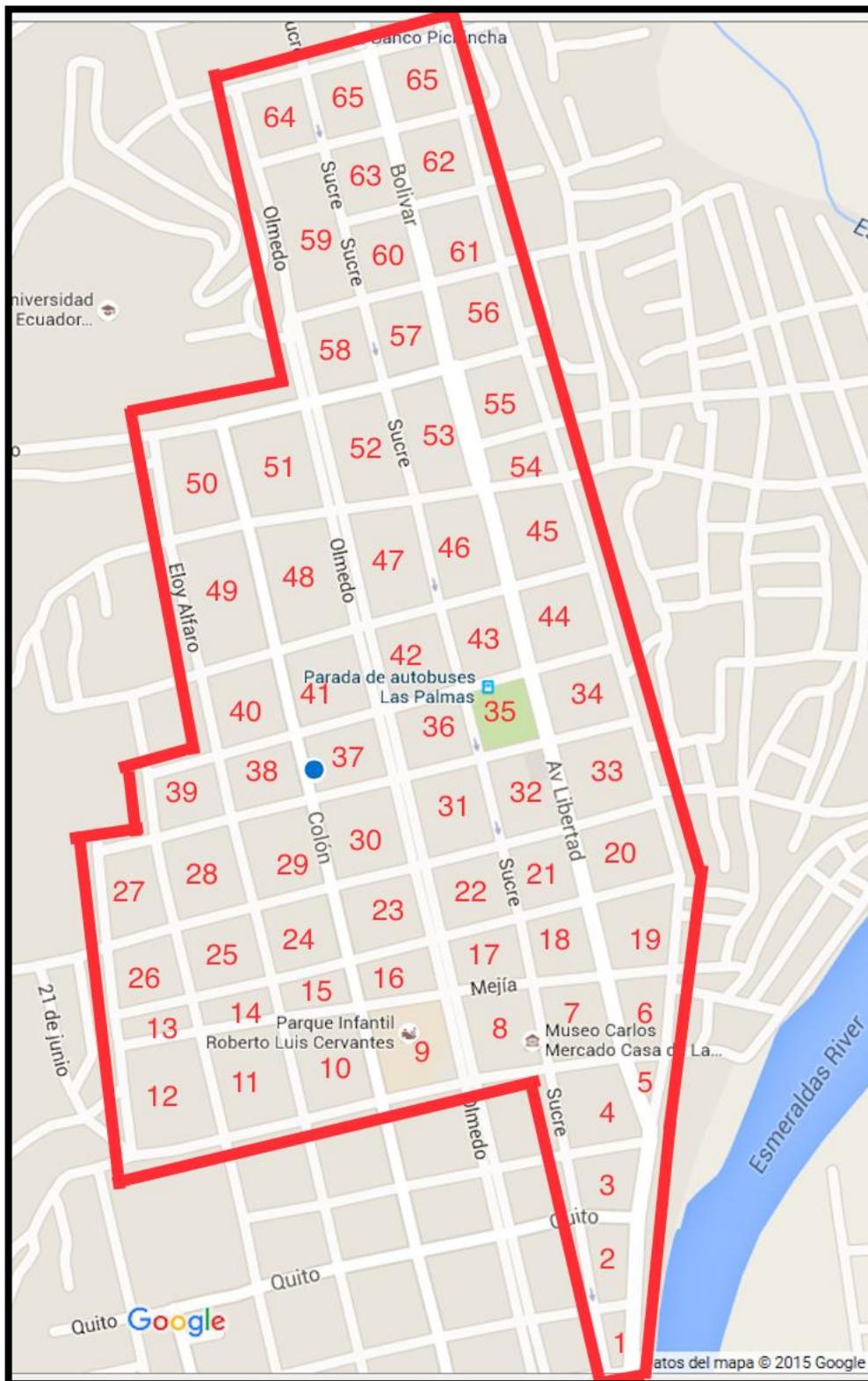
The technical drawing shows two views of the 3200-liter metal container. The front view (left) shows a rectangular container with a width dimension 'A' and a height dimension 'E'. The side view (right) shows the container's profile with a height dimension 'D' and a width dimension 'B'. The container has a grey body, a red and white striped safety pattern on the sides, and a red lid.

Anexo 3 Población y generación RSU.

Codificación de Clientes	Habitantes * manzana (2015)	Habitantes * manzana (2016)	Habitantes * manzana (2017)	Habitantes * manzana (2018)	Habitantes * manzana (2019)	Habitantes * manzana (2020)	Cantidad de Residuos por manzana [Kg*dia]	Volumen [m ³]	Volumen [lt]
1	132.3	137.06	142.00	147.11	152.40	157.89	235.26	1.30	1301.93
2	158.76	164.48	170.40	176.53	182.89	189.47	282.31	1.56	1562.31
3	253.26	262.38	271.82	281.61	291.75	302.25	450.35	2.49	2492.26
4	234.36	242.80	251.54	260.59	269.97	279.69	416.74	2.31	2306.27
5	154.98	160.56	166.34	172.33	178.53	184.96	275.59	1.53	1525.11
6	196.56	203.64	210.97	218.56	226.43	234.58	349.53	1.93	1934.29
7	185.22	191.89	198.80	205.95	213.37	221.05	329.36	1.82	1822.70
8	215.46	223.22	231.25	239.58	248.20	257.14	383.13	2.12	2120.28
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	287.28	297.62	308.34	319.44	330.94	342.85	510.85	2.83	2827.04
11	257.04	266.29	275.88	285.81	296.10	306.76	457.07	2.53	2529.46
12	325.08	336.78	348.91	361.47	374.48	387.96	578.06	3.20	3199.02
13	132.3	137.06	142.00	147.11	152.40	157.89	235.26	1.30	1301.93
14	166.32	172.31	178.51	184.94	191.59	198.49	295.75	1.64	1636.71
15	177.66	184.06	190.68	197.55	204.66	212.03	315.92	1.75	1748.30
16	196.56	203.64	210.97	218.56	226.43	234.58	349.53	1.93	1934.29
17	177.66	184.06	190.68	197.55	204.66	212.03	315.92	1.75	1748.30
18	230.58	238.88	247.48	256.39	265.62	275.18	410.02	2.27	2269.07
19	272.16	281.96	292.11	302.62	313.52	324.81	483.96	2.68	2678.25
20	257.04	266.29	275.88	285.81	296.10	306.76	457.07	2.53	2529.46
21	268.38	278.04	288.05	298.42	309.16	320.29	477.24	2.64	2641.05
22	196.56	203.64	210.97	218.56	226.43	234.58	349.53	1.93	1934.29
23	245.7	254.55	263.71	273.20	283.04	293.23	436.91	2.42	2417.87
24	196.56	203.64	210.97	218.56	226.43	234.58	349.53	1.93	1934.29
25	230.58	238.88	247.48	256.39	265.62	275.18	410.02	2.27	2269.07
26	219.24	227.13	235.31	243.78	252.56	261.65	389.86	2.16	2157.48
27	185.22	191.89	198.80	205.95	213.37	221.05	329.36	1.82	1822.70
28	268.38	278.04	288.05	298.42	309.16	320.29	477.24	2.64	2641.05
29	177.66	184.06	190.68	197.55	204.66	212.03	315.92	1.75	1748.30
30	264.6	274.13	283.99	294.22	304.81	315.78	470.52	2.60	2603.85
31	257.04	266.29	275.88	285.81	296.10	306.76	457.07	2.53	2529.46
32	200.34	207.55	215.02	222.76	230.78	239.09	356.25	1.97	1971.49
33	234.36	242.80	251.54	260.59	269.97	279.69	416.74	2.31	2306.27
34	268.38	278.04	288.05	298.42	309.16	320.29	477.24	2.64	2641.05
35	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
36	219.24	227.13	235.31	243.78	252.56	261.65	389.86	2.16	2157.48
37	238.14	246.71	255.59	264.80	274.33	284.20	423.46	2.34	2343.47
38	283.5	293.71	304.28	315.23	326.58	338.34	504.12	2.79	2789.84
39	196.56	203.64	210.97	218.56	226.43	234.58	349.53	1.93	1934.29
40	294.84	305.45	316.45	327.84	339.65	351.87	524.29	2.90	2901.44
41	211.68	219.30	227.20	235.37	243.85	252.63	376.41	2.08	2083.08
42	260.82	270.21	279.94	290.01	300.46	311.27	463.79	2.57	2566.66
43	219.24	227.13	235.31	243.78	252.56	261.65	389.86	2.16	2157.48
44	241.92	250.63	259.65	269.00	278.68	288.72	430.19	2.38	2380.67
45	343.98	356.36	369.19	382.48	396.25	410.52	611.67	3.39	3385.01
46	287.28	297.62	308.34	319.44	330.94	342.85	510.85	2.83	2827.04
47	317.52	328.95	340.79	353.06	365.77	378.94	564.62	3.12	3124.63
48	298.62	309.37	320.51	332.05	344.00	356.38	531.01	2.94	2938.64
49	325.08	336.78	348.91	361.47	374.48	387.96	578.06	3.20	3199.02
50	223.02	231.05	239.37	247.98	256.91	266.16	396.58	2.19	2194.68
51	283.5	293.71	304.28	315.23	326.58	338.34	504.12	2.79	2789.84
52	298.62	309.37	320.51	332.05	344.00	356.38	531.01	2.94	2938.64
53	257.04	266.29	275.88	285.81	296.10	306.76	457.07	2.53	2529.46
54	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
55	294.84	305.45	316.45	327.84	339.65	351.87	524.29	2.90	2901.44
56	306.18	317.20	328.62	340.45	352.71	365.41	544.45	3.01	3013.03
57	238.14	246.71	255.59	264.80	274.33	284.20	423.46	2.34	2343.47
58	294.84	305.45	316.45	327.84	339.65	351.87	524.29	2.90	2901.44
59	366.66	379.86	393.53	407.70	422.38	437.58	652.00	3.61	3608.20
60	298.62	309.37	320.51	332.05	344.00	356.38	531.01	2.94	2938.64
61	291.06	301.54	312.39	323.64	335.29	347.36	517.57	2.86	2864.24
62	298.62	309.37	320.51	332.05	344.00	356.38	531.01	2.94	2938.64
63	325.08	336.78	348.91	361.47	374.48	387.96	578.06	3.20	3199.02
64	309.96	321.12	332.68	344.66	357.06	369.92	551.18	3.05	3050.23
65	275.94	285.87	296.17	306.83	317.87	329.32	490.68	2.72	2715.45
66	306.18	317.20	328.62	340.45	352.71	365.41	544.45	3.01	3013.03

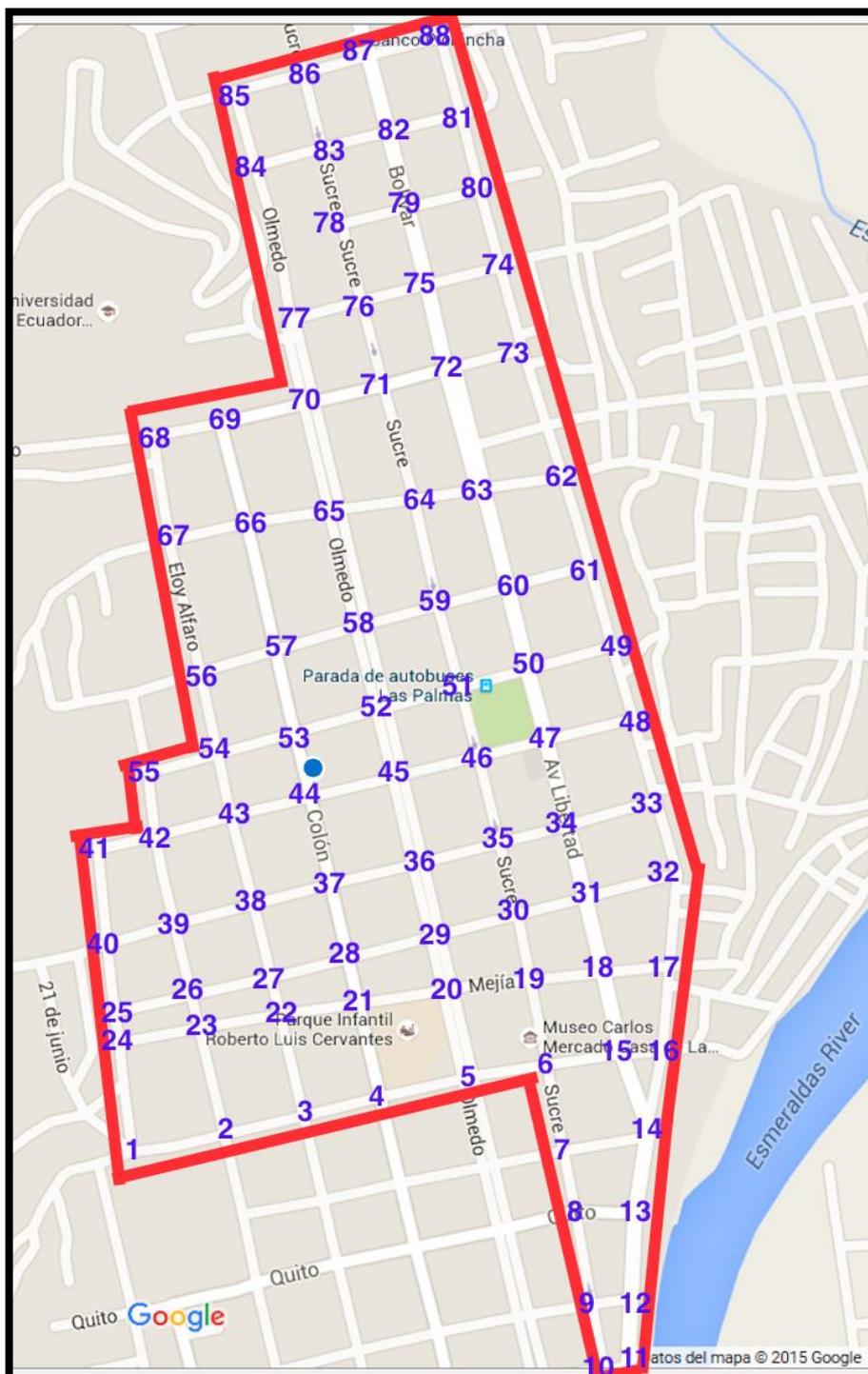
Z

Anexo 4 Área de estudio codificada con los clientes y sus coordenadas.



Clientes		
Codificación	Latitud (y) [grados]	Longitud (x) [grados]
1	0.95988	-79.65113
2	0.96073	-79.65115
3	0.96159	-79.65116
4	0.96235	-79.65132
5	0.96259	-79.65081
6	0.96336	-79.65085
7	0.96333	-79.65153
8	0.96317	-79.65237
9	0.96303	-79.65332
10	0.96286	-79.65422
11	0.96269	-79.65507
12	0.96252	-79.65595
13	0.96332	-79.65605
14	0.96346	-79.65526
15	0.96361	-79.65437
16	0.96380	-79.65347
17	0.96398	-79.65256
18	0.96412	-79.65170
19	0.96428	-79.65090
20	0.96510	-79.65110
21	0.96492	-79.65191
22	0.96468	-79.65274
23	0.96444	-79.65366
24	0.96422	-79.65454
25	0.96402	-79.65538
26	0.96386	-79.65617
27	0.96472	-79.65629
28	0.96491	-79.65559
29	0.96504	-79.65472
30	0.96527	-79.65385
31	0.96551	-79.65292
32	0.96570	-79.65214
33	0.96593	-79.65134
34	0.96675	-79.65156
35	0.96654	-79.65234
36	0.96633	-79.65314
37	0.96608	-79.65408
38	0.96588	-79.65491
39	0.96567	-79.65578
40	0.96667	-79.65511
41	0.96691	-79.65423
42	0.96717	-79.65332
43	0.96739	-79.65252
44	0.96760	-79.65174
45	0.96856	-79.65200
46	0.96838	-79.65278
47	0.96823	-79.65361
48	0.96802	-79.65447
49	0.96773	-79.65536
50	0.96905	-79.65563
51	0.96930	-79.65477
52	0.96942	-79.65387
53	0.96959	-79.65317
54	0.96934	-79.65220
55	0.96996	-79.65239
56	0.97084	-79.65263
57	0.97067	-79.65345
58	0.97050	-79.65421
59	0.97169	-79.65442
60	0.97151	-79.65367
61	0.97168	-79.65287
62	0.97249	-79.65310
63	0.97230	-79.65384
64	0.97296	-79.65477
65	0.97315	-79.65408
66	0.97337	-79.65330

Anexo 5 Área de estudio con los puntos candidatos de servicio y sus coordenadas



Puntos de Servicio Candidatos		
Codificación [Línea] [Línea] [Línea]	(x) [Línea]	(y) [Línea]
0.0181	-10.0030	1
0.0020	-10.0031	2
0.0021	-10.0041	3
0.0041	-10.0030	4
0.0000	-10.0023	5
0.0081	-10.0013	6
0.0014	-10.0013	7
0.0010	-10.0013	8
0.0021	-10.0013	9
0.0048	-10.0014	10
0.0040	-10.0000	11
0.0000	-10.0000	12
0.0018	-10.0003	13
0.0000	-10.0000	14
0.0000	-10.0010	15
0.0021	-10.0000	16
0.0040	-10.0000	17
0.0038	-10.0011	18
0.0023	-10.0000	19
0.0000	-10.0000	20
0.0041	-10.0038	21
0.0030	-10.0041	22
0.0021	-10.0000	23
0.0000	-10.0040	24
0.0038	-10.0041	25
0.0000	-10.0000	26
0.0030	-10.0040	27
0.0000	-10.0000	28
0.0010	-10.0010	29
0.0041	-10.0010	30
0.0000	-10.0011	31
0.0040	-10.0000	32
0.0000	-10.0000	33
0.0038	-10.0010	34
0.0010	-10.0038	35
0.0000	-10.0038	36
0.0043	-10.0041	37
0.0021	-10.0000	38
0.0030	-10.0000	39
0.0011	-10.0000	40
0.0014	-10.0013	41
0.0021	-10.0000	42
0.0040	-10.0023	43
0.0000	-10.0040	44
0.0000	-10.0040	45
0.0000	-10.0000	46
0.0000	-10.0010	47
0.0000	-10.0000	48
0.0000	-10.0011	49
0.0000	-10.0000	50
0.0000	-10.0000	51
0.0000	-10.0000	52
0.0000	-10.0000	53
0.0010	-10.0000	54
0.0000	-10.0010	55
0.0000	-10.0000	56
0.0000	-10.0000	57
0.0000	-10.0000	58
0.0000	-10.0000	59
0.0000	-10.0000	60
0.0000	-10.0000	61
0.0000	-10.0000	62
0.0000	-10.0000	63
0.0000	-10.0000	64
0.0000	-10.0000	65
0.0000	-10.0000	66
0.0000	-10.0000	67
0.0000	-10.0000	68
0.0000	-10.0000	69
0.0000	-10.0000	70
0.0000	-10.0000	71
0.0000	-10.0000	72
0.0000	-10.0000	73
0.0000	-10.0000	74
0.0000	-10.0000	75
0.0000	-10.0000	76
0.0000	-10.0000	77
0.0000	-10.0000	78
0.0000	-10.0000	79
0.0000	-10.0000	80
0.0000	-10.0000	81
0.0000	-10.0000	82
0.0000	-10.0000	83
0.0000	-10.0000	84
0.0000	-10.0000	85
0.0000	-10.0000	86
0.0000	-10.0000	87
0.0000	-10.0000	88

Anexo 6 Formación de k Conglomerados en Minitab

Cientes	Codificación de Conglomerados de 2.4m ³ , k=65	Codificación de Conglomerados de 3.2m ³ , k=49
1	1	1
2	2	2
3	3	3
4	4	4
5	5	5
6	6	6
7	7	7
8	8	8
9	9	9
10	10	10
11	11	11
12	12	12
13	13	13
14	14	14
15	15	15
16	16	16
17	17	17
18	18	18
19	19	19
20	20	20
21	21	21
22	22	22
23	23	23
24	24	24
25	25	25
26	26	26
27	27	27
28	28	28
29	29	29
30	30	30
31	31	31
32	32	32
33	33	33
34	34	34
35	35	35
36	36	36
37	37	37
38	38	38
39	39	39
40	40	40
41	41	41
42	42	42
43	43	43
44	44	43
45	45	44
46	46	44
47	47	42
48	48	42
49	49	49
50	50	49
51	51	48
52	52	48
53	53	48
54	54	44
55	55	44
56	56	46
57	57	46
58	58	48
59	59	47
60	60	46
61	61	46
62	62	45
63	63	47
64	64	47
65	65	47
66	65	45

**Anexo 7 Resultados del VNS en del P-Median de cada conglomerado para los
contenedores 2.4m³**

Resultados P-Median de 65 conglomerados con contenedores de 2400 lt							
Conglomerado	Punto de Demanda	Demanda [lt]	Puntos de Servicio Candidatos	Punto Servicio Elegido para Contenedor	Cantidad de Contenedores Asignados	Distancia del cliente a contenedor [km]	FUNCIÓN OBJETIVO
1	1	1301.93	9, 10, 11, 12	9	1	0.04	52.08
2	2	1562.31	8, 9, 12, 13	9	1	0.06	93.74
3	3	2492.26	7, 8, 3, 14	7	1	0.06	149.54
4	4	2306.27	6, 7, 14, 15	7	1	0.07	161.44
5	5	1525.11	14, 15, 16	15	1	0.04	61.00
6	6	1934.29	15, 16, 17, 18	17	1	0.04	77.37
7	7	1822.70	6, 15, 18, 19	18	1	0.06	109.36
8	8	2120.28	5, 6, 19, 20	5	1	0.07	148.42
9	9	0.00	4, 5, 21, 20	4	1	0.08	0.00
10	10	2827.04	3, 4, 21, 22	3	1	0.08	226.16
11	11	2529.46	2, 3, 22, 23	2	1	0.08	202.36
12	12	3199.02	1, 2, 23, 24	24	1	0.08	255.92
13	13	1301.93	23, 24, 25, 26	23	1	0.05	65.10
14	14	1636.71	22, 23, 26, 27	23	1	0.05	81.84
15	15	1748.30	21, 22, 27, 28	22	1	0.05	87.42
16	16	1934.29	20, 21, 28, 29	20	1	0.06	116.06
17	17	1748.30	19, 20, 29, 30	20	1	0.06	104.90
18	18	2269.07	18, 19, 30, 31	19	1	0.06	136.14
19	19	2678.25	17, 18, 31, 32	18	1	0.07	187.48
20	20	2529.46	31, 32, 33, 34	31	1	0.07	177.06
21	21	2641.05	30, 31, 34, 35	30	1	0.06	158.46
22	22	1934.29	29, 30, 35, 36	29	1	0.07	135.40
23	23	2417.87	28, 29, 36, 37	28	1	0.07	169.25
24	24	1934.29	27, 28, 37, 38	27	1	0.06	116.06
25	25	2269.07	26, 27, 38, 39	26	1	0.06	136.14
26	26	2157.48	25, 26, 39, 40	39	1	0.06	129.45
27	27	1822.70	39, 40, 41, 42	39	1	0.07	127.59
28	28	2641.05	38, 39, 42, 43	42	1	0.06	158.46
29	29	1748.30	37, 38, 43, 44	37	1	0.07	122.38
30	30	2603.85	36, 37, 44, 45	36	1	0.07	182.27
31	31	2529.46	35, 36, 45, 46	35	1	0.07	177.06
32	32	1971.49	34, 35, 46, 47	35	1	0.06	118.29
33	33	2306.27	33, 34, 47, 48	34	1	0.07	161.44
34	34	2641.05	47, 48, 49, 50	47	1	0.06	158.46
35	35	0.00	46, 47, 51, 50	46	1	0.06	0.00
36	36	2157.48	45, 46, 51, 52	45	1	0.07	151.02
37	37	2343.47	44, 45, 52, 53	53	1	0.06	140.61
38	38	2789.84	43, 44, 53, 54	43	1	0.06	167.39
39	39	1934.29	42, 43, 54, 55	42	1	0.05	96.71
40	40	2901.44	53, 54, 56, 57	56	1	0.06	174.09
41	41	2083.08	52, 53, 57, 58	52	1	0.07	145.82
42	42	2566.66	51, 52, 58, 59	51	1	0.07	179.67
43	43	2157.48	50, 51, 59, 60	59	1	0.07	151.02
44	44	2380.67	49, 50, 60, 61	49	1	0.07	166.65
45	45	3385.01	60, 61, 62, 63	60	1	0.07	236.95
46	46	2827.04	59, 60, 63, 64	59	1	0.08	226.16
47	47	3124.63	58, 59, 64, 65	64	1	0.08	249.97
48	48	2938.64	57, 58, 65, 66	58	1	0.09	264.48
49	49	3199.02	56, 57, 66, 67	56	1	0.09	287.91
50	50	2194.68	66, 67, 68, 69	66	1	0.08	175.57
51	51	2789.84	65, 66, 69, 70	69	1	0.08	223.19
52	52	2938.64	64, 65, 70, 71	64	1	0.08	235.09
53	53	2529.46	63, 64, 71, 72	64	1	0.08	202.36
54	54	0.00	63, 62	63	1	0.05	0.00
55	55	2901.44	62, 63, 72, 73	72	1	0.07	203.10
56	56	3013.03	72, 73, 74, 75	72	1	0.07	210.91
57	57	2343.47	71, 72, 75, 76	71	1	0.06	140.61
58	58	2901.44	70, 71, 76, 77	70	1	0.06	174.09
59	59	3608.20	76, 77, 78, 83, 84	78	1	0.04	144.33
60	60	2938.64	75, 76, 78, 79	76	1	0.05	146.93
61	61	2864.24	74, 75, 79, 80	74	1	0.06	171.85
62	62	2938.64	79, 80, 81, 82	79	1	0.06	176.32
63	63	3199.02	78, 79, 82, 83	78	1	0.06	191.94
64	64	3050.23	83, 84, 85, 86	84	1	0.06	183.01
65	65, 66	5728.48	81, 82, 83, 86, 87, 88	82	1	0.07	400.99

Se puede ver los resultados de resolver los 65 problemas de P-median, para la ubicación de los 65 contenedores. La tabla esta dividida en 8 características, de las cuales las primeras cuatro son parámetros, e información de entrada para cada problema. Esto se incluyó para poder identificar de mejor forma a cada conglomerado. Primeramente, está el número de conglomerado, que es, en este caso el cliente del problema; luego está punto de demanda, que son en este caso el punto de generación de RSU dentro de ese conglomerado; luego está la demanda en litros de cada uno de los conglomerados, que pueden tener 1 o dos puntos de demanda; después siguen los puntos candidatos que tiene cada conglomerado, en donde se puede ubicar un contenedor. Subsecuentemente, están las características que indican los resultados de cada conglomerado. El punto de servicio, del conglomerado, elegido para ubicar un contenedor; luego está la cantidad de contenedores asignados, que sería el valor de p para cada problema; luego está la distancia que cada cliente o conglomerado en total tendría que desplazarse para llegar al punto donde fue ubicado su contenedor; y finalmente la función objetivo que indica la distancia total mínima entre el conglomerado, cliente, y los puntos donde irá el punto de servicio asignado.

**Anexo 8 Resultados del VNS en del P-Median de cada conglomerado para los
contenedores 3.2m³**

Conglomerado	Punto de Demanda	Demanda [lt]	Puntos de Servicio Candidatos	Punto Servicio Elegido para Contenedor	Cantidad de Contenedores Asignados	Distancia del cliente a contenedor [km]	FUNCIÓN OBJETIVO
1	1	1301.93	9, 10, 11, 12	9	1	0.04	52.08
2	2	1562.31	8, 9, 12, 13	9	1	0.06	93.74
3	3	2492.26	7, 8, 3, 14	7	1	0.06	149.54
4	4	2306.27	6, 7, 14, 15	7	1	0.07	161.44
5	5	1525.11	14, 15, 16	15	1	0.04	61.00
6	6	1934.29	15, 16, 17, 18	17	1	0.04	77.37
7	7	1822.70	6, 15, 18, 19	18	1	0.06	109.36
8	8	2120.28	5, 6, 19, 20	5	1	0.07	148.42
9	9	0.00	4, 5, 21, 29	4	1	0.08	0.00
10	10	2827.04	3, 4, 21, 22	3	1	0.08	226.16
11	11	2529.46	2, 3, 22, 23	2	1	0.08	202.36
12	12	3199.02	1, 2, 23, 24	24	1	0.08	255.92
13	13	1301.93	23, 24, 25, 26	23	1	0.05	65.10
14	14	1636.71	22, 23, 26, 27	23	1	0.05	81.84
15	15	1748.30	21, 22, 27, 28	22	1	0.05	87.42
16	16	1934.29	20, 21, 28, 29	20	1	0.06	116.06
17	17	1748.30	19, 20, 29, 30	20	1	0.06	104.90
18	18	2269.07	18, 19, 30, 31	19	1	0.06	136.14
19	19	2678.25	17, 18, 31, 32	18	1	0.07	187.48
20	20	2529.46	31, 32, 33, 34	31	1	0.07	177.06
21	21	2641.05	30, 31, 34, 35	30	1	0.06	158.46
22	22	1934.29	29, 30, 35, 36	29	1	0.07	135.40
23	23	2417.87	28, 29, 36, 37	28	1	0.07	169.25
24	24	1934.29	27, 28, 37, 38	27	1	0.06	116.06
25	25	2269.07	26, 27, 38, 39	26	1	0.06	136.14
26	26	2157.48	25, 26, 39, 40	39	1	0.06	129.45
27	27	1822.70	39, 40, 41, 42	39	1	0.07	127.59
28	28	2641.05	38, 39, 42, 43	42	1	0.06	158.46
29	29	1748.30	37, 38, 43, 44	37	1	0.07	122.38
30	30	2603.85	36, 37, 44, 45	36	1	0.07	182.27
31	31	2529.46	35, 36, 45, 46	35	1	0.07	177.06
32	32	1971.49	34, 35, 46, 47	35	1	0.06	118.29
33	33	2306.27	33, 34, 47, 48	34	1	0.07	161.44
34	34	2641.05	47, 48, 49, 50	47	1	0.06	158.46
35	35	0.00	46, 47, 50, 51	46	1	0.06	0.00
36	36	2157.48	45, 46, 51, 52	45	1	0.07	151.02
37	37	2343.47	44, 45, 52, 53	53	1	0.06	140.61
38	38	2789.84	43, 44, 53, 54	43	1	0.06	167.39
39	39	1934.29	42, 43, 54, 55	42	1	0.05	96.71
40	40	2901.44	53, 54, 56, 57	56	1	0.06	174.09
41	41	2083.08	52, 53, 57, 58	52	1	0.07	145.82
42	42, 47, 48	2566.66 3124.63 2938.64	51, 52, 57, 58, 59, 64, 65, 66	58	1	0.09	776.69
43	43, 44	2157.48 2380.67	49, 50, 51, 59, 60, 61	60	1	0.07	317.67
44	45, 46, 54, 55	3385.01 2827.04 2901.44	59, 60, 61, 62, 63, 64, 72, 74	63	1	0.1	911.35
45	62, 66	2938.64 3013.03	79, 80, 81, 82, 87, 88	81	1	0.07	416.62
46	56, 57, 60, 61	3013.03 2343.47 2938.64 2864.24	71, 72, 73, 74, 75, 76, 78, 79, 80	75	1	0.07	781.16
47	59, 63, 64, 65	3608.20 3199.02 3050.23 2715.45	76, 77, 78, 79, 82, 83, 84, 85, 86, 87	83	1	0.11	1383.02
48	51, 52, 53, 58	2789.84 2938.64 2529.46 2901.44	63, 64, 65, 66, 69, 70, 71, 72, 76, 77	70	1	0.14	1562.31
49	49, 50	3199.02 2194.68	56, 57, 66, 67, 68, 69	66	1	0.1	539.37

Se puede ver los resultados de resolver los 49 problemas de P-median, para la ubicación de los 49 contenedores. La tabla esta dividida en 8 características, de las cuales las primeras cuatro son parámetros, e información de entrada para cada problema. Esto se incluyó para poder identificar de mejor forma a cada conglomerado. Primeramente, está el número de conglomerado, que es, en este caso el cliente del problema; luego está punto de demanda, que son en este caso el punto de generación de RSU dentro de ese conglomerado; luego está la demanda en litros de cada uno de los conglomerados, que pueden tener 1 o dos puntos de demanda; después siguen los puntos candidatos que tiene cada conglomerado, en donde se puede ubicar un contenedor. Subsecuentemente, están las características que indican los resultados de cada conglomerado. El punto de servicio, del conglomerado, elegido para ubicar un contenedor; luego está la cantidad de contenedores asignados, que sería el valor de p para cada problema; luego está la distancia que cada cliente o conglomerado en total tendría que desplazarse para llegar al punto donde fue ubicado su contenedor; y finalmente la función objetivo que indica la distancia total mínima entre el conglomerado, cliente, y los puntos donde irá el punto de servicio asignado.

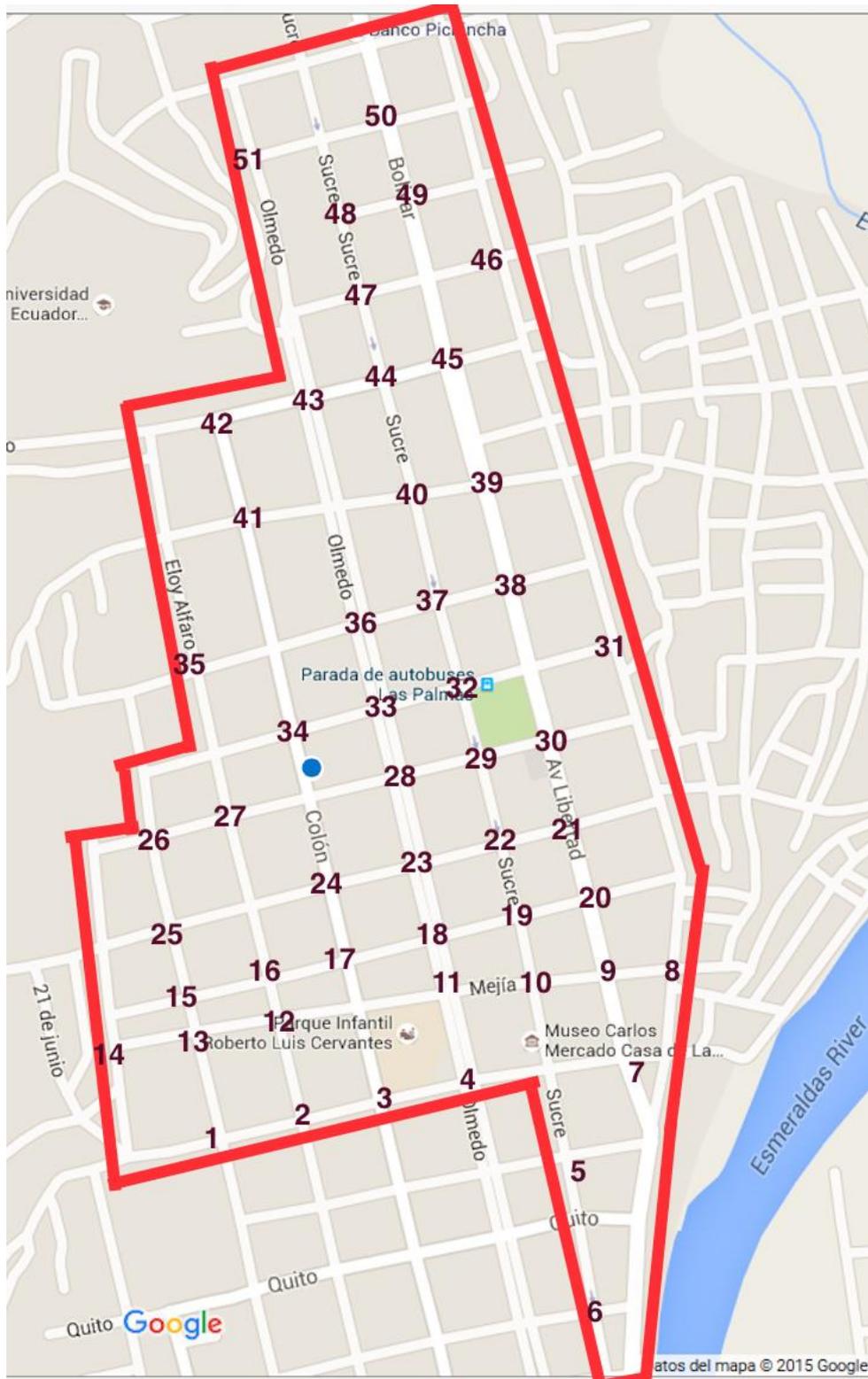
Anexo 9 Dimensiones de Vehículo Recolector del Estudio



Fuente: Empresa Themac, 2015

Anexo 10 Mapa de Información de Entrada para el ATSP

Mapa de Información de Entrada para recolección de 65 contenedores de 2.4m³.



Mapa de Información de Entrada para recolección de 65 contenedores de 3.2m³



Anexo 11 Formación de Conglomerados para TSP

Conglomerados de los diferentes puntos de servicio cuando los contenedores son de 2.4m³.

Subgrupo	Punto de Servicio Según Problema	Cantidad de Contenedores	Cantidad de RSU por Punto de Servicio	Cantidad de RSU del Subgrupo
1	1	1	2.4	21.6
	2	1	2.4	
	3	1	2.4	
	4	1	2.4	
	5	2	4.8	
	6	2	4.8	
	7	1	2.4	
2	8	1	2.4	21.6
	9	2	4.8	
	10	1	2.4	
	11	2	4.8	
	12	1	2.4	
	13	2	4.8	
3	14	1	2.4	21.6
	15	2	4.8	
	16	1	2.4	
	17	1	2.4	
	18	1	2.4	
	19	1	2.4	
	20	1	2.4	
4	21	1	2.4	21.6
	22	2	4.8	
	23	1	2.4	
	24	1	2.4	
	25	1	2.4	
	26	2	4.8	
	27	1	2.4	
5	28	1	2.4	21.6
	29	1	2.4	
	30	1	2.4	
	31	1	2.4	
	32	1	2.4	
	33	1	2.4	
	34	1	2.4	
6	35	2	4.8	21.6
	36	1	2.4	
	37	2	4.8	
	38	1	2.4	
	39	1	2.4	
	40	3	7.2	
7	41	1	2.4	21.6
	42	1	2.4	
	43	1	2.4	
	44	1	2.4	
	45	2	4.8	
	46	1	2.4	
8	47	1	2.4	4.8
	48	2	4.8	
	49	1	2.4	
	50	1	2.4	
	51	1	2.4	

Conglomerados de los diferentes puntos de servicio cuando los contenedores son de 3.2m³.

Subgrupo	Punto de Servicio Según Problema	Cantidad de Contenedores	Cantidad de RSU por Punto de Servicio	Cantidad de RSU del Subgrupo
1	1	1	3.2	22.4
	2	1	3.2	
	3	1	3.2	
	4	1	3.2	
	14	1	3.2	
	13	2	6.4	
2	5	2	6.4	22.4
	6	2	6.4	
	7	1	3.2	
	8	1	3.2	
	20	1	3.2	
3	9	2	6.4	22.4
	10	1	3.2	
	11	2	6.4	
	12	1	3.2	
	16	1	3.2	
4	17	1	3.2	22.4
	18	1	3.2	
	19	1	3.2	
	21	1	3.2	
	22	2	6.4	
	23	1	3.2	
5	15	2	6.4	22.4
	24	1	3.2	
	25	1	3.2	
	26	2	6.4	
	27	1	3.2	
6	28	1	3.2	22.4
	29	1	3.2	
	30	1	3.2	
	31	1	3.2	
	32	1	3.2	
	33	1	3.2	
7	34	1	3.2	22.4
	35	1	3.2	
	36	1	3.2	
	37	1	3.2	
	38	1	3.2	
	39	1	3.2	
40	1	3.2	22.4	
41	1	3.2		

Anexo 12 Distancias problemas de ATSP de contenedores de 2.4m³.

Conglomerado 1

	RS	1	2	3	4	5	6	7
RS	10000	2.49	2.58	2.69	2.79	3.00	3.18	3.00
1	2.52	10000	0.09	0.19	0.521	0.492	0.673	0.691
2	2.62	0.1	10000	0.088	0.421	0.404	0.582	0.594
3	2.71	0.187	0.09	10000	0.33	0.316	0.474	0.507
4	2.83	0.293	0.194	0.099	10000	0.202	0.38	0.396
5	3.16	0.643	0.535	0.453	0.345	10000	0.187	0.194
6	3.34	0.809	0.905	0.487	0.373	0.356	10000	0.343
7	3.00	0.49	0.394	0.292	0.192	0.199	0.387	10000

Conglomerado 2

	RS	8	9	10	11	12	13
RS	10000	3.08	3.00	3.19	2.92	2.61	2.51
8	3.15	10000	0.464	0.385	0.432	0.668	0.746
9	3.16	0.085	10000	0.456	0.354	0.54	0.803
10	3.03	0.169	0.084	10000	0.308	0.63	0.629
11	2.92	0.273	0.189	0.102	10000	0.316	0.393
12	2.73	0.769	0.692	0.299	0.196	10000	0.375
13	3.17	0.869	0.789	0.705	0.301	0.097	10000

Conglomerado 3

	RS	14	15	16	17	18	19	20	21
RS	10000	2.41	2.55	2.67	2.77	3.01	3.12	3.09	3.11
14	2.46	10000	0.14	0.257	0.359	0.476	0.705	0.676	0.696
15	2.68	0.129	10000	0.174	0.091	0.172	0.876	0.404	0.583
16	2.66	0.219	0.093	10000	0.212	0.372	0.481	0.734	0.852
17	2.76	0.316	0.187	0.085	10000	0.279	0.389	0.44	0.758
18	2.87	0.424	0.293	0.199	0.099	10000	0.274	0.341	0.266
19	2.99	0.576	0.403	0.3	0.317	0.477	10000	0.253	0.367
20	3.07	0.619	0.49	0.389	0.408	0.192	0.085	10000	0.367
21	3.38	0.929	0.802	0.701	0.724	0.499	0.393	0.088	10000

Conglomerado 4

	RS	22	23	24	25	26	27	28
RS	10000	3.02	2.92	2.81	2.61	2.75	2.87	3.04
22	3.07	10000	0.278	0.566	0.578	0.684	0.589	0.39
23	2.96	0.096	10000	0.453	0.467	0.654	0.485	0.114
24	2.85	0.575	0.1	10000	0.365	0.477	0.207	0.208
25	2.67	0.407	0.304	0.196	10000	0.108	0.221	0.552
26	2.77	0.512	0.405	0.574	0.105	10000	0.326	0.448
27	2.83	0.417	0.314	0.207	0.2	0.09	10000	0.57
28	3.56	0.21	0.108	0.215	0.404	0.294	0.192	10000

Conglomerado 5

	RS	29	30	31	32	33	34	35	36
RS	10000	3.33	3.21	3.42	3.24	3.14	3.03	3.05	3.58
29	3.19	10000	0.289	0.283	0.269	0.381	0.465	0.483	0.283
30	3.24	0.089	10000	0.195	0.178	0.273	0.378	0.579	0.87
31	3.4	0.271	0.189	10000	0.191	0.462	0.599	0.574	0.385
32	3.21	0.088	0.168	0.19	10000	0.97	0.209	0.392	0.198
33	3.1	0.185	0.472	0.285	0.098	10000	0.101	0.287	0.103
34	3.02	0.289	0.375	0.391	0.203	0.497	10000	0.179	0.209
35	3.04	0.618	0.496	0.956	0.494	0.407	0.308	10000	0.311
36	3.25	0.295	0.382	0.389	0.464	0.1	0.209	0.195	10000

Conglomerado 6

	RS	37	38	39	40	41	42
RS	10000	3.64	3.42	3.57	3.49	3.3	3.41
37	3.34	10000	0.287	0.207	0.134	0.353	0.484
38	3.43	0.087	10000	0.119	0.205	0.427	0.571
39	3.44	0.2015	0.298	10000	0.079	0.276	0.434
40	3.5	0.132	0.415	0.333	10000	0.48	0.337
41	3.17	0.329	0.613	0.28	0.198	10000	0.13
42	1.14	0.467	0.782	0.43	0.325	0.131	10000

Conglomerado 7

	RS	43	44	45	46	47	48	49
RS	10000	3.51	3.62	3.69	3.86	3.68	3.96	3.88
43	3.37	10000	0.086	0.166	0.36	0.182	0.46	0.366
44	3.47	0.91	10000	0.078	0.276	0.099	0.543	0.283
45	3.55	0.177	0.081	10000	0.19	0.182	0.627	0.197
46	3.75	0.369	0.275	0.202	10000	0.178	0.27	0.192
47	3.58	0.201	0.255	0.178	0.169	10000	0.426	0.185
48	3.67	0.285	0.191	0.271	0.273	0.096	10000	0.076
49	3.76	0.363	0.277	0.199	0.193	0.17	0.074	10000

Conglomerado 8

	RS	50	51
RS	10000	3.95	3.79
50	3.85	10000	0.523
51	3.86	0.16	10000

Anexo 13 Distancias para problemas de TSP de contenedores de 3.2m³.

Conglomerado 1

	RS	1	2	3	4	13	14
RS	10000.00	2.49	2.58	2.69	2.79	2.51	2.41
1	2.52	10000.00	0.09	0.19	0.521	0.131	0.301
2	2.62	0.1	10000.00	0.088	0.421	0.318	0.22
3	2.71	0.187	0.09	10000.00	0.33	0.313	0.43
4	2.83	0.293	0.194	0.099	10000.00	0.425	0.53
13	3.17	0.127	0.224	0.309	0.411	10000.00	0.17
14	2.46	0.231	0.318	0.629	0.736	0.099	10000.00

Conglomerado 2

	RS	5	6	7	8	20
RS	10000	3.00	3.18	3.00	3.08	3.09
5	3.16	10000	0.187	0.194	0.305	0.418
6	3.34	0.356	10000	0.343	0.527	0.534
7	3.00	0.199	0.387	10000	0.178	0.187
8	3.15	0.597	0.52	0.134	10000	0.313
20	3.07	0.7	0.538	0.192	0.17	10000

Conglomerado 3

	RS	9	10	11	12	16
RS	10000	3.00	3.19	2.92	2.61	2.67
9	3.16	10000	0.456	0.354	0.54	0.48
10	3.03	0.084	10000	0.308	0.63	0.569
11	2.92	0.189	0.102	10000	0.316	0.254
12	2.73	0.692	0.299	0.196	10000	0.053
16	2.66	0.644	0.561	0.436	0.048	10000

Conglomerado 4

	RS	17	18	19	21	22	23
RS	10000	2.77	3.01	3.12	3.11	3.02	2.92
17	2.76	10000	0.279	0.389	0.758	0.295	0.195
18	2.87	0.099	10000	0.274	0.266	0.182	0.291
19	2.99	0.317	0.477	10000	0.367	0.281	0.398
21	3.38	0.724	0.499	0.393	10000	0.473	0.577
22	3.07	0.299	0.194	0.092	0.433	10000	0.278
23	2.96	0.185	0.295	0.188	0.568	0.096	10000

Conglomerado 5

	RS	15	24	25	26	27
RS	10000	3.00	2.81	2.61	2.75	2.87
15	2.68	10000	0.179	0.177	0.287	0.201
24	2.85	0.282	10000	0.365	0.477	0.207
25	2.67	0.268	0.196	10000	0.108	0.221
26	2.77	0.197	0.574	0.105	10000	0.326
27	2.83	0.289	0.207	0.2	0.09	10000

Conglomerado 6

	RS	28	29	30	31	32	33	34
RS	10000	3.04	3.33	3.21	3.14	3.03	3.05	3.58
28	3.56	10000	0.268	0.356	0.084	0.182	0.382	0.191
29	3.19	0.099	10000	0.289	0.381	0.465	0.483	0.283
30	3.24	0.188	0.089	10000	0.273	0.378	0.579	0.87
31	3.1	0.085	0.185	0.472	10000	0.101	0.287	0.103
32	3.02	0.183	0.289	0.375	0.497	10000	0.179	0.209
33	3.04	0.277	0.618	0.496	0.407	0.308	10000	0.311
34	3.25	0.19	0.295	0.382	0.1	0.209	0.195	10000

Conglomerado 7

	RS	35	36	37	38	39	40	41
RS	10000	3.42	3.57	3.3	3.51	3.76	3.87	3.87
35	3.43	10000	0.119	0.427	0.668	0.537	0.652	0.845
36	3.44	0.298	10000	0.276	0.337	0.247	0.536	0.723
37	3.17	0.613	0.28	10000	0.231	0.489	0.834	0.602
38	3.37	0.649	0.322	0.235	10000	0.26	0.544	0.374
39	3.65	0.77	0.25	0.502	0.266	10000	0.587	0.42
40	3.94	0.862	0.777	0.808	0.567	0.293	10000	0.365
41	3.78	1.03	0.76	0.627	0.385	0.267	0.166	10000

Anexo 14 Código de Programación de ATSP en Lenguaje Algebraico de Modelado

LINGO.

```

MODEL:
! Traveling Salesman Problem;

SETS:

PUNTOS / 1.. 3/: U; ! U( I) = sequence no. of cuadras;
LINK( PUNTOS, PUNTOS):
DIST, ! The distance matrix;
X; !X(I,J)=1ifweuselinkI,J;

ENDSETS

DATA: !Distance matrix, it need not be symmetric;

DIST = 10000 3.95 3.79
3.85 10000 0.523
3.86 0.16 10000;

ENDDATA

!The model:Ref. Desrochers & Laporte, OR Letters,
Feb. 91;
N = @SIZE( PUNTOS);
MIN = @SUM( LINK: DIST * X);
@FOR( PUNTOS( K):

! It must be entered;
@SUM( PUNTOS( I)| I #NE# K: X( I, K)) = 1;

! It must be departed;
@SUM( PUNTOS( J)| J #NE# K: X( K, J)) = 1;

! Weak form of the subtour breaking constraints;
@FOR( PUNTOS( J)| J #GT# 1 #AND# J #NE# K:
U( J) >= U( K) + X( K, J) -
( N - 2) * ( 1 - X( K, J)) +
( N - 3) * X( J, K)
););

! Make the X's binarias;
@FOR( LINK: @BIN( X));

! For the first and last stop we know...;
@FOR( PUNTOS( K)| K #GT# 1:
U( K) <= N - 1 - ( N - 2) * X( 1, K);
U(K)>=1 +(N-2)*X(K,1) );

END

```

Anexo 15 Solución de LINGO para problemas de ATSP con contenedores de 2.4m³.

En las salidas de LINGO se puede ver que los problemas son resueltos con la heurística Branch-and-Bound para MILP (Mixe Integer Linear Problem). Sacan el resultado (Objetivo), el número de iteraciones, la cantidad de variables, la cantidad de restricciones. Y en la utilización de memoria, está entre los valores de 30-50kb. El tiempo de resolución es el mínimo en todos los problemas, de 0.

Solución del Problema 1 de contenedores de 2.4m³, salida de Lingo:

Solver Status Model Class: MILP State: Global Opt Objective: 6.512 Infeasibility: 0 Iterations: 623		Variables Total: 72 Nonlinear: 0 Integers: 64	
Extended Solver Status Solver Type: B-and-B Best Obj: 6.512 Obj Bound: 6.512 Steps: 1 Active: 0		Constraints Total: 80 Nonlinear: 0	
		Nonzeros Total: 400 Nonlinear: 0	
		Generator Memory Used (K) 43	
		Elapsed Runtime (hh:mm:ss) 00:00:00	

Variable	Value	Reduced Cost
N	8.000000	0.000000
U(1)	0.000000	0.000000
U(2)	7.000000	0.000000
U(3)	1.000000	0.000000
U(4)	6.000000	0.000000
U(5)	5.000000	0.000000
U(6)	2.000000	0.000000
U(7)	3.000000	0.000000
U(8)	4.000000	0.000000

Solución del Problema 2 de contenedores de 2.4m^3 , salida de Lingo:

Solver Status		Variables	
Model Class:	MILP	Total:	56
State:	Global Opt	Nonlinear:	0
Objective:	6.224	Integers:	49
Infeasibility:	0	Constraints	
Iterations:	33	Total:	63
		Nonlinear:	0
Extended Solver Status		Nonzeros	
Solver Type:	B-and-B	Total:	301
Best Obj:	6.224	Nonlinear:	0
Obj Bound:	6.224	Generator Memory Used (K)	
Steps:	0	39	
Active:	0	Elapsed Runtime (hh:mm:ss)	
		00:00:00	

Variable	Value	Reduced Cost
N	7.000000	0.000000
U (1)	0.000000	0.000000
U (2)	6.000000	0.000000
U (3)	5.000000	0.000000
U (4)	4.000000	0.000000
U (5)	3.000000	0.000000
U (6)	2.000000	0.000000
U (7)	1.000000	0.000000

Solución del Problema 3 de contenedores de 2.4m^3 , salida de Lingo:

Solver Status Model Class: MILP State: Global Opt Objective: 6.223 Infeasibility: 0 Iterations: 277		Variables Total: 90 Nonlinear: 0 Integers: 81	
Extended Solver Status Solver Type: B-and-B Best Obj: 6.223 Obj Bound: 6.223 Steps: 0 Active: 0		Constraints Total: 99 Nonlinear: 0	
		Nonzeros Total: 513 Nonlinear: 0	
		Generator Memory Used (K) 47	
		Elapsed Runtime (hh:mm:ss) 00:00:00	

Variable	Value	Reduced Cost
N	9.000000	0.000000
U(1)	0.000000	0.000000
U(2)	1.000000	0.000000
U(3)	2.000000	0.000000
U(4)	8.000000	0.000000
U(5)	7.000000	0.000000
U(6)	3.000000	0.000000
U(7)	6.000000	0.000000
U(8)	5.000000	0.000000
U(9)	4.000000	0.000000

Solución del Problema 4 de contenedores de 2.4m^3 , salida de Lingo:

Solver Status Model Class: MILP State: Global Opt Objective: 6.444 Infeasibility: 0 Iterations: 25		Variables Total: 72 Nonlinear: 0 Integers: 64	
Extended Solver Status Solver Type: B-and-B Best Obj: 6.444 Obj Bound: 6.444 Steps: 0 Active: 0		Constraints Total: 80 Nonlinear: 0	
		Nonzeros Total: 400 Nonlinear: 0	
		Generator Memory Used (K) 43	
		Elapsed Runtime (hh:mm:ss) 00:00:00	

Variable	Value	Reduced Cost
N	8.000000	0.000000
U (1)	0.000000	0.000000
U (2)	4.000000	0.000000
U (3)	3.000000	0.000000
U (4)	2.000000	0.000000
U (5)	1.000000	0.000000
U (6)	7.000000	0.000000
U (7)	6.000000	0.000000
U (8)	5.000000	0.000000

Solución del Problema 5 de contenedores de 2.4m^3 , salida de Lingo:

Solver Status Model Class: MILP State: Global Opt Objective: 7.376 Infeasibility: 0 Iterations: 856		Variables Total: 90 Nonlinear: 0 Integers: 81	
Extended Solver Status Solver Type: B-and-B Best Obj: 7.376 Obj Bound: 7.376 Steps: 0 Active: 0		Constraints Total: 99 Nonlinear: 0	
		Nonzeros Total: 513 Nonlinear: 0	
		Generator Memory Used (K) 47	
		Elapsed Runtime (hh:mm:ss) 00 : 00 : 00	

Variable	Value	Reduced Cost
N	9.000000	0.000000
U(1)	0.000000	0.000000
U(2)	8.000000	0.000000
U(3)	7.000000	0.000000
U(4)	6.000000	0.000000
U(5)	5.000000	0.000000
U(6)	4.000000	0.000000
U(7)	1.000000	0.000000
U(8)	2.000000	0.000000
U(9)	3.000000	0.000000

Solución del Problema 6 de contenedores de 2.4m^3 , salida de Lingo:

Solver Status Model Class: MILP State: Global Opt Objective: 5.373 Infeasibility: 0 Iterations: 33		Variables Total: 56 Nonlinear: 0 Integers: 49	
Extended Solver Status Solver Type: B-and-B Best Obj: 5.373 Obj Bound: 5.373 Steps: 0 Active: 0		Constraints Total: 63 Nonlinear: 0	
		Nonzeros Total: 301 Nonlinear: 0	
		Generator Memory Used (K) 39	
		Elapsed Runtime (hh:mm:ss) 00 : 00 : 00	

Variable	Value	Reduced Cost
N	7.000000	0.000000
U (1)	0.000000	0.000000
U (2)	4.000000	0.000000
U (3)	1.000000	0.000000
U (4)	2.000000	0.000000
U (5)	3.000000	0.000000
U (6)	5.000000	0.000000
U (7)	6.000000	0.000000

Solución del Problema 7 de contenedores de 2.4m^3 , salida de Lingo:

Solver Status Model Class: MILP State: Global Opt Objective: 7.806 Infeasibility: 0 Iterations: 972		Variables Total: 72 Nonlinear: 0 Integers: 64	
Extended Solver Status Solver Type: B-and-B Best Obj: 7.806 Obj Bound: 7.806 Steps: 0 Active: 0		Constraints Total: 80 Nonlinear: 0	
		Nonzeros Total: 400 Nonlinear: 0	
		Generator Memory Used (K) 43	
		Elapsed Runtime (hh:mm:ss) 00:00:00	

Variable	Value	Reduced Cost
N	8.000000	0.000000
U(1)	0.000000	0.000000
U(2)	1.000000	0.000000
U(3)	2.000000	0.000000
U(4)	3.000000	0.000000
U(5)	4.000000	0.000000
U(6)	7.000000	0.000000
U(7)	6.000000	0.000000
U(8)	5.000000	0.000000

Solución del Problema 8 de contenedores de 2.4m^3 , salida de Lingo:

Solver Status Model Class: MILP State: Global Opt Objective: 7.8 Infeasibility: 0 Iterations: 0		Variables Total: 12 Nonlinear: 0 Integers: 9	
Extended Solver Status Solver Type: B-and-B Best Obj: 7.8 Obj Bound: 7.8 Steps: 0 Active: 0		Constraints Total: 15 Nonlinear: 0	
		Nonzeros Total: 41 Nonlinear: 0	
		Generator Memory Used (K) 29	
		Elapsed Runtime (hh:mm:ss) 00 : 00 : 00	

Variable	Value	Reduced Cost
N	3.000000	0.000000
U (1)	0.000000	0.000000
U (2)	2.000000	0.000000
U (3)	1.000000	0.000000

Anexo 16 Solución de LINGO para problemas de ATSP con contenedores de 3.2m³.

En las salidas de LINGO se puede ver que los problemas son resueltos con la heurística Branch-and-Bound para MILP (Mixed Integer Linear Problem). Sacan el resultado (Objetivo), el número de iteraciones, la cantidad de variables, la cantidad de restricciones. Y en la utilización de memoria, está entre los valores de 30-50kb. El tiempo de resolución es el mínimo en todos los problemas.

Solución del Problema 1 de contenedores de 3.2m³, salida de Lingo:

Solver Status		Variables	
Model Class:	MILP	Total:	56
State:	Global Opt	Nonlinear:	0
Objective:	5.729	Integers:	49
Infeasibility:	0	Constraints	
Iterations:	21	Total:	63
		Nonlinear:	0
Extended Solver Status		Nonzeros	
Solver Type:	B-and-B	Total:	301
Best Obj:	5.729	Nonlinear:	0
Obj Bound:	5.729	Generator Memory Used (K)	
Steps:	0	39	
Active:	0	Elapsed Runtime (hh:mm:ss)	
		00:00:00	

Variable	Value	Reduced Cost
N	7.000000	0.000000
U(1)	0.000000	0.000000
U(2)	6.000000	0.000000
U(3)	5.000000	0.000000
U(4)	4.000000	0.000000
U(5)	3.000000	0.000000
U(6)	2.000000	0.000000
U(7)	1.000000	0.000000

Solución del Problema 2 de contenedores de 3.2m^3 , salida de Lingo:

Solver Status Model Class: MILP State: Global Opt Objective: 7.025 Infeasibility: 0 Iterations: 39		Variables Total: 42 Nonlinear: 0 Integers: 36	
Extended Solver Status Solver Type: B-and-B Best Obj: 7.025 Obj Bound: 7.025 Steps: 0 Active: 0		Constraints Total: 48 Nonlinear: 0	
		Nonzeros Total: 216 Nonlinear: 0	
		Generator Memory Used (K) 36	
		Elapsed Runtime (hh:mm:ss) 00:00:00	

Variable	Value	Reduced Cost
N	6.000000	0.000000
U (1)	0.000000	0.000000
U (2)	1.000000	0.000000
U (3)	2.000000	0.000000
U (4)	5.000000	0.000000
U (5)	4.000000	0.000000
U (6)	3.000000	0.000000

Solución del Problema 3 de contenedores de 3.2m^3 , salida de Lingo:

Solver Status		Variables	
Model Class:	MILP	Total:	42
State:	Global Opt	Nonlinear:	0
Objective:	6.132	Integers:	36
Infeasibility:	$8.88178\text{e}-016$	Constraints	
Iterations:	33	Total:	48
Extended Solver Status		Nonlinear:	0
Solver Type:	B-and-B	Nonzeros	
Best Obj:	6.132	Total:	216
Obj Bound:	6.132	Nonlinear:	0
Steps:	0	Generator Memory Used (K)	
Active:	0	36	
		Elapsed Runtime (hh:mm:ss)	
		00:00:00	

Variable	Value	Reduced Cost
N	6.000000	0.000000
U(1)	0.000000	0.000000
U(2)	4.000000	0.000000
U(3)	3.000000	0.000000
U(4)	2.000000	0.000000
U(5)	1.000000	0.000000
U(6)	5.000000	0.000000

Solución del Problema 4 de contenedores de 3.2m^3 , salida de Lingo:

Solver Status		Variables	
Model Class:	MILP	Total:	56
State:	Global Opt	Nonlinear:	0
Objective:	6.833	Integers:	49
Infeasibility:	0	Constraints	
Iterations:	20	Total:	63
Extended Solver Status		Nonlinear:	0
Solver Type:	B-and-B	Nonzeros	
Best Obj:	6.833	Total:	301
Obj Bound:	6.833	Nonlinear:	0
Steps:	0	Generator Memory Used (K)	
Active:	0	39	
		Elapsed Runtime (hh:mm:ss)	
		00:00:00	

Variable	Value	Reduced Cost
N	7.000000	0.000000
U(1)	0.000000	0.000000
U(2)	6.000000	0.000000
U(3)	5.000000	0.000000
U(4)	3.000000	0.000000
U(5)	4.000000	0.000000
U(6)	2.000000	0.000000
U(7)	1.000000	0.000000

Solución del Problema 5 de contenedores de 3.2m^3 , salida de Lingo:

Solver Status Model Class: MILP State: Global Opt Objective: 5.98 Infeasibility: 0 Iterations: 16		Variables Total: 42 Nonlinear: 0 Integers: 36	
Extended Solver Status Solver Type: B-and-B Best Obj: 5.98 Obj Bound: 5.98 Steps: 0 Active: 0		Constraints Total: 48 Nonlinear: 0	
		Nonzeros Total: 216 Nonlinear: 0	
		Generator Memory Used (K) 36	
		Elapsed Runtime (hh:mm:ss) 00:00:00	

Variable	Value	Reduced Cost
N	6.000000	0.000000
U(1)	0.000000	0.000000
U(2)	5.000000	0.000000
U(3)	2.000000	0.000000
U(4)	1.000000	0.000000
U(5)	4.000000	0.000000
U(6)	3.000000	0.000000

Solución del Problema 6 de contenedores de 3.2m^3 , salida de Lingo:

Solver Status		Variables	
Model Class:	MILP	Total:	72
State:	Global Opt	Nonlinear:	0
Objective:	7.009	Integers:	64
Infeasibility:	$1.11022\text{e}-015$	Constraints	
Iterations:	51	Total:	80
		Nonlinear:	0
Extended Solver Status		Nonzeros	
Solver Type:	B-and-B	Total:	400
Best Obj:	7.009	Nonlinear:	0
Obj Bound:	7.009	Generator Memory Used (K)	
Steps:	0	43	
Active:	0	Elapsed Runtime (hh:mm:ss)	
		00:00:00	

Variable	Value	Reduced Cost
N	8.000000	0.000000
U(1)	0.000000	0.000000
U(2)	3.000000	0.000000
U(3)	2.000000	0.000000
U(4)	1.000000	0.000000
U(5)	5.000000	0.000000
U(6)	6.000000	0.000000
U(7)	7.000000	0.000000
U(8)	4.000000	0.000000

Solución del Problema 7 de contenedores de 3.2m^3 , salida de Lingo:

Solver Status Model Class: MILP State: Global Opt Objective: 8.342 Infeasibility: $4.44089\text{e-}016$ Iterations: 468		Variables Total: 72 Nonlinear: 0 Integers: 64	
Extended Solver Status Solver Type: B-and-B Best Obj: 8.342 Obj Bound: 8.342 Steps: 0 Active: 0		Constraints Total: 80 Nonlinear: 0	
		Nonzeros Total: 400 Nonlinear: 0	
		Generator Memory Used (K) 43	
		Elapsed Runtime (hh:mm:ss) 00:00:00	

Variable	Value	Reduced Cost
N	8.000000	0.000000
U(1)	0.000000	0.000000
U(2)	7.000000	0.000000
U(3)	6.000000	0.000000
U(4)	1.000000	0.000000
U(5)	2.000000	0.000000
U(6)	5.000000	0.000000
U(7)	4.000000	0.000000
U(8)	3.000000	0.000000

Contenedores 3.2m³

Conglomerado	Punto de Demanda	Demanda [t]	Puntos de Servicio Candidatos	Punto Servicio Elegido para Contenedor	Cantidad de Contenedores Asignados	Distancia del cliente a contenedor [km]	FUNCIÓN OBJETIVO
1	1	1301.93	9, 10, 11, 12	9	1	0.04	52.08
2	2	1562.31	8, 9, 12, 13	9	1	0.06	93.74
3	3	2492.26	7, 8, 3, 14	7	1	0.06	149.54
4	4	2306.27	6, 7, 14, 15	7	1	0.07	161.44
5	5	1525.11	14, 15, 16	15	1	0.04	61.00
6	6	1934.29	15, 16, 17, 18	17	1	0.04	77.37
7	7	1822.70	6, 15, 18, 19	18	1	0.06	109.36
8	8	2120.28	5, 6, 19, 20	5	1	0.07	148.42
9	9	0.00	4, 5, 21, 29	4	1	0.08	0.00
10	10	2827.04	3, 4, 21, 22	3	1	0.08	226.16
11	11	2529.46	2, 3, 22, 23	2	1	0.08	202.36
12	12	3199.02	1, 2, 23, 24	24	1	0.08	255.92
13	13	1301.93	23, 24, 25, 26	23	1	0.05	65.10
14	14	1636.71	22, 23, 26, 27	23	1	0.05	81.84
15	15	1748.30	21, 22, 27, 28	22	1	0.05	87.42
16	16	1934.29	20, 21, 28, 29	20	1	0.06	116.06
17	17	1748.30	19, 20, 29, 30	20	1	0.06	104.90
18	18	2269.07	18, 19, 30, 31	19	1	0.06	136.14
19	19	2678.25	17, 18, 31, 32	18	1	0.07	187.48
20	20	2529.46	31, 32, 33, 34	31	1	0.07	177.06
21	21	2641.05	30, 31, 34, 35	30	1	0.06	158.46
22	22	1934.29	29, 30, 35, 36	29	1	0.07	135.40
23	23	2417.87	28, 29, 36, 37	28	1	0.07	169.25
24	24	1934.29	27, 28, 37, 38	27	1	0.06	116.06
25	25	2269.07	26, 27, 38, 39	26	1	0.06	136.14
26	26	2157.48	25, 26, 39, 40	39	1	0.06	129.45
27	27	1822.70	39, 40, 41, 42	39	1	0.07	127.59
28	28	2641.05	38, 39, 42, 43	42	1	0.06	158.46
29	29	1748.30	37, 38, 43, 44	37	1	0.07	122.38
30	30	2603.85	36, 37, 44, 45	36	1	0.07	182.27
31	31	2529.46	35, 36, 45, 46	35	1	0.07	177.06
32	32	1971.49	34, 35, 46, 47	35	1	0.06	118.29
33	33	2306.27	33, 34, 47, 48	34	1	0.07	161.44
34	34	2641.05	47, 48, 49, 50	47	1	0.06	158.46
35	35	0.00	46, 47, 50, 51	46	1	0.06	0.00
36	36	2157.48	45, 46, 51, 52	45	1	0.07	151.02
37	37	2343.47	44, 45, 52, 53	53	1	0.06	140.61
38	38	2789.84	43, 44, 53, 54	43	1	0.06	167.39
39	39	1934.29	42, 43, 54, 55	42	1	0.05	96.71
40	40	2901.44	53, 54, 56, 57	56	1	0.06	174.09
41	41	2083.08	52, 53, 57, 58	52	1	0.07	145.82
42	42, 47, 48	2566.66	51, 52, 57, 58, 59, 64, 65, 66	58	3	0.09	776.69
		3124.63					
		2938.64					
43	43, 44	2157.48	49, 50, 51, 59, 60, 61	60	2	0.07	317.67
		2380.67					
44	45, 46, 54, 55	3385.01	59, 60, 61, 62, 63, 64, 72, 74	63	3	0.1	911.35
		2827.04					
		2901.44					
45	62, 66	2938.64	79, 80, 81, 82, 87, 88	81	2	0.07	416.62
		3013.03					
		3013.03					
46	56, 57, 60, 61	2343.47	71, 72, 73, 74, 75, 76, 78, 79, 80	75	4	0.07	781.16
		2938.64					
		2864.24					
		3608.20					
47	59, 63, 64, 65	3199.02	76, 77, 78, 79, 82, 83, 84, 85, 86, 87	83	4	0.11	1383.02
		3050.23					
		2715.45					
		2789.84					
48	51, 52, 53, 58	2938.64	63, 64, 65, 66, 69, 70, 71, 72, 76, 77	70	4	0.14	1562.31
		2529.46					
		2901.44					
		3199.02					
49	49, 50	2194.68	56, 57, 66, 67, 68, 69	66	2	0.1	539.37
		2194.68					

Anexo 18 Rutas de la propuesta (opción 2).



Elaboración propia, Google maps 2015.