

PLANEACIÓN DE UN SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS DOMÉSTICOS

AYLEEN IBARRA RAMIREZ

SASKIA JULIET DURAN DEL VALLE

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC
PROGRAMA DE INGENIERIA INDUSTRIAL
BARRANQUILLA
2016**

PLANEACIÓN DE UN SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS DOMÉSTICOS

AYLEEN IBARRA RAMIREZ

SASKIA JULIET DURAN DEL VALLE

Tesis de grado para optar al título de: “INGENIERO INDUSTRIAL”

**JOSE DAVID FERRO CORREA
ASESOR**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC
PROGRAMA DE INGENIERIA INDUSTRIAL
BARRANQUILLA
2016**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma de presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Barranquilla, Octubre de 2016

AGRADECIMIENTOS

De manera especial, expresamos nuestros agradecimientos:

A Dios por su presencia divina en cada paso de nuestras vidas y en especial a lo largo de nuestra carrera profesional. Por darnos la sabiduría y la fortaleza necesaria para culminar esta etapa de nuestras vidas.

A nuestros padres por siempre querer lo mejor para nosotras, por su arduo trabajo cada día para ofrecernos lo mejor, por ser nuestro ejemplo a seguir e impulsores de nuestros sueños.

A nuestro tutor Ing. José Ferro Correa por compartir con nosotras sus conocimientos, por todo su apoyo, guía, paciencia y sus correcciones, las cuales nos llevaron a conseguir el éxito en nuestro proyecto.

DEDICATORIA

A Dios por ser nuestro soporte en todo momento.

A nuestros padres por su apoyo incondicional. Por infundir en nosotras valores que nos hacen mejores personas. Por su comprensión y esfuerzo en que alcancemos nuestros sueños.

A todas las personas que de una forma u otra hacen posible alcanzar este logro

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO I. GENERALIDADES DEL PROYECTO	12
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.1.1. DIAGRAMA CAUSA-EFECTO	14
1.1.2. DIAGRAMA MEDIOS-FINES	15
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	16
1.3 OBJETIVOS.....	20
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	20
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1.4 METODOLOGÍA EMPLEADA.....	20
1.5 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES DEL PROYECTO	22
1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES	23
CAPITULO II. MARCO DE REFERENCIA	24
2.1 MARCO CONCEPTUAL	24
2.2 MARCO TEÓRICO	26
2.3 . ESTADO DEL ARTE	42
CAPITULO III. DESARROLLO CONCEPTUAL DEL DISEÑO PROPUESTO	46
3.1 DISEÑO CONCEPTUAL	46
3.1.1. COMPOSICIÓN DE UN SRRD	48
3.1.2. MODELO PARA ESTIMAR COSTOS OPERATIVOS DE UN SRRD	52
3.1.2.1. Aplicación del Modelo	62
3.1.2.3 ANÁLISIS DEL MODELO	65
CONCLUSIONES.....	68
BIBLIOGRAFIA.....	70

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Cronograma.....	22
Tabla 2.1. Tipos de Residuos.....	38
Tabla 2.2. Incentivos que determinan las actitudes del reciclaje.....	39
Tabla 3.1. Componentes de un SRRD.....	50
Tabla 3.2. Valores de parámetros ingresados en el modelo.....	62
Tabla 3.3. Resultados del modelo.....	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama Causa-Efecto.....	14
Figura 1.2 Diagrama Medios-Fines.....	15
Figura 1.3. Proyección de generación de residuos al año 2100.....	17
Figura 1.4. Reciclaje de Residuos Sólidos Domésticos en la Unión Europea.....	17
Figura 2.1. Posibles cadenas de suministro en logística inversa.....	28
Figura 2.2. Procesos de Logística Inversa.....	30
Figura 2.3. Camión de carga trasera.....	35
Figura 2.4. Camión de carga lateral.....	36
Figura. 2.5 Vehículo de recolección al vacío.....	37
Figura 2.6 Camión multicámara.....	37
Figura 3.1. Planeación de un SRRD.....	47

RESUMEN

La implementación de un Sistema de Recolección de Residuos Domésticos (en adelante SRRD) tiene un impacto significativo sobre las tasas de reciclaje de diversos materiales y los costos de un sistema de gestión de residuos.

Es por esta razón, que las partes directamente implicadas en la elección del sistema, requieren de información de apoyo para seleccionar un sistema óptimo que se ajuste a las condiciones de la región.

Con frecuencia, se encuentra información con casos de estudio que analizan la implementación de estos sistemas y sus resultados en diversas regiones del mundo, pero la información sobre la planeación de un SRRD es bastante escasa.

Para profundizar en este tema, en el presente estudio, creamos un diagrama de flujo que busca orientar la planeación de un sistema acompañado de una tabla de datos que reúne los componentes básicos que determinan el éxito de un SRRD. Posteriormente, creamos un modelo de costos para estimar la inversión inicial que debe realizarse en el SRRD y generar un presupuesto que apoye la planeación del sistema.

En el proceso de planeación el lector encontrará actividades como, reconocer el origen del sistema o las razones por las que se implementa, si es de carácter obligatorio o voluntario, la caracterización del flujo de residuos, los límites ambientales, económicos y sociales del sistema, un estudio demográfico de la región, conformar el SRRD con base a los métodos de recolección, establecer la forma de facturación, los tipos de incentivos y las estrategias de comunicación con las que se socializará el sistema a la comunidad.

Dentro de los métodos de recolección, encontramos el método curbside y el método drop-off. Desde el enfoque de cantidad de residuos recolectados, el método curbside representa una tasa de recolección más alta dada la comodidad que tiene el usuario al tener los contenedores en casa. Desde el enfoque económico, en el método drop-off la inversión en vehículos y contenedores, así como los costos operativos son mucho más bajos.

Palabras Claves: Logística inversa, sistemas de recolección, recolección.

ABSTRACT

Implementing a Household Waste Collection System (hereinafter SRRD) has a significant impact on recycling rates for various materials and costs of a waste management system.

It is for this reason that the parties directly involved in the choice of system, require supporting information to select an optimal system that meets the conditions of the region.

Often, you will find information with case studies that analyze the implementation of these systems and their results in different regions of the world, but information about planning a SRRD is quite low.

To delve into this subject, in the present study, we created a flowchart that seeks to guide the planning of a system accompanied by a data table that meets the basic components that determine the success of a SRRD. We then built a cost model to estimate the initial investment to be done in the SRRD and a quote to support system planning.

In the planning process the reader will find activities like, recognize the origin of the system or the reasons why it is implemented, if it is mandatory or voluntary, the characterization of the waste stream, environmental, economic and social system boundaries, a demographic study of the region, shaping the SRRD based on collection methods, establish the form of billing, the types of incentives and communication strategies with which the system is socialized to the community.

Within collection methods, we find the method curbside and drop-off method. From the perspective of quantity of collected waste, curbside method represents a collection rate higher given the convenience for the user to have the containers at home. From the economic approach, with the drop-off method, investment in vehicles and containers, as well as operating costs are much lower.

Key Words: Reverse logistics, collection systems, collection.

CAPITULO I. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Diferentes estudios han examinado diversos sistemas de gestión de residuos, con el objetivo de conocer los beneficios y consecuencias de reutilizar, reciclar o desechar los residuos por medio de vertederos o incineración.

El resultado de estas investigaciones concluye que el verter los residuos o incinerarlos, genera grandes cantidades de gases de efecto invernadero (Larsen et al., 2010), por lo que muchos países desarrollados en el mundo están empezando a implementar políticas que exigen a las empresas manufactureras encargarse de sus productos una vez hayan cumplido su ciclo de vida. Ejemplo de estas políticas, es la Responsabilidad Extendida del Productor (Extended Producer Responsibility, EPR) implementada en la Unión Europea (Özdemir-Akyıldırım, 2015; Yu & Solvang, 2016; Fleischmann et al. 2000). Políticas como está, han permitido que los esfuerzos por reciclar se hayan intensificado y diferentes sistemas de gestión de residuos y programas de separación en la fuente hayan sido desarrollados (Dahlén et al. 2007; Iriarte et al., 2009). Actualmente en algunos países en desarrollo como el nuestro, aún no se han implementado leyes que obliguen a las empresas a recuperar de manos del usuario los productos de uso doméstico, una vez hayan culminado su ciclo de vida.

Dentro de los sistemas de gestión de residuos se encuentra un ciclo de actividades como la recolección, el transporte, el procesamiento, el reciclaje y la disposición y monitoreo de los residuos. De estas actividades, la más costosa e importante es la recolección, por la intensa labor que requiere y el uso masivo de vehículos. El 80% de los costos de un sistema de gestión de residuos corresponden a la recolección (Beliën et al., 2012)

Sin embargo, a pesar de la implementación de diversos sistemas de recolección, continúa siendo una dificultad desarrollar un sistema de gestión de residuos sólidos urbanos asequible, protector del medio ambiente y socialmente aceptable, lo que limita los avances en

la optimización, comparación y evaluación de los mismos (Dahlén et. al. 2007; Rodrigues et al. 2016; Kogler 2007)

Muchas investigaciones han sido llevadas a cabo en casos prácticos de la recolección de residuos (es decir SRRD implementados en diversas regiones del mundo) pero el proceso de planeación, previo a la implementación y los estudios realizados con anterioridad, son con frecuencia ignorados y como consecuencia de esto, en algunos casos prácticos de SRRD, los resultados alcanzados son inferiores a los resultados esperados (Dahlén & Lagerkvist, 2010). En Colombia por ejemplo, los actuales SRRD, sólo permiten que se recupere hasta un 17% de los residuos sólidos domésticos, lo que nos indica que el 83% restante termina en rellenos solitarios (El Tiempo, 2014).

Es por esta razón, que, por medio de esta investigación, buscamos dar respuesta al interrogante de cómo planear un SRRD eficiente y económicamente viable.

1.1.1. DIAGRAMA CAUSA-EFECTO

En la figura 1.1. A partir de la revisión bibliográfica, hemos creado un diagrama en el cual se exponen de manera gráfica las causas y efectos de la falta de planeación en el desarrollo de un SRRD.

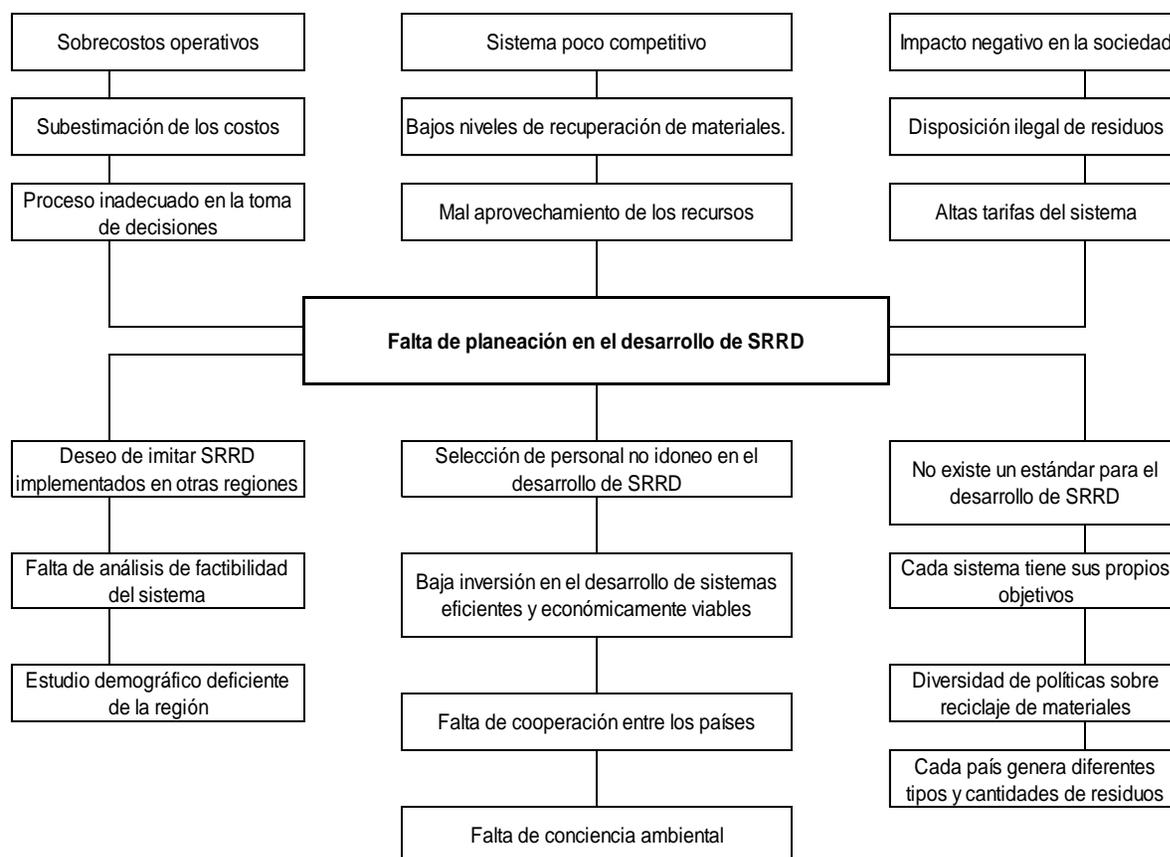


Figura 1.1. Diagrama Causa-Efecto

1.1.2. DIAGRAMA MEDIOS-FINES

En el Diagrama Medios-Fines (Figura 1.2.) describimos la situación que podríamos tener después de resolver los problemas expuestos en el Diagrama Causa-Efecto. De esta forma, cada problema planteado se convierte en un objetivo o en una situación deseable.

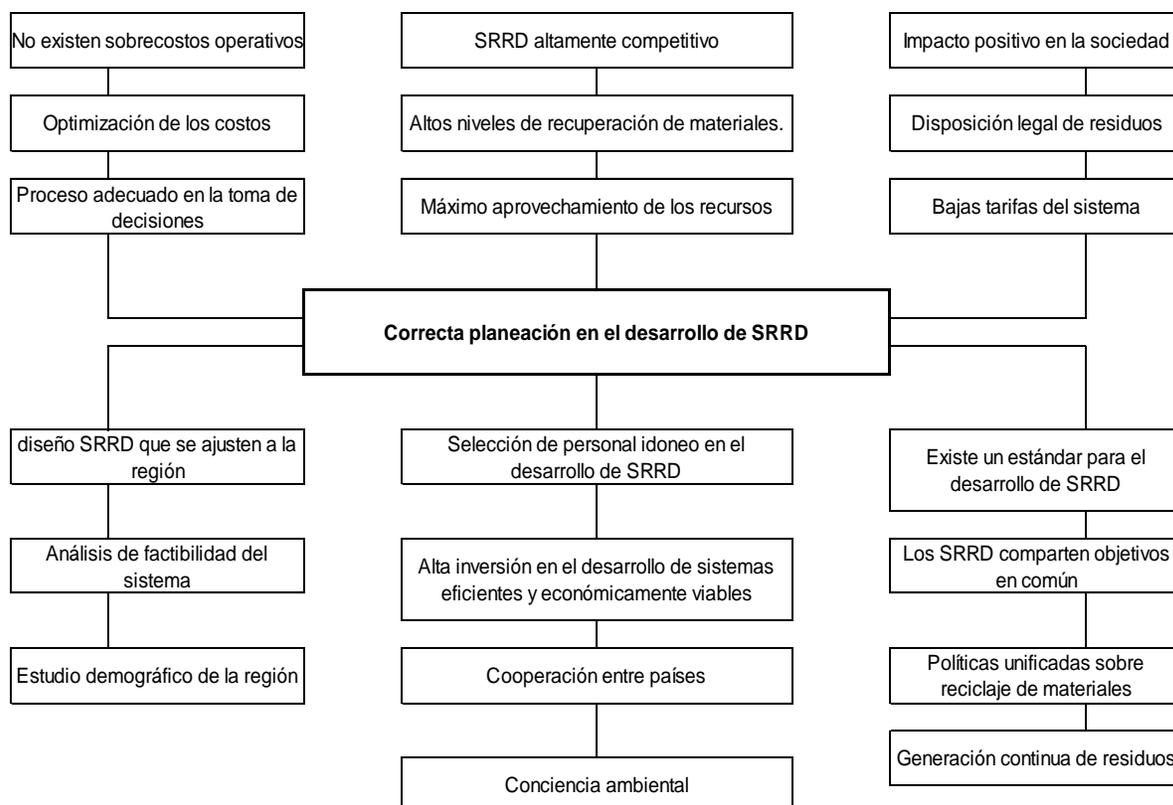


Figura 1.2. Diagrama Medios-Fines

1.2. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, una de las contribuciones más importantes que puede hacer la humanidad para reducir su impacto en el mundo natural, es tomar correctas decisiones sobre la forma en que se manejan los residuos. Este es el punto de partida para el desarrollo sostenible de un mundo cuya población actual es de 7.3 billones de personas y que para finales del siglo 21, crecerá hasta 9 y quizá 11 billones de personas, aumentando de forma equivalente la cantidad de toneladas de residuos generados.

La respuesta a este problema en auge, son los sistemas de gestión de residuos. Si bien es cierto que un punto clave es la reducción de residuos antes de que sean producidos, es necesario una gestión sostenible, holística e integral.

En la actualidad, la perspectiva que se tiene de los residuos debe cambiar su enfoque y pasar de residuos a recursos, ya que muchos materiales que terminan en lo profundo de la tierra, en vertederos, son reutilizables, reciclables, materia prima en bruto, materia orgánica o generadores de energía.

En el gráfico presentado a continuación tomado de United Nations Environment Programme (2015) por Hoornweg et al. (2015), se puede observar la tendencia de la generación de residuos hasta el año 2100.

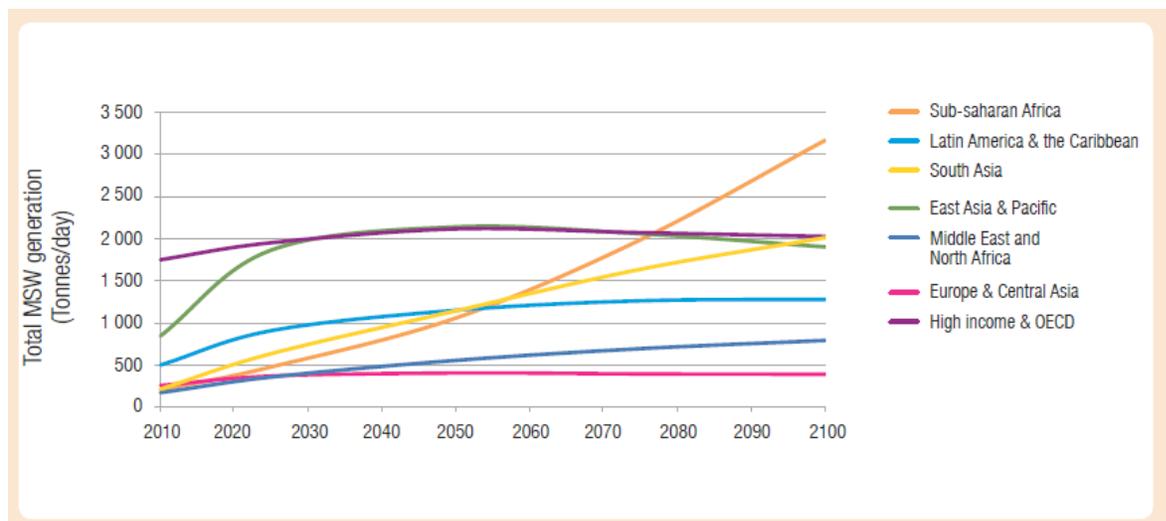


Figura 1.3. Proyección de generación de residuos al año 2100

De igual forma, se presenta un gráfico de países de la Unión Europea con las tasas de reciclaje (United Nations Environment Programme, 2015):

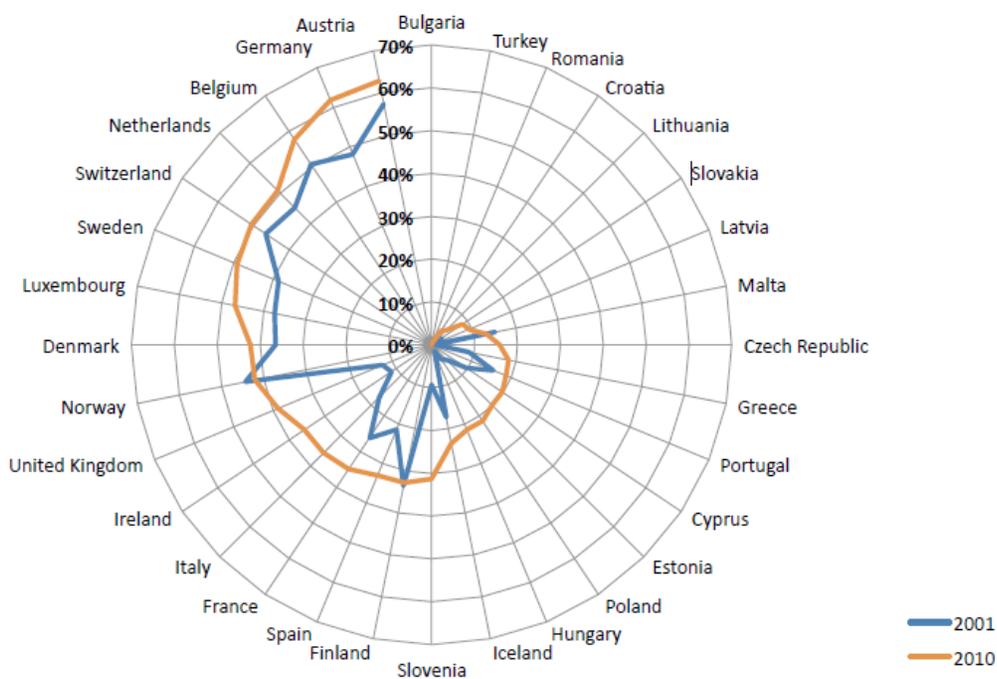


Figura 1.4. Reciclaje de Residuos Sólidos Domésticos en la Unión Europea

A partir de los gráficos anteriores, podemos confirmar como grandes cantidades de residuos aún siguen siendo desaprovechadas y enviadas a vertederos.

En términos económicos, la disposición incontrolada en vertederos, es extremadamente más costosa que establecer un sistema de recolección de residuos, además que se deja de recuperar el gran valor que pueden generar los residuos.

Uno de los aspectos más influyentes en la recuperación de los materiales, es su sistema de recolección. De la eficiencia de este proceso dependerá que los residuos recolectados puedan ser reciclados o reutilizados.

Un sistema de recolección que establezca una correcta separación en la fuente, permite que los materiales preserven su valor intrínseco para el reciclado y la recuperación. De esta forma, es posible evitar que se contaminen otros residuos que todavía tiene un valor económico.

Desde el ámbito empresarial, un correcto SRRD aumentará el aprovechamiento de los materiales y se requerirá de una mayor fuerza laboral para el tratamiento de los mismos. Los recursos naturales serán mayormente preservados ya que los residuos sólidos se convertirán en una fuente de material aprovechable.

Por otro lado, no tener un sistema de recolección de residuos apropiado puede generar un grave impacto en la salud de los residentes y especialmente la de los niños. Disponer en un mismo vertedero, residuos sólidos y residuos peligrosos, altera el aire, las aguas superficiales y subterráneas, el suelo y el medio ambiente marino.

La razón por la que es necesario estudiar los SRRD radica en la debilidad que tienen actualmente los países, en especial los subdesarrollados en la formación para la gestión de los residuos sólidos y en la generación de estrategias que busquen mitigar el impacto negativo que tiene para una sociedad, en su economía y en su medio ambiente, no disponer correctamente los residuos.

No es sólo la creación de leyes y normas. A nivel mundial y en nuestro país existen diversas políticas que buscan contrarrestar el impacto negativo de SRRD inadecuados. Ejemplo de estas son:

En la Unión Europea:

- ✓ Directiva 94/62/EC sobre residuos de empaques
- ✓ Reglamento relativo a la prevención y el reciclado de los residuos de envases
- ✓ European Commission DGXI.E.3

En Colombia:

- ✓ Ley 1259 del 2008
- ✓ Guía Técnica Colombiana GTC 53-8
- ✓ Guía Técnica Colombiana GTC24
- ✓ Guía Técnica Colombiana GTC86
- ✓ Guía Técnica Colombiana GTC53-2
- ✓ Decreto 596. Esquema de aprovechamiento del servicio público de aseo

A nivel departamental:

- ✓ Planes de Gestión Integral de Residuos PGIRS

Pero más que la creación de leyes, la experiencia sugiere que un sistema de gestión de residuos eficaz requiere de tres categorías de instrumentos de política en una combinación coherente: (a) «regulación directa», que comprende la legislación acompañada por una estricta ejecución, (b) los instrumentos económicos, proporcionando incentivos y desincentivos para prácticas con residuos específicos y (c) instrumentos "sociales", basados en la comunicación y la interacción con las partes interesadas.

Es por esto la necesidad de planear de manera holística e integral SRRD eficientes y económicamente viables.

Esta justificación ha sido elaborada según el Global Waste Management Outlook del United Nations Environment Programme, 2015.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar una guía para la planeación de SRRD eficientes y económicamente viables.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Identificar las etapas del proceso de planeación de un SRRD.
- ✓ Caracterizar a través de una tabla de datos los componentes presentes en un SRRD.
- ✓ Realizar un modelo matemático que permita a través de la simulación con hoja de cálculo, estimar los costos presentes en un SRRD.

1.4 METODOLOGÍA EMPLEADA

Para la elaboración de esta tesis se siguen 3 pasos basados en Mayring (2003): recolección de información; análisis descriptivo y clasificación según categorías.

1. Recolección de la información

La recolección de información es el primer paso para establecer una clara definición y caracterización de los sistemas de recolección de residuos domésticos. La investigación comprende libros, revistas y reportes y fue realizada por medio de buscadores como Google Scholar (www.scholar.google.com) y Scopus (www.scopus.com). Dentro de los editores líderes encontramos Elsevier (www.sciencedirect.com), Emerald (www.emeraldinsight.com), Springer (www.springerlink.com), and Taylor and Francis (www.tandf.co.uk/journals/).

2. Análisis descriptivo

Se utilizaron 3 libros, 1 reporte realizado por el Programa Ambiental de las Naciones Unidas (United Nations Environment Programme) y 33 artículos científicos, para llevar a cabo

la investigación y análisis de los diferentes puntos de vista de cada uno de los autores referente a los SRRD.

3. *Clasificación de artículos según categorías*

Este estudio considera 4 clases de investigación;

(1) Casos de estudio: Un documento puede ser un estudio de revisión o una encuesta o puede hacer frente a diferentes tipos de análisis cuantitativos / cualitativos.

(2) Revisiones Literarias: Un documento puede considerar cualquier tipo de incertidumbre para los parámetros (estocástico, difusa, intervalo, el caos, y el escenario se acerca), o simplemente incluir supuestos deterministas.

(3) Análisis y modelos: El modelado (si es aplicable) se puede construir conceptualmente o matemáticamente. También hay diferentes metodologías de solución como, solucionadores analíticos exactos, aproximación heurística, meta-heurística y otros enfoques.

(4) Supuestos deterministas: Un documento puede ser construido sobre la base de un estudio de caso, se puede experimentar con un estudio de caso en sus análisis numéricos, o se puede considerar ningún caso real durante el estudio.

De los artículos utilizados se encontraron: 16 pertenecientes a la categoría casos de estudio, 3 categoría Revisiones Literarias, 9 Categoría Análisis modelos y 5 de la categoría Supuestos Deterministas.

1.5 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES DEL PROYECTO

Tabla 1.1. Cronograma

OBJETIVO GENERAL	OBJETIVOS ESPECIFICOS	ACTIVIDADES	TIEMPO	INICIO	FIN	RESPONSABLE
Diseñar una guía para la planeación de SRRD eficientes y económicamente viables.	Realizar un diagrama de flujo con las etapas del proceso de planeación de un SRRD.	Recolectar información sobre SRRD implementados en diversas regiones del mundo.	5	1	6	Ibarra Ayleen / Duran Saskia
		Identificar y estudiar las características y factores más relevantes de los SRRD.	5	6	11	
		Crear diagrama de flujo con las etapas del proceso de planeación de un SRRD.	4	11	15	
	Elaborar una tabla de datos para caracterizar los componentes de un SRRD	Identificar y caracterizar los componentes de los SRRD implementados en diferentes regiones.	5	15	20	Ibarra Ayleen / Duran Saskia
		Clasificar los componentes de los SRRD en base a los métodos de recolección.	3	20	23	
	Realizar un modelo de costos robusto que permita estimar los costos de un SRRD	Búsqueda de casos de estudio con modelos de costos aplicados a SRRD implementados en diversas regiones del mundo.	5	23	28	Ibarra Ayleen / Duran Saskia
		Organización y análisis de los modelos.	5	28	33	
		Diseño de ecuaciones del modelo.	10	33	43	
				2	43	45

1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES

La presente investigación, comprende la identificación de los factores más relevantes en el desarrollo de los sistemas de recolección de residuos domésticos condensados en un diagrama de flujo que servirá de guía para establecer un sistema de recolección.

Así mismo, se identifica los principales componentes del sistema y se desarrolla un modelo de evaluación económica para la estimación de costos.

Las posibilidades para implementar un caso de estudio en la vida real son limitadas, debido a la falta de recursos económicos y la ausencia de una legislación que imponga tasas de reciclaje para fabricantes y productores.

Por otro lado, la falta de concientización por parte de los habitantes de la región sobre el impacto medioambiental, es un gran factor en contra para la realización de un caso de estudio.

CAPITULO II. MARCO DE REFERENCIA

2.1 MARCO CONCEPTUAL

(Como se cita en Kogler, 2007, p. 7)

Depósito en vertederos: El depósito en vertederos es la eliminación controlada en el manto de la tierra y que incluye el monitoreo de la corriente de residuos entrantes, colocación y compactación de los residuos, instalación de vigilancia del medio ambiente e instalaciones de control.

Gestión de residuos: "La gestión de residuos es la recolección, transporte, tratamiento o eliminación de materiales de desecho, por lo general los producidos por la actividad humana, en un esfuerzo por reducir su efecto sobre la salud humana. Un enfoque secundario en las últimas décadas ha sido el de reducir el efecto de los materiales de desecho en el medio ambiente y recuperar los recursos de ellos. "

"La gestión de residuos abarca la suma de todas las medidas de prevención de residuos, el tratamiento no perjudicial, recuperación, reutilización y disposición final de residuos de todo tipo, mientras se consideran a los aspectos ecológicos y económicos."

Gestión de residuos sólidos: "La gestión de residuos sólidos puede definirse como la disciplina asociada con el control de la generación, almacenamiento, recolección, transferencia y transporte, transformación y eliminación de los residuos sólidos de una manera acorde a los mejores principios de la salud pública, economía, ingeniería, conservación, estética y otras consideraciones ambientales y que también es sensible a la actitud del público.

Reciclables: Los recursos reciclables son "materiales que aún tienen propiedades físicas o químicas útiles después de servir un propósito específico y por lo tanto puede ser reutilizado o reciclado para el mismo propósito o para otros fines."

Recolección Curbside: La recolección Curbside se define como la recolección de residuos desde la fuente, es decir, desde los hogares o locales comerciales o industriales.

Residuos: Los residuos son el material no deseado que queda después de la finalización de un proceso.

“Residuo” es un concepto humano: en los procesos naturales no hay desperdicio, sólo los productos finales inertes. Los residuos pueden existir en cualquier fase de la materia (sólido, líquido o gas). Cuando se libera en los dos últimos estados, en especial gas, los desechos se conocen como emisiones. Por lo general las emisiones están fuertemente relacionadas con la contaminación.

Residuos sólidos municipales: Los residuos sólidos municipales "incluye todos los residuos generados en los hogares residenciales y edificios de apartamentos, establecimientos comerciales y de negocios, instalaciones institucionales, las actividades de construcción y demolición, los servicios municipales y los emplazamientos de las instalaciones de tratamiento".

Servicios de residuos sólidos: Los servicios de residuos sólidos incluyen la recolección, transporte y eliminación de residuos sólidos.

Residuo orgánico: Los residuos orgánicos es el "componente biodegradable de los residuos municipales (por ejemplo, residuos de alimentos y de jardín)."

Residuos voluminosos: Los residuos voluminosos se refieren a "artículos de gran tamaño desgastados o rotos provenientes del hogar, establecimientos comerciales e industrias, tales como muebles, lámparas, estanterías, archivadores y otros artículos similares".

Sistemas Drop-off: Este término se refiere a la recolección de los residuos desde centros de recolección y emplazamientos especiales. "En los sistemas Drop-off, los reciclables acumulados son entregados por el consumidor (productor de residuos) a una ubicación central y se colocan en recipientes marcados individualmente."

Transporte de Residuos: El término transporte se refiere al acto físico de transportar los residuos recogidos a instalaciones de tratamiento de residuos. Estos pueden ser: centros de reciclaje, plantas de incineración, instalaciones de tratamiento químico o físico, o ambos, vertederos u otras instalaciones tales como estaciones de transferencia.

2.2 MARCO TEÓRICO

La logística es definida como el proceso de planear, implementar y controlar eficientemente, el flujo de costo efectivo de materias primas, inventario en proceso, productos terminados e información relacionada desde el punto de origen al punto de consumo con el propósito de satisfacer las necesidades del cliente (The Council of Supply Chain Management Professionals [CSCMP], 2016).

Rogers & Tibben-Lembke (1999) definen la logística inversa con una definición similar a la de logística, sólo que en sentido contrario: Proceso de planear, implementar y controlar eficientemente, el flujo de costo efectivo de materias primas, inventario en proceso, productos terminados e información relacionada desde el punto de consumo hasta el punto de origen con el fin de recuperar valor o darle la disposición adecuada.

La logística inversa también incluye procesamiento de la mercancía devuelta por daños, por inventario estacional, por reaprovisionamiento y exceso de inventario. También incluye programas de reciclaje, programas de materiales peligrosos, obsoletos, la disposición de equipos, y la recuperación de activos (Rogers & Tibben-Lembke, 1999).

Más específicamente, en una cadena de suministros podemos encontrar varios tipos de devoluciones como por ejemplo, las realizadas con productos que no cumplen con los estándares de calidad y por ende son rechazados, las devoluciones por parte de comerciantes sea por exceso de inventarios, defectos en la mercancía y productos caducos. También encontramos las devoluciones realizadas por los clientes, porque el producto no cumplió sus expectativas, estaba defectuoso o por garantía y por último en el post-consumo, el retorno del producto porque ha llegado el fin de su vida útil. Estas últimas devoluciones son realizadas por intermediarios como los recicladores (Monroy & Ahumada, 2006).

Cuando se estudia la logística inversa, el flujo de productos es más complejo debido a que la cadena de suministros no termina en los consumidores, pues contempla el post-uso. Es realmente un sistema cerrado. Así, existen 4 tipos de cadenas que varían dependiendo de quién recupera el producto y para qué es recuperado (Monroy & Ahumada, 2006).

El primer tipo de cadena logística posible se da cuando el producto es recuperado por la misma empresa productora.

✓ Ejemplo: Llantas Michelin – Icollantas

La empresa debió implementar un sistema de logística inversa para poder ofrecer el servicio de reencauche de llantas radiales a sus clientes, proceso que consiste en recuperar las llantas de manos de los usuarios, remanufacturarlas y devolverlas a los mismos. La empresa cuenta con seis plantas de reencauche en el país.

En la segunda cadena, la empresa productora recupera su propio producto y el de la competencia, para alcanzar el límite de volumen necesario para realizar el proceso.

✓ Ejemplo: baterías MAC

Produce baterías para autos. En 1990 implementó un proceso de logística inversa que consiste en recolectar las baterías de autos (propias y de la competencia), reciclarlas para recuperar los materiales de plomo y polipropileno.

En tercer lugar, se presenta el caso en el cual la empresa que recupera el producto es distinta a la productora, y los residuos se utilizan para el mismo producto.

✓ Ejemplo: Ofipaim

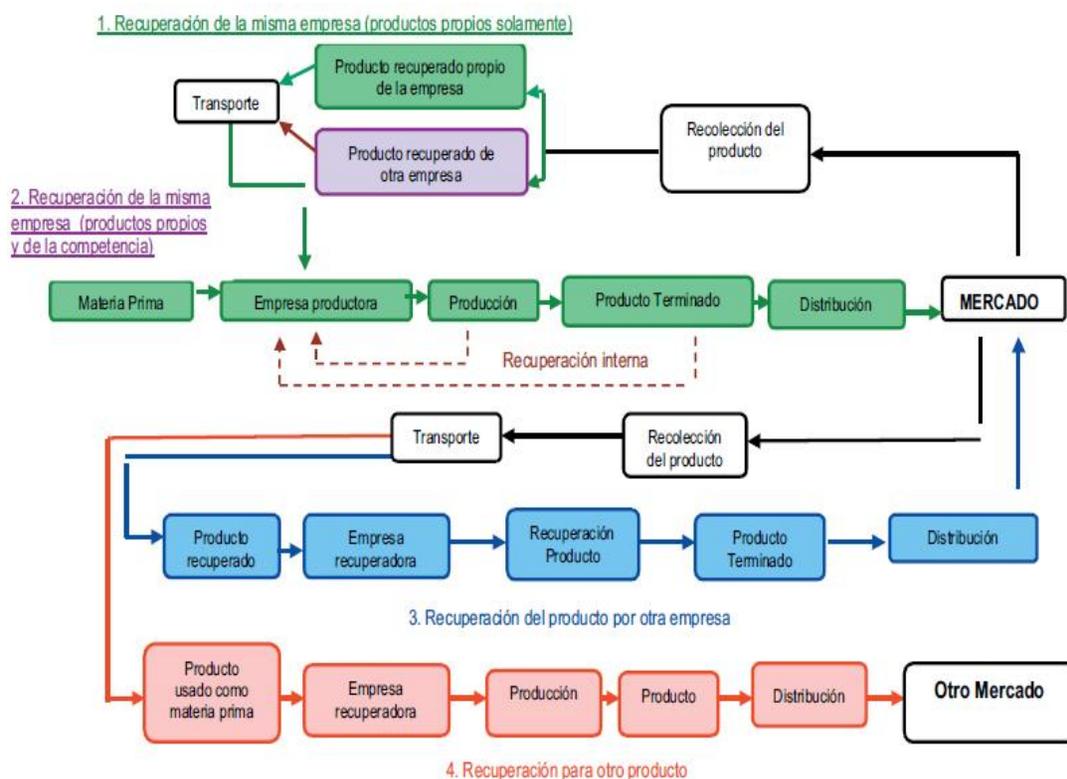
Empresa dedicada a la producción de papelería escolar y de oficina. En 1999 comenzó a remanufacturar cartuchos de impresión LaserJet y cartuchos InkJet para complementar su portafolio de servicios. Esto se considera un caso de Logística Reversa externa, ya que el producto es recuperado y reutilizado por una compañía diferente a la empresa que los fabrica.

En la cuarta cadena, se puede presentar el caso en el cual la empresa que recupera el producto es distinta a la productora, y este es utilizado para un proceso de producción completamente distinto al original.

✓ Ejemplo: Tetrapak - Cantonal-Ecoplak

Tetra Pak es una multinacional sueca, realizó alianzas con la empresa colombiana RIO para reutilizar el material producido por Tetra Pak en la producción de madera sintética (Ecoplak) y con la empresa colombiana Cartonall para reutilizar este material en la fabricación de cartón gris.

En la figura 2.1. De Monroy & Ahumada (2006) podemos visualizar de manera gráfica los 4 tipos de cadenas de logística inversa:



Fuente: Autores

Figura 2.1. Posibles cadenas de suministro en logística inversa

RAZONES PARA REALIZAR LOGÍSTICA REVERSA

Una empresa puede llegar a aplicar actividades de Logística Reversa por razones tan diversas como:

- ✓ Cumplimiento de la legislación ambiental.
- ✓ Beneficios Económicos: disminución en los costos de producción, ahorros en compra de materias primas, etc.
- ✓ Recuperación de materias primas difíciles de conseguir.
- ✓ Recuperación de información, tanto propia como de la competencia.
- ✓ Servicio al cliente y garantías.

- ✓ Responsabilidad Social.
- ✓ Ventaja competitiva.

PROCESOS CLAVES EN LA LOGÍSTICA INVERSA

El autor Fleischmann et al. (2000) define los procesos de logística inversa de la siguiente manera:

✓ *Recolección*: Se refiere a todas las actividades realizadas con los productos usados disponibles en físico moviéndolos hasta el punto de tratamiento posterior. La recolección puede incluir las actividades de compra, transporte y almacenamiento. Cabe señalar que la recolección puede, hasta cierto punto, ser impuesta por la legislación (por ejemplo, material de embalaje en Alemania)

✓ *Inspección / Separación*: Estos procesos indican todas las operaciones que determinan si el producto entregado es realmente reutilizable y de qué forma. Por lo tanto, la inspección y separación resulta en la división del flujo de productos usados acorde a las diferentes opciones de reutilización y disposición. La inspección y la separación pueden abarcar desmontaje, trituración, pruebas, clasificación y almacenamiento.

✓ *Reprocesamiento*: significa la verdadera transformación de un producto usado en un producto usable nuevamente. Esta transformación puede incluir diferentes formas incluyendo reciclaje, reparación y re-manufacturación (Thierry M. et al, 1995). Adicionalmente, actividades como limpieza, reposición y re-ensamblaje, pueden estar involucradas.

✓ *La Disposición* es requerida para productos que no pueden ser reutilizados por razones técnicas o económicas. Esto aplica por ejemplo a los productos rechazados en la fase de separación debido a la demanda excesiva de reparaciones y a los productos sin un potencial de mercado satisfactorio como lo son productos ya vencidos. La disposición puede incluir procesos de transporte, el depósito en vertederos e incineración.

✓ *La Redistribución* refiere a enviar los productos reutilizables a un mercado potencial y al movimiento físico de los mismos hasta los consumidores finales. Esto puede abarcar ventas (arrendamiento, contratos de servicios) y actividades de transporte y almacenamiento.

La figura 2.2. de Fleischmann et al. (2000) da una gráfica representación de las actividades.

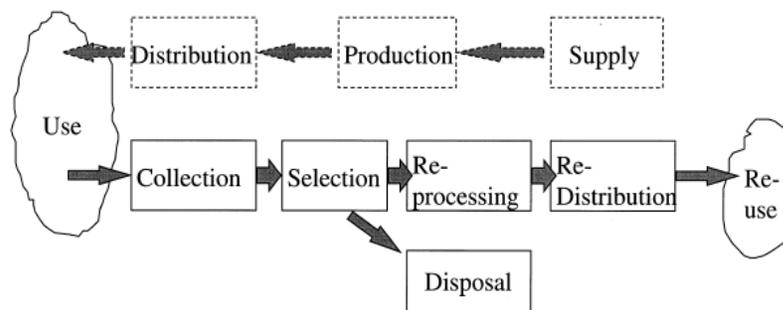


Figura 2.2. Procesos de Logística Inversa

SISTEMAS DE RECOLECCIÓN

Dentro de los Sistemas de Recolección tradicionales encontramos la *Recolección de Residuos Domésticos*, la cual juega un papel importante en la recolección de residuos sólidos urbanos. La recolección de residuos puede ser definida como el punto de contacto entre los generadores de residuos (en este caso, los ocupantes de una vivienda) y el sistema de gestión de residuos. Para obtener un sistema efectivo, esta relación necesita ser manejada de forma cuidadosa. El ocupante de la casa necesita tener sus residuos recolectados con un mínimo de inconveniencia mientras que el recolector necesita recibir los desechos en una forma compatible con los métodos de tratamiento planeados. Es evidente que existe un equilibrio que debe alcanzarse entre estas necesidades; los sistemas de gestión de residuos que no logran alcanzar el equilibrio en esta relación tienen pocas probabilidades de éxito (Mcdougall et al. 2001).

La recolección de los residuos domésticos se puede dividir en la recolección en la acera (Curbside) y recolección en puntos de entrega (Drop-off). Los contenedores de diferentes tamaños y formas son usados en puntos de entrega. En la recolección curbside, son usadas combinaciones de contenedores, sacos y bolsas que son colocadas fuera o dentro de la casa (Dahlén & Lagerkvist, 2010). Esta combinación de contenedores, recibe el nombre de separación en la fuente o recolección selectiva, por medio de la cual quien genera los residuos los separa de acuerdo al tipo de material (Kogler, 2007).

Recolección Curbside

La recolección curbside es definida como la recolección de residuos en la fuente, como por ejemplo en las zonas residenciales. Dentro de la recolección en la acera, los vehículos recogen los desechos y los transportan a un centro de recolección o a una instalación para su tratamiento final (Bilitewski et al. 1997).

Características Generales

En este sistema se proporciona a cada hogar contenedores para la recolección de materiales. El espacio adecuado para estos contenedores debe estar disponible en cada residencia (Bilitewski et al. 1997).

Para Kogler (2007) los métodos de recolección en la acera se pueden dividir entre:

a) Servicio Completo:

Los hogares están equipados con una combinación de contenedores que se vaciarán periódicamente por la empresa de recolección de residuos. El equipo de recogida de residuos obtiene los contenedores, los vacía y los coloca nuevamente en la residencia.

b) Recolección Curbside Normal

Con la recolección curbside normal, los residentes están obligados a colocar los contenedores de residuos o bolsas fuera de la casa en la 'acera', en donde son recogidos y vaciados por la compañía encargada.

Ventajas del Método Curbside:

- ✓ Gran comodidad para el usuario.
- ✓ Mayor cuota de recolección con respecto los sistemas Drop-Off.

Desventajas del Método Curbside:

- ✓ Altos costos por la inversión en vehículos y contenedores
- ✓ Altos costos operacionales debidos principalmente al uso de contenedores pequeños.
- ✓ Con frecuencia, una menor calidad de los materiales recolectados

Método Drop-Off

En este método, los materiales son llevados hasta un lugar determinado y depositados en recipientes individuales.

Depende de la fracción recolectada, los métodos Drop-Off se pueden dividir en:

- ✓ Puntos Drop-Off (para la mayoría de los casos, vidrio, empaques)
- ✓ Centros de Reciclaje Drop-Off: (Residuos peligrosos, residuos de gran volumen)

Puntos Drop-Off

Estos puntos deberán estar localizados estratégicamente para que los residentes depositen sus residuos. El sitio deberá ser visible y permitir altos volúmenes de tráfico.

Algunos pre-requisitos importantes que se deberían tener en cuenta para cualquier punto Drop-Off son los siguientes:

- ✓ Vaciamiento regular con el fin de reducir el mal olor y que los residuos se desborden.
- ✓ La distancia entre el punto y los hogares debe ser aproximadamente entre 100 y 150 metros en zonas densamente pobladas.
- ✓ Fácil acceso para consumidores y vehículos recolectores.

Además, la forma de los puntos Drop-off debe ser estéticamente agradable y acorde con el entorno existente para que pueda integrarse con la comunidad.

Centros de Reciclaje Drop-Off

Un centro de reciclaje Drop-Off contiene recipientes para materiales reciclables residenciales y otros recipientes para residuos peligrosos del hogar. El centro de Drop-Off deberá estar cercado y ser un lugar seguro. Durante las horas que se encuentre abierto, personal calificado deberá garantizar el proceso correcto de recolección. Dada la demanda de espacio y de personal, la cantidad de estos centros es limitada (1 centro de reciclaje Drop-off por cada 30.000 a 50.000 habitantes).

Ventajas Del Método Drop-Off

- ✓ Costos más bajos comparados con la recolección curbside.
- ✓ Costos más bajos en inversión.

Desventajas del Método Drop-Off

- ✓ Con frecuencia no es fácil encontrar sitios adecuados para los contenedores.

Tipos de Contenedor

Para depositar los residuos, existe una gran variedad de contenedores de diferentes volúmenes y formas. Sin embargo, los principales tipos son bolsas, sacos, recipientes, barriles, contenedores de ruedas, compactadores y tambores (como se cita en Rodrigues et al. 2016).

Formas de Facturar la Recolección de Residuos

El servicio de recolección de residuos genera costos que deben ser pagados por los usuarios del servicio. Existen diferentes maneras de facturar este servicio: tradicionales y alternativas (como se cita en Kogler, 2007, p. 45):

Sistemas de Facturación Tradicional:

Sistema de cuota fija: el residente paga la misma cantidad por el servicio de recolección sin importar la cantidad de residuos generada. Una de las desventajas de esta forma de facturación es que el generador de residuos puede comportarse de una manera indiferente frente a la cantidad de residuos que él mismo genere, ya que en todos los casos, le cobrarán el mismo valor. Sin embargo, este sistema, también evita la disposición ilegal de los residuos.

Sistema de pago por contenedor: el residente paga por el servicio usado, es decir por el volumen del contenedor en el que se depositan los residuos y el número de recolecciones del mismo. Una ventaja de este sistema es que el residente puede sentir la motivación de generar una menor cantidad de residuos ya que esto le representará un ahorro en el pago del servicio.

Sistemas de Facturación Alternativos

Sistema de facturación individual: se establece un valor base por el servicio de recolección y un valor variable de acuerdo a la cantidad de residuos generada. Este es un servicio que por lo general es costoso ya que para calcular el peso de los residuos, se debe pesar el contenedor antes de ser vaciado y para esto se requieren soluciones tecnológicas computarizadas que representan una alta inversión.

Sistema de moneda: el usuario deposita una cantidad de dinero en un contenedor y este abre un espacio para determinado volumen de residuos. Este sistema también contribuye a la disminución de la cantidad de residuos generada ya que mientras más residuos generen, mayor es el pago del servicio.

Sistema de tarjeta: el sistema de tarjeta es similar al sistema de moneda, sólo que es realizado con una tarjeta personal del residente. Este sistema es bastante útil para identificar por quien y con qué frecuencia es utilizado el servicio de recolección.

Vehículos Utilizados en la Recolección de Residuos Domésticos

La clasificación de los vehículos utilizados en la recolección de residuos domésticos se divide en: Vehículos para el método sencillo de vaciado, vehículos contenedor y vehículos especiales (como se cita en Kogler, 2007, p.19).

Vehículos para el vaciado método sencillo:

- Camiones de carga trasera

Estos vehículos recogen los contenedores y los vacían en el vehículo por medio de un mecanismo de elevación ubicado en la parte trasera del vehículo. Este tipo de vehículos tienen compartimientos de carga y dispositivos rotativos como tambores rotativos los cuales tienen compactadores autónomos.

Ejemplo de este camión puede ser visualizado en la figura 2.3. referenciada en Kogler (2007):



Figura 2.3. Camión de carga trasera

- Camiones de carga lateral

Este vehículo recolecta los residuos y los vacía por medio de un brazo de descarga que se ubica al lado del vehículo y es controlado por medio de una palanca de mando. El brazo de descarga es ajustable hasta 3 metros sobre la carretera y 1.5 sobre el vehículo lo que le permite al conductor recoger los contenedores vacíos ubicados a lo largo de la calle. La figura 2.4. referenciada en Kogler (2007) muestra un ejemplo de este camión:



Figura 2.4. Camión de Carga lateral

- Vehículos de recolección al vacío

Este tipo de vehículo succiona los residuos que se ubican en la parte inferior de las canaletas ubicadas en los complejos de viviendas como edificios o en la parte inferior de los postes instalados en la tierra para arrojar la basura, tal como se visualiza en la figura 2.5 referenciada en Kogler (2007):

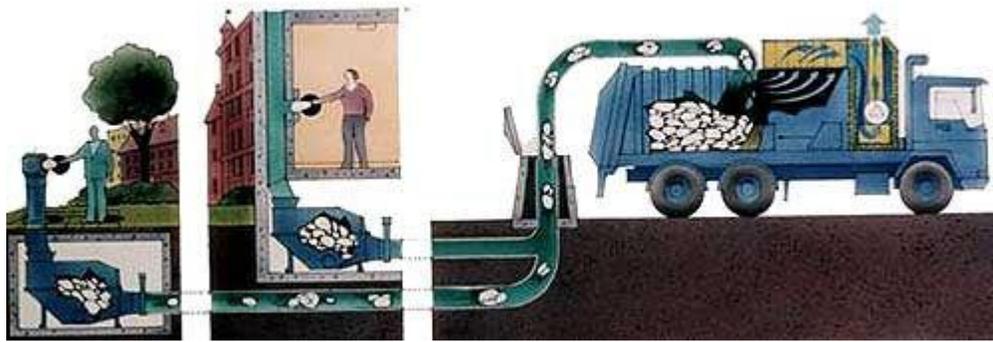


Figura 2.5. Camión multicámara

- Camiones de cámaras múltiples

Los camiones de cámaras múltiples permiten la recolección simultánea de diferentes fracciones de residuos lo cual permite la reducción en costos por que disminuye el número de recorridos de los vehículos. Ejemplo de este vehículo puede ser visto en la figura 2.6. referenciada por Kogler (2007)



Figura 2.6. Camión multicámara

Tipos de Residuos

Para Dahlén & Lagerkvist (2010), los residuos se dividen en categoría primaria y secundaria. A partir de la categoría primaria se establecen los tipos de residuos:

Tabla 2.1. Tipos de residuos

Categoría Primaria	Categoría Secundaria
Reciclables secos	Papel periódico Cartulina Envases de papel Envases de película de plástico Envases de plástico denso Embalaje de espuma de plástico Envases de vidrio Envases de metal
Biodegradables	Residuos biológicos excluyendo los desechos del jardín Desechos del jardín
Inorgánicos	Vidrio no utilizado en envases Metal no utilizado en envases Otros materiales no combustibles
Combustibles	Papel no utilizado en envases Plástico no utilizado en envases Pañales Textiles Madera Otros combustibles
Residuos peligrosos	Equipos eléctricos y electrónicos Otros residuos peligrosos

Nota: Tomada de Dahlén & Lagerkvist (2010)

Incentivos

Otro factor que afecta contundentemente un sistema de recolección de residuos domésticos son los incentivos. Estos son estímulos que generan una mayor disposición en la comunidad. Estos pueden ser extrínsecos como por ejemplo incentivos económicos, recompensas monetarias, influencia social y familiar y los avisos e información sobre el programa de recolección que también pueden incentivar al usuario. Dentro de los incentivos intrínsecos encontramos la satisfacción personal, conciencia ambiental y sentirse un individuo que contribuye a la sociedad (ver tabla 2.2) (Garcés et al. 2002).

Tabla 2.2. Incentivos que determinan las actitudes del reciclaje

Incentivos Extrínsecos	
Incentivos económicos, recompensas monetarias	Couch et al. 1979, De Young 1990, Diamond & Loewy 1991, Meller et al. 1975, Jacob & Bailey 1983, Luyen & Bailey 1979, Luyben & Cummings 1982, Witmer & Geller 1976
Influencia social y familiar	Everett & Pierce 1992, Gamba & Oskamp 1994, Hopper & Nielsen 1991, Oskamp et al. 1991, Pelton et al. 1993, Spaccarelli et al. 1989, Vining and Ebreo 1990, 1992
Avisos e información sobre el programa de reciclaje	Arbuthnot et al. 1977, Franco & Huerta 1996, Ellen 1994, Hopper & Nielsen 1991, Jacobs & Bailey 1983, Oskamp et al. 1991, Pieters 1991, Vining and Ebreo 1990
Incentivos Intrínsecos	
Satisfacción personal	De Young 1986a, 1986b, De Young & Kaplan 1985, Gamba & Oskamp 1994, Hornik et al. 1995
Conciencia ambiental	Arbuthnot 1977, Arbuthnot and Lingg 1975,

	Dispoto 1977, Dunlap et al. 1983, Ellen 1994, McGuinness et al. 1977, Oskamp et al. 1991, Simmons & Widmar 1990, Vining & Ebreo 1990
Percepción de utilidad para la sociedad	Boldero 1995, Ellen 1994, Oskamp et al. 1991, Thogersen 1994

Nota: Tomada de Garcés et al (2002)

Factores que afectan la Recolección de Residuos Domésticos

Dahlén & Lagerkvist (2010) clasifican de la siguiente forma los factores que afectan la separación colectiva en los sistemas de recolección de residuos en casas:

Factores que pueden ser controlados por las estrategias de gestión de residuos locales o regionales:

- ✓ Costos de operación
- ✓ Objetivos de la gestión de residuos
- ✓ Diseño técnico del equipo de recolección y vehículos
- ✓ Tipos de materiales de desechos recolectados separadamente
- ✓ Programa de reciclaje mandatorio o voluntario
- ✓ Diseño de los cargos de recolección, incentivos económicos
- ✓ Estrategias de información y claridad en las instrucciones de clasificación
- ✓ Programas de educación (por ejemplo, programas escolares, medios de comunicación)
- ✓ Suministro de equipamiento interior para clasificar los contenedores (por ejemplo bajo el lavadero de la cocina), y si es así, tipos de equipos.
- ✓ Fomento del compostaje privado (por ejemplo, el suministro de equipos de compostaje y / o instrucciones)
- ✓ Tipo de material recolectado cerca a las casas (curbside)
 - Horarios de recolección cómodos
 - Tipos de contenedores y/o sacos

- Provisión de contenedores y/o sacos para residuos
- Encargado de la limpieza de los contenedores
- ✓ Tipos de material recolectados por Drop-Off.
 - Comodidad en los puntos Drop-Off ubicados (vías públicas, distancias desde las casas)
 - Funcionalidad de los puntos Drop-Off
- ✓ Disponibilidad de lugares alternativos para la descarga (por ejemplo, centros de reciclaje)
- ✓ Gestión administrativa de los métodos de recolección (por ejemplo, coordinación en la región, operador encargado)

Factores que pueden ser controlados por las estrategias de gestión de residuos nacionales

- ✓ Nivel y tipo de financiación
- ✓ Legislación (por ejemplo, responsabilidad del productor)
- ✓ Incentivos nacionales económicos (por ejemplo, impuestos)
- ✓ Objetivos ambientales (Metas de reciclaje)
- ✓ Nivel de educación pública y conocimiento de los problemas de residuos

Factores que están fuera del control de las estrategias de gestión de residuos

- ✓ Tasa de producción y consumo
- ✓ Economía del hogar; estado laboral de los adultos
- ✓ Estructura residencial
 - Tamaño de la casa
 - Tipo de propiedad (por ejemplo: unifamiliar, multifamiliar, etc.)
- ✓ Permanencia de personas en el hogar
- ✓ Áreas urbanas/sub-urbanas/rurales
- ✓ Sistema de calefacción (combustible sólido que se utiliza para la calefacción privada)

2.3 . Estado del Arte

En la cadena de logística inversa, la recolección es el primer y más importante proceso. Dependiendo de los materiales recolectados, la cadena avanza hasta el reciclaje, reutilización o disposición de los materiales. La logística inversa requiere un enfoque integrado para tener éxito. Un factor fundamental es la participación del estado para alcanzar los objetivos de reciclaje de residuos (Garcés et al. 2002) y aplicar estrategias que aumenten la eficiencia en los canales de suministro. Ejemplo de estas estrategias pueden ser sistemas de incentivos o sanciones, que también apoyen la reducción de la degradación del medio ambiente, que acontece cuando los residuos se disponen incorrectamente (Bernon & Cullen, 2007; Wright et al., 2011)

Ejemplo de la intervención del Estado en la gestión de residuos son las normas basadas en la Responsabilidad Extendida del Productor (Extended Producer Responsibility, EPR) y la Administración de Productos (Product Stewardship, PS), las cuales fueron creadas principalmente para enfrentar los problemas ambientales derivados de los bienes en la etapa del post-consumo y recuperarlos de una forma rentable (Özdemir-Akyıldırım, 2015, Wagner, 2013). Por medio de la Responsabilidad Extendida del Productor son impuestas tasas de reciclaje para algunos materiales (Özdemir-Akyıldırım, 2015; Dahlén & Lagerkvist, 2010) y en otras regiones se han creado políticas depósito/reembolso para disminuir la cantidad de residuos que terminan en vertederos (Palmer K. et al., 1997). Es esta la razón por la que los esfuerzos por reciclar se hayan intensificado y variados sistemas de recolección y programas de separación en la fuente hayan sido implementados (Dahlén et al. 2007; Iriarte et al., 2009; Gallardo et al., 2012). Sin embargo, a pesar de la implementación de estos sistemas en diversos países, Dahlén et al. (2007) sustenta que sigue siendo un problema, el desarrollo de los mismos.

Dado el crecimiento acelerado de la población mundial y el cambio de hábitos de consumo, cada vez aumenta más la presión por gestionar correctamente los residuos sólidos. (Marshall & Farahbakhsh, 2013). La gestión de residuos está compuesta de un sistema de generación, recolección y disposición. (Seadon, 2010, p. 1). Para Dahlén & Lagerkvist (2010),

“la tasa específica de generación de residuos es la información básica más fundamental para la planeación y operación de un SRRD”. Conocer la composición del flujo de residuos es una información necesaria para el éxito de un sistema de recolección ya que es la base sobre la cual se puede planificar y optimizar el sistema (Beigl et al., 2008). Administraciones y entidades responsables de la gestión de residuos sólidos urbanos deben recoger datos adecuados sobre sus sistemas con el fin de ser capaz de analizar los sistemas que utilizan e introducir mejoras en su gestión (Gallardo et al., 2012, P.10).

Con base a la revisión literaria, se puede inferir que todos los SRRD tienen un enfoque ambiental, económico y/o social. Un ejemplo de enfoque ambiental es la cantidad de CO₂ generada por el sistema. (Mølgaard, 1995). Un ejemplo de límite económico es disminuir los costos de la recolección, como es el caso de estudio del SRRD en Portugal, el cual tiene en cuenta los tiempos de los viajes, la inversión en vehículos y contenedores y la contratación de personal (Gomes et al., 2008). Existen los sistemas cuyo enfoque es más social y su propósito es mejorar la tasa de participación de los habitantes de la región en el sistema y su disposición a participar (Dahlén & Lagerkvist, 2010). Algunos sistemas combinan dos o más enfoques (De Feo & Malvano, 2012).

Para la separación de residuos según su tipo de material, Dahlén & Lagerkvist (2010), refieren que la recolección de los residuos domésticos se puede dividir en la recolección en la acera (curbside) y recolección en puntos de entrega (drop-off) (p.1).

Dentro de las ventajas del método curbside, podemos encontrar que es el método más cómodo para el usuario y representa una cuota de recolección más alta que el método drop-off. Algunas desventajas son: costos más elevados por la mayor inversión en vehículos y contenedores; mayores costos operativos debido principalmente a la utilización de contenedores más pequeños y con frecuencia, una menor calidad de los materiales reciclables, (Kogler, 2007; Tanskanen & Kaila, 2001). Programas de clasificación muy complejos podrían demandar más tiempo y espacio, lo cual podría afectar la motivación de los usuarios del sistema. (Mcdougall et al. 2001).

En el método drop-off, los costos son más bajos en comparación a la recolección curbside y la inversión es mucho menor. Entre las desventajas encontramos la complejidad de encontrar sitios adecuados para los contenedores teniendo en cuenta las distancias que deben recorrer los usuarios para llegar a él. Los usuarios que tengan que recorrer distancias muy largas, colaborarán menos en la recolección y se crea la posibilidad de que los residuos sean eliminados ilegalmente (Kogler, 2007; Gallardo et al., 2012). Por tanto depende del nivel de comodidad de los residentes, los porcentajes de participación y la eficiencia en la separación. (Mcdougall et al. 2001).

Ejemplo de estos métodos en la actualidad, es el sistema empleado en un pueblo español el cual recoge los residuos mezclados, material orgánico y residuos multi-producto de puerta a puerta (curbside), y el vidrio en puntos de recolección (drop-off) (Gallardo et al., 2010).

Otros sistemas de recolección implementados en Suiza, consisten en la recolección de metal, plásticos y envases de papel por medio del método curbside. Además, cuando se incluyó en el sistema la separación en la fuente de biodegradables, aumentó la cantidad de reciclables secos clasificados. Un aspecto a destacar en este sistema de recolección es su facturación. Esta consiste en otorgar una tasa fija más alta a la facturación y una tarifa baja en el peso de los desechos, para luego caracterizar la información de flujo total de los residuos. Un limitante del sistema, es la falta de un estándar en la composición de residuos sólidos (Dahlén et al. 2007).

En Canadá, por medio del programa Blue Box se recoge gran cantidad de residuos sólidos en un mismo contenedor. Papel, plásticos, metales y vidrio son depositados en un mismo contenedor. Es de gran importancia resaltar, que el financiamiento de este programa también proviene de los fabricantes que pagan una cuota para el tratamiento de los productos en la etapa final (Lakhan, 2015).

Para calcular los costos de los SRRD que permiten financiar el sistema, se han desarrollado diversos modelos de costos aplicados a SRRD ya implementados. Autores como Groot et al. (2014) han desarrollado modelos para comparar los costos de los SRRD basados en costos fijos y variables como por ejemplo vehículos, contenedores, bolsas y personal. Algunos

autores han calculado los costos de un SRRD con el método curbside (Gomes et al., 2008). Otros han realizado el cálculo tanto para curbside como para Drop-off (Groot et al., 2014).

Modelos como los de los autores Gomes et al. (2008) y Groot et al. (2014), calculan los costos del sistema de sólo un material, como por ejemplo plásticos o una sola fracción de los residuos, como lo son los biodegradables. Por su parte Tonjes & Mallikarjun (2013) aplican modelos a SRRD que recolectan diferentes tipos de residuos.

En Helsinki, Finlandia se realizó un estudio basado en la comparación de los 4 SRRD, analizando por medio de un modelo los costos de cada sistema: Horas de trabajo invertidas, consumo de combustible de vehículos, energía invertida y las tasas de recuperación obtenidas. Por medio del estudio se determinó que la eficiencia económica es reflejada en los métodos que mezclan varios residuos domésticos y que los contenedores no deben ser grandes. Para recoger gran cantidad de residuos depende de factores como: materiales separados en el hogar, la cobertura que presentan y proceso de separación de los materiales (Tanskanen & Kaila, 2001).

Un modelo de costos de un SRRD apoya la toma de decisiones en la planeación del mismo o cuando se requieran hacer cambios estratégicos. Un modelo apropiado debe tener en cuenta las características de la región donde será implementado, como por ejemplo, el grado de urbanización y esquemas de impuestos para la gestión de los residuos (Groot et al., 2014).

CAPITULO III. DESARROLLO CONCEPTUAL DEL DISEÑO PROPUESTO

3.1 DISEÑO CONCEPTUAL

En base a la revisión literaria de los artículos, es notable que la planeación de un SRRD es determinada por cada nación cuando la ley les impone una tasa específica para el reciclaje de cada material. Es por esto, que se hace necesario demarcar una ruta para aquellos países y organizaciones que buscan instalar un SRRD.

En la Figura 3.1., se muestra un diagrama de flujo que busca direccionar la toma de decisiones en la fase de planeación del sistema.

Para esto, el paso más importante es determinar si existe o no una legislación que exija a las industrias recuperar sus productos en la etapa del post-consumo.

Si no existe una legislación, es importante tener claridad sobre cuáles son las razones que motivan la implementación de un sistema de recolección de residuos domésticos y a partir de estas razones, establecer los objetivos del sistema.

Establecidos los objetivos del sistema, es importante definir el financiamiento del mismo. Este es uno de los pasos más importantes a la hora de establecer un SRRD ya que en este punto, se definen de donde provendrán los recursos para implementar el sistema en la comunidad. Posterior a definir el financiamiento del mismo, se eligen los participantes del sistema y se definen los roles, funciones y responsabilidades de cada uno de estos.

En el caso contrario de que si exista una legislación, es necesario identificar los indicadores de la misma, es decir los porcentajes de reciclaje establecidos para cada material. Cuando se ha realizado esto, el segundo paso más importante es caracterizar el flujo de residuos. Es muy importante conocer, cuales son los principales desechos producidos por la comunidad, y en qué cantidades. Determinar si la generación de residuos es estacionaría o fija, si es sujeta a los estratos socioeconómicos u otro factor.

Luego de caracterizar el flujo de residuos, es necesario determinar los enfoques del sistema. Este puede ser ambiental, económico y social. Un ejemplo de enfoque ambiental, es disminuir las emisiones de CO₂, o la cantidad de metano generada en un vertedero. Ejemplo de un enfoque económico, puede ser disminuir los costos de la recolección u obtener beneficios económicos de la recuperación de materiales. Un enfoque social es mejorar la apariencia de calles, playas, y lugares de la comunidad.

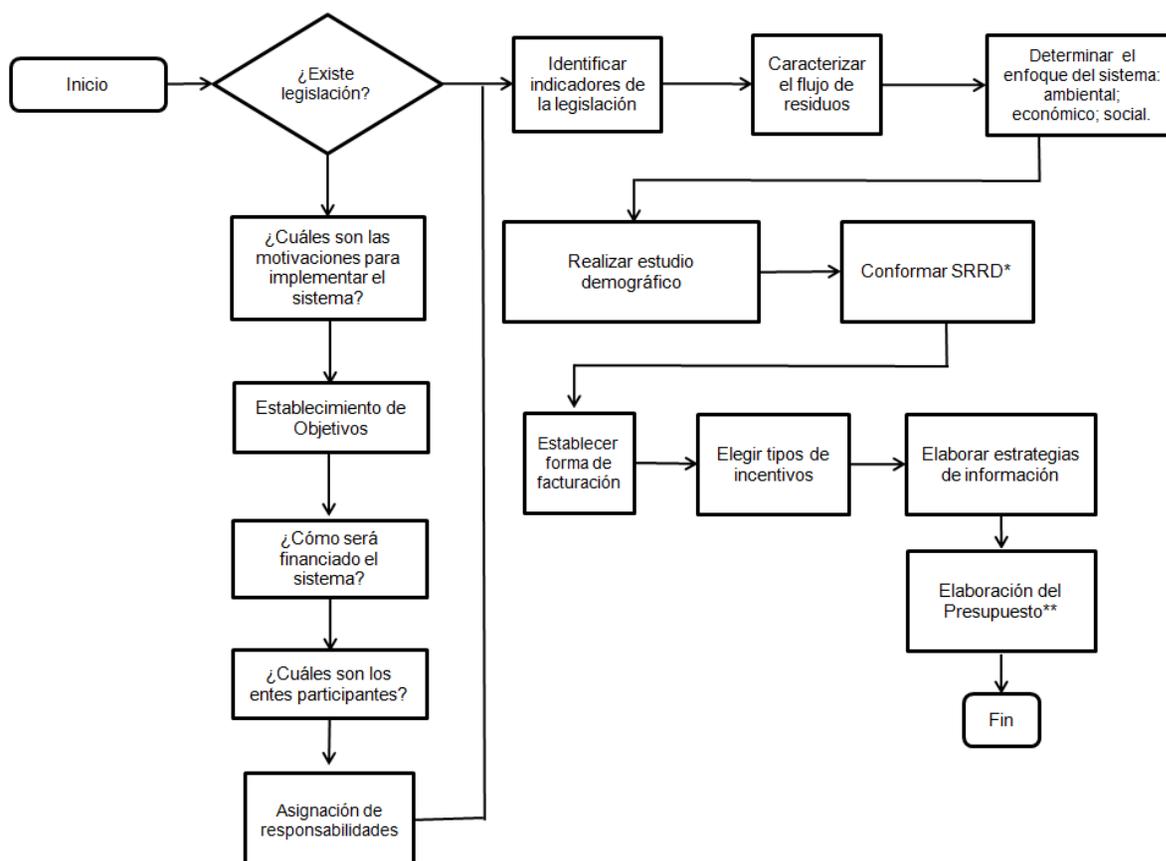


Figura 3.1. Planeación de un SRRD

*Para conformar el sistema de recolección, ver la sección 3.1.1.

**Para elaborar el presupuesto, se emplea el modelo de costos de la sección 3.1.2.

Después de definir los límites del sistema, se realiza un estudio demográfico el cual tiene como propósito conocer algunos aspectos fundamentales como la estructura residencial (casas unifamiliares / multifamiliares, zonas urbanas / rurales) y las diferencias socioeconómicas (educación, ingresos) (Dahlén & Lagerkvist, 2010). En este aspecto es muy importante evaluar el comportamiento y actitud del usuario en el sistema de recolección actual.

Aunque las personas que acostumbran a reciclar tienen actitudes positivas frente a estos programas estas actitudes no se podrán traducir en buenos resultados sino se establecen las condiciones que faciliten la realización de las buenas intenciones (Thøgersen J., 1994).

Teniendo en cuenta el estudio demográfico, se procede a conformar el SRRD (ver sección 3.1.1.), y posteriormente se define la forma de facturación del sistema, la cual puede ser: sistema de cuota fija, sistema de pago por contenedor, sistema de facturación individual, sistema de moneda, sistema de tarjeta.

Otro factor que afecta contundentemente un SRRD son los incentivos. Es importante definir si los incentivos a usar serán extrínsecos e intrínsecos o una combinación de ambos. Los incentivos económicos es un indicador que puede determinar el éxito o el fracaso de un sistema de recolección de residuos (Dahlén & Lagerkvist, 2010).

Para dar a conocer el SRRD a la comunidad donde será implementado y fomentar la participación, se deben diseñar estrategias de información como por ejemplo, campañas publicitarias, reuniones informales con la comunidad y sus líderes, carteles informativos, música y obras de teatro dramáticas en la radio (United Nations Environment Programme, 2015, p. 167). Cabe resaltar que la legislación es un pilar fundamental para fomentar la participación de los habitantes de una comunidad (Simon et al., 2016). Mientras más alta sea la cuota de participación de la comunidad, mayor será la eficacia de recolección y por ende la reducción en los costos de recolección y tratamiento posterior de los residuos recolectados (Tanskanen & Kaila, 2001).

Elegidos los aspectos más relevantes del SRRD, es necesario elaborar un presupuesto para estimar los costos de la inversión inicial. Para esto, empleamos el modelo desarrollado en la sección 3.1.2.

3.1.1. COMPOSICIÓN DE UN SRRD

En la tabla 3.1. se mencionan los componentes básicos de un SRRD. Dentro de estos encontramos: tipo de método, tipo de vehículo, frecuencia de recolección, tipo de materiales, forma de clasificación, tipo de contenedor y ubicación de los contenedores.

En los tipos de métodos, la recolección de los residuos domésticos se puede dividir en la recolección en la acera (curbside) y recolección en puntos de entrega (Drop-off) (Dahlén & Lagerkvist, 2010).

En el método curbside cada hogar debe tener contenedores para la recolección de materiales. Este método puede ser Servicio Completo, en el cual el equipo de recogida de residuos obtiene los contenedores, los vacía y los coloca nuevamente en la residencia y la Recolección Normal en la Acera en la que los residentes están obligados a colocar los contenedores de residuos o bolsas fuera de la casa en la 'acera', en donde son recogidos y vaciados por la compañía encargada (Kogler, 2007).

En el método Drop-off, el residente transporta los materiales hasta un lugar determinado y depositados en recipientes individuales. Depende de la fracción recolectada, el método drop-off se puede dividir en Puntos Drop-off los cuales son utilizados en la mayoría de los casos, para vidrio y empaques y los Centros de Reciclaje Drop-off los cuales son utilizados para residuos peligrosos y residuos de gran volumen. Estos puntos deberán estar localizados estratégicamente para que los residentes depositen sus residuos. El sitio deberá ser visible y permitir altos volúmenes de tráfico (Kogler, 2007).

Para la clasificación de los vehículos, estos pueden ser divididos en Camiones de carga trasera, camiones de carga lateral, vehículos de recolección al vacío, camiones de cámaras múltiples (como se cita en Kogler, 2007, p.19) y hay otro tipo de camiones para Drop-off como lo son el camión abierto o el camión cerrado (Rodrigues et al. 2016).

También es importante establecer la frecuencia de la recolección y en el caso de los sistemas drop-off, la frecuencia de vaciado de los puntos y los centros drop-off. Para el método curbside, es de gran importancia saber establecer la ruta de los vehículos ya que un ruteo incorrecto puede incrementar en gran medida los costos del sistema (Beliën et al., 2012).

Los materiales pueden ser clasificados en reciclables secos (papel periódico, cartulina, envases de papel, envases de película de plástico, envases de plástico denso, embalaje de espuma de plástico, envases de vidrio, envases de metal) biodegradables (residuos biológicos, desechos del jardín) inorgánicos (vidrio y metal no utilizados en envases, otros materiales no

combustibles) combustibles (papel y plástico no utilizado en envases, pañales, textiles, madera y otros combustibles), residuos peligrosos (equipos eléctricos y electrónicos; otros residuos peligrosos) (Dahlén & Lagerkvist, 2010).

En cuanto a la forma de clasificación de los residuos, existen algunos países en los que los residuos son recolectados en contenedores independientes, mientras que en otros, hay un contenedor en el que se pueden depositar dos o más clases de residuos. Por ejemplo, en un pueblo de España, el SRRD más utilizado es aquel en el que varios tipos de residuos (orgánicos, metales, textiles) se recogen en los contenedores curbside y el papel / cartón, vidrio y envases ligeros se depositan en puntos Drop-off (Gallardo et al., 2010). En Ontario, Canadá, por medio del programa Blue Box se recolectan residuos de diferentes materiales (papel, plástico, metal) en un mismo contenedor (Lakhan, 2015). Otro ejemplo en Portugal es la separación de residuos biodegradables (Gomes et al., 2008). Cabe resaltar que esquemas de clasificación muy amplios pueden demandar demasiado tiempo y espacio por lo que se puede ver afectada la motivación y el porcentaje de participación de la comunidad (Mcdougall et al. 2001).

Tabla 3.1. Componentes de un SRRD

	METODOS DE RECOLECCION			
	CURBSIDE		DROP-OFF	
Tipo de servicio	Servicio Completo	Servicio Normal	Puntos Drop-off	Centros de Reciclaje Drop-off
Tipo de vehículo	Camiones de carga trasera, camiones de carga lateral, vehículos de recolección al vacío, camiones de cámaras múltiples.		Camión abierto o camión cerrado, camiones de cámaras múltiples	
Frecuencia de Recolección	Se establece conforme a la cantidad de residuos generados por la comunidad (Diaria, cada dos días, semanal...)			
Tipos de Materiales	Reciclables secos, biodegradables, inorgánicos		Combustibles, residuos peligrosos	

Forma de Clasificación	Separados de acuerdo al tipo de material o mezclados estratégicamente	
Tipo de Contenedor	Saco, Tambor, Bolsa, Canasta, Bastidor	Contenedor Rodante, Contenedor Compactador
Ubicación del contenedor	Al aire libre o dentro de la casa	Ubicación estratégica para la comunidad. 1 centro de reciclaje Drop-off por cada 30.000 a 50.000 habitantes

Un aspecto muy importante son los contenedores y su ubicación. Para esto, influirá mucho la existencia de una legislación sobre la recolección de los residuos. En la actualidad existen países en los que es necesario que la casa contenga un espacio para los contenedores (en el caso del Curbside), mientras que en otras regiones, los contenedores pueden estar al aire libre (Dahlén & Lagerkvist, 2010). Dentro de los tipos de contenedor, se encuentran: bolsas, tambores, canastas, contenedor compactador, rodante entre otros (Bilitewski et al. 1997; Rodrigues et al. 2016). Para el método drop-off no se utilizan contenedores pequeños. Sólo contenedores rodantes o compactadores. Es muy importante tener en cuenta el volumen del contenedor ya que del tamaño y capacidad del contenedor, depende aumentar o disminuir los costos de la recolección. Un contenedor de poco volumen, puede aumentar los costos de la recolección, un contenedor de amplio volumen puede provocar que las personas se sientan en la libertad de generar una mayor cantidad de residuos (Wagner & Broaddus, 2016; Seadon, 2010).

Definido el SRRD de residuos domésticos, es importante estimar los costos del mismo. Para esto, en base a los modelos de los autores Gomes et al. (2008), Groot et al. (2014) y Tonjes & Mallikarjun (2013) hemos creado un modelo robusto para estimar los costos operativos.

3.1.2. MODELO PARA ESTIMAR COSTOS OPERATIVOS DE UN SRRD

Para estimar los costos operativos de un SRRD tendremos en cuenta los siguientes factores: los costos de los vehículos y el consumo del combustible, los costos de los contenedores, y los costos del personal.

*La moneda que será utilizada para el cálculo de los costos será el peso colombiano COP. Cabe resaltar que cualquier moneda puede ser empleada.

Para el método Curbside, el costo anual estará dado por:

$$C_{\text{anual}} = C_{\text{bolsas}} + C_{\text{veh}} + C_{\text{com_veh}} + C_{\text{salarios}} \quad (1)$$

Donde:

C_{bolsas} : costo anual de las bolsas en COP

C_{veh} : costo anual de los vehículos de recolección en COP

$C_{\text{com_veh}}$: costo anual del combustible en COP

C_{salarios} : costo anual de los trabajadores en COP

Cuando el método seleccionado es Drop-off, empleamos la siguiente fórmula:

$$C_{\text{anual}} = C_{\text{cont}} + C_{\text{veh}} + C_{\text{com_veh}} + C_{\text{salarios}} \quad (2)$$

Dónde:

C_{cont} : costo anual de los contenedores en COP (incluye el mantenimiento)

C_{veh} : costo anual de los vehículos de recolección en COP

$C_{\text{com_veh}}$: costo anual del combustible en COP

C_{salarios} : costo anual de los trabajadores en COP

En caso de que deseemos emplear contenedores con el método curbside, como es el caso del Blue Box en Canadá, podemos utilizar misma fórmula de Drop-off (2).

Estimación de Costos del Sistema de Contenedores

Para calcular el costo de los contenedores en COP, se suman el costo de inversión (C_{inv_cont}) y el costo de mantenimiento (C_{mant_cont}) y se multiplican por el número de contenedores (n_{cont}) por el número de fracción en que se recolectarán los residuos, el cual puede ser Reciclables secos (Rec_{sec}), Biodegradables (Biod), Inorgánicos (Inorg) Combustibles (Comb) y Residuos peligrosos (Res_{pel}), recolectados independientemente o mezclados según lo establecido en la planeación del sistema.

Para esto es importante tener en cuenta el volumen de residuos generados por cada fracción y el volumen del contenedor.

$$C_{cont} = n_{cont} \times Num_{Frac} \times (C_{inv_cont} + C_{mant_cont}) \quad (3)$$

Donde el número de contenedores (n_{cont}) se calcula dividiendo la cantidad total de residuos en toneladas ($Q_{año}$) entre la frecuencia de recolección ($Frec_{recol}$) dividida por la capacidad de un contenedor* (Cap_{cont}) en toneladas.

*Para el método drop-off los contenedores tendrán una capacidad de 100 t

$$n_{cont} = \frac{Q_{año} / Frec_{recol}}{Cap_{cont}} \quad (4)$$

La cantidad total de residuos al año está dada por la suma de la cantidad de Reciclables secos (QR_{Recsec}), Biodegradables (QR_{Biod}), Inorgánicos (QR_{Inorg}) Combustibles (QR_{Comb}) y Residuos peligrosos (Q_{Respel}) en toneladas.

$$Q_{año} = QR_{recsec} + QR_{Bio} + QR_{Inorg} + QR_{comb} + Q_{Respel} \quad (5)$$

El costo de inversión de un contenedor en COP (C_{inv_cont}) consiste en el costo de la inversión (C_{inv}) dividida entre el periodo de amortización en años sumado al costo de la inversión (C_{inv}) por la tasa de interés.

$$C_{inv_cont} = \frac{C_{inv}}{Dep} + C_{inv} \times \%int \quad (6)$$

Para el costo de mantenimiento, se asume que es el 35% sobre una base anual, como se cita en Gomes et al. (2008).

Existen lugares en los que se destinan contenedores más pequeños para la recolección Curbside. En este caso la fórmula a emplear es:

$$C_{contcurb} = n_{hog} \times (C_{inv_cont} + C_{mant_cont}) \quad (7)$$

Para esto es importante conocer el volumen de residuos generado por cada hogar y compararlo con la capacidad del contenedor*.

*La capacidad promedio de un contenedor pequeño es de aproximadamente 0,035 t.

Estimación de Costos del Sistema de Bolsas para la Recolección

(Este sistema no aplica para el método Drop-off)

Para la recolección Curbside, se utilizan generalmente bolsas de plástico para la recolección de residuos. Las fórmulas para calcular los costos de estas estarán dadas por:

$$C_{bolsas} = n_{hog} \times Num_{Frac} \times freq_{recol} \times C_{bolsa} \quad (8)$$

Donde n_{hog} es el número de hogares de la comunidad, Num_{Frac} es el número de fracciones en que se recolectarán los residuos, $freq_{recol}$ es la frecuencia de recolección en veces/año y C_{bolsa} el costo unitario de cada bolsa en COP.

Dado que la tendencia mundial está orientada a no utilizar bolsas de plástico, éstas pueden ser reemplazadas por contenedores pequeños. Para realizar este cálculo se puede emplear la fórmula (7).

Cálculo del coste del vehículo

Para calcular el costo anual de los vehículos en recolección se emplean las siguientes fórmulas:

$$C_{veh} = n_{veh} \times [(C_{inv_{veh}} + C_{man_{veh}} + C_{seg_{veh}}) \times 12] \quad (9)$$

Dónde:

N_{veh} es el número de vehículos*

$C_{inv_{veh}}$ es el costo de poseer un camión por mes en COP

$C_{man_{veh}}$ es el costo de mantenimiento de un vehículo por mes en COP

$C_{seg_{veh}}$ es el costo de seguro de un vehículo por mes en COP

*El costo anual de los vehículos varía de acuerdo a las características y especificaciones del mismo. Para nuestro ejercicio emplearemos una capacidad de 1.8 t para el camión empleado en SRRD con método curbside y 0.75 t para el camión empleado en el SRRD con método drop-off.

Para calcular $C_{inv_{veh}}$ empleamos la siguiente fórmula:

$$C_{inv_{veh}} = C_{cap} \frac{\%Int (1+\%Int)^{TFin}}{(1+\%Int)^{TFin} - 1} \quad (10)$$

Dónde:

C_{cap} es el costo del vehículo en COP

%Int Tasa de Interés Mensual

T_{Fin} es la duración del contrato en meses

Para calcular el número de vehículos (n_{veh}) empleamos la siguiente fórmula:

$$n_{veh} = \frac{1}{Eff\%} \times \frac{T_{total}}{T_{veh}} \quad (11)$$

Dónde:

Eff% es el Porcentaje del vehículo que es realmente utilizado

T_{total} es el tiempo total necesario para recoger los residuos en horas (h)

T_{veh} es el tiempo que un vehículo puede ser utilizado en un año en horas (h)

El tiempo total (T_{total}) es la suma del tiempo de conducción entre paradas (T_{cond_veh}) más el tiempo de inactividad (T_{inac_veh}) y el tiempo de acarreo (T_{acar_veh}) en horas.

$$T_{total} = T_{cond_veh} + T_{inac_veh} + T_{acar_veh} \quad (12)$$

El *tiempo de conducción* entre paradas se calcula de la siguiente forma:

$$T_{cond_veh} = \frac{D_{cond_veh}}{V_{cond_veh}} \quad (13)$$

Dónde:

D_{cond_veh} es la distancia total de conducción en km

V_{cond_veh} es la velocidad promedio de conducción entre paradas en km/h

El *tiempo de inactividad* se calcula de la siguiente forma:

$$T_{inac_veh} = n_{pausas} \times T_{inac} \quad (14)$$

Dónde:

n_{pausas} es el número de paradas

T_{inac} es el tiempo de pausas en horas

El tiempo total de acarreo se calcula de la siguiente forma:

$$T_{acar_veh} = \frac{D_{acar_veh}}{V_{acar_veh}} \quad (15)$$

Dónde:

D_{acar_veh} es la distancia total de acarreo en km

V_{acar_veh} es el promedio de velocidad de acarreo en km/h

Para calcular D_{acar_veh} se emplea la siguiente fórmula:

$$D_{acar_veh} = 2 \times n_{descargas} \times D_{prom_acar} \quad (16)$$

Dónde:

$n_{descargas}$ es el número de descargas de camiones

D_{prom_acar} es la distancia promedio de acarreo en km

El número de descargas ($n_{descargas}$) se calcula de la siguiente manera:

$$n_{descargas} = \frac{Q_{año}}{Cap_{Cam}} \quad (17)$$

Dónde:

$Q_{\text{año}}$ es la cantidad de residuos anual en toneladas (t)

Cap_{cam} es la capacidad del vehículo en toneladas (t)

Cálculo del Combustible

El costo total anual del combustible $C_{\text{com_veh}}$ es la suma del combustible consumido por el vehículo durante 3 momentos: conducción ($C_{\text{cond_veh}}$), inactividad del vehículo ($C_{\text{inac_veh}}$), y acarreo ($C_{\text{acar_veh}}$)

$$C_{\text{com_veh}} = C_{\text{cond_veh}} + C_{\text{inac_veh}} + C_{\text{acar_veh}} \quad (18)$$

El costo del combustible en COP ($C_{\text{com_veh}}$) se calcula a través del consumo total de combustible por el precio del combustible (P_{comb}). Conducir es la actividad del vehículo entre los puntos de recolección. Inactividad son las paradas del vehículo para recolectar los residuos y acarreo es la actividad de conducir el vehículo hasta el punto de descargue.

En la actividad de conducción, el costo de combustible se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$C_{\text{cond_veh}} = C_{s_{\text{cond_veh}}} \times \text{Dist}_{\text{cond_veh}} \times P_{\text{comb}} \quad (19)$$

Dónde:

$C_{s_{\text{cond_veh}}}$ es el consumo de combustible durante la conducción en l/km

$\text{Dist}_{\text{cond_veh}}$ es la distancia recorrida entre las paradas de recolección en km

P_{comb} es el precio del combustible en COP

Para calcular la distancia total entre paradas, se multiplica el número de pausas por la distancia promedio entre los puntos de recolección, así:

$$\text{Dist}_{\text{cond_veh}} = (n_{\text{pausas}} - 1) \times D_{\text{prom}} \quad (20)$$

Para calcular el número de pausas se emplean diferentes fórmulas de acuerdo al método de recolección:

n_{pausas} para Curbside

$$n_{\text{pausas}} = \frac{n_{\text{hog}} \times \text{Frec}_{\text{recol}}}{n_{\text{hogpr}}} \quad (21)$$

Dónde:

n_{hog} es el número de hogares

$\text{Frec}_{\text{recol}}$ es la frecuencia de recolección en veces/año

n_{hogpr} es el número de hogares por punto de recolección

Nota: Tener en cuenta que se calcula el número de paradas asumiendo un número fijo de hogares atendidos por pausa.

n_{pausas} para Drop-off

$$n_{\text{pausas}} = \frac{Q_{\text{año}}}{\text{Cap}_{\text{cam}}} \quad (22)$$

Dónde:

$Q_{\text{año}}$ es la cantidad de residuos por año en toneladas (t)

Cap_{cam} es la capacidad de un camión en toneladas (t)

En la inactividad, el costo de combustible se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$C_{\text{inac_veh}} = C_{S_{\text{inac_veh}}} \times n_{\text{pausas}} \times P_{\text{comb}} \quad (23)$$

Dónde:

$C_{S_{\text{inac_veh}}}$ es el consumo de combustible en inactividad en l/km

n_{pausas} es el número de pausas que hace el vehículo para recolectar los residuos

P_{comb} es el precio del combustible en COP

En el acarreo, el costo de combustible se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$C_{\text{acar_veh}} = C_{S_{\text{acar_veh}}} \times D_{\text{acar_veh}} \times P_{\text{comb}} \quad (24)$$

Dónde:

$C_{S_{\text{acar_veh}}}$ es el consumo de combustible en acarreo en l/km

$D_{\text{acar_veh}}$ es la distancia recorrida hasta el punto de descargue en km

P_{comb} es el precio del combustible en COP

Estimación de los gastos personal

El costo anual global para el personal puede ser calculado de la siguiente forma:

Para Curbside:

$$C_{\text{salarios}} = (n_{\text{cond}} \times \text{Sal}_{\text{anualcond}} \times n_{\text{veh}}) + (n_{\text{carg}} \times \text{Sal}_{\text{anualcarg}} \times n_{\text{veh}}) \quad (25)$$

Dónde:

n_{cond} es el número de conductores por vehículo

n_{carg} es el número de cargadores por vehículo

$\text{Sal}_{\text{anualcond}}$ es el salario anual del conductor en COP

$Sal_{\text{anualcarg}}$ es el salario anual del cargador en COP

n_{veh} el número de vehículos

Para Drop-off

$$C_{\text{salarios}} = (n_{\text{cond}} \times Sal_{\text{anualcond}} \times n_{\text{veh}}) + (n_{\text{trab}} \times Sal_{\text{anualtrab}} \times n_{\text{cent}}) \quad (26)$$

Dónde:

n_{cond} es el número de conductores por vehículo

n_{trab} es el número de trabajadores en el centro drop-off

$Sal_{\text{anualcond}}$ es el salario anual del conductor en COP

$Sal_{\text{anualtrab}}$ es el salario anual del trabajador en COP

n_{veh} el número de vehículos

n_{cent} es el número de centros drop-off

3.1.2.1. Aplicación del Modelo

Para comprobar la aplicación del modelo hemos realizado un ejemplo con valores tomados de los diferentes artículos (Gomes et al., 2008; Groot et al., 2014; Tonjes & Mallikarjun, 2013) y valores supuestos:

Tabla 3.2. Valores de parámetros ingresados en el modelo

Valores de parámetros ingresados				
	Abreviatur a	Curbside	Drop-off	Unidad
Número de hogares	n_{hog}	9,852 ^A	9,852 ^A	Hogares
Costo Inversión Contenedor	C_{inv}	11,577.72 ^A	4,961,880 ^B	COP
Costo Mantenimiento Contenedor (35% DE C_{inv})	$C_{\text{mant_cont}}$	4,052.202 ^C	1,736,658 ^C	COP
Periodo de Depreciación del Contenedor	Dep	5 ^A	15 ^B	años
Tasa de Interés de la Inversión	%int	0.05 ^B	0.05 ^B	%
Frecuencia de Recolección Anual	Frecrecol		68 ^A	Veces/Año
Cantidad de Residuos Reciclables Secos	QR_{Recsec}	6,349 ^A	6,349 ^A	t/año
Cantidad de Residuos Biodegradables	QR_{Biod}	9,572 ^A	9,572 ^A	t/año
Cantidad de Residuos Inorgánicos	QR_{Inorg}	3,560 ^A	3,560 ^A	t/año
Cantidad de Residuos de Combustibles	QR_{Comb}	321 ^A	321 ^A	t/año
Cantidad de Residuos Peligrosos	Q_{Respel}	56 ^A	56 ^A	t/año
Capacidad del Contenedor	Cap_{cont}		100 ^B	t
Costo Unitario de una Bolsa	C_{bolsa}	181.9356 ^B		COP
Capacidad del Camión	Cap_{cam}	1.8 ^B	0.75 ^B	T
Distancia Promedio de Acarreo	$D_{\text{prom_acar}}$	18 ^B	18 ^B	Km
Velocidad del Vehículo en Acarreo	$V_{\text{acar_veh}}$	60 ^B	60 ^B	km/h

Número de Pausas	n_{pausas}	200 ^A	200 ^A	-
Tiempo promedio por pausas	T_{inac}	0.014 ^A	0.3 ^A	h
Distancia Conducida por el Vehículo	$D_{\text{cond_veh}}$	53 ^A	18 ^A	km
Velocidad de Conducción del Vehículo entre Paradas	$V_{\text{cond_veh}}$	25 ^B	40 ^B	km/h
Tiempo que un vehículo puede ser utilizado durante un año	T_{veh}	3,000 ^B	3,000 ^B	h
Porcentaje de uso de un vehículo por año	Eff%	0.8 ^B	0.8 ^B	%
Costo de Inversión del Vehículo	$C_{\text{inv_veh}}$	681,431,520 ^B	826,980,00 ^B	0 ^B COP
Depreciación del vehículo	Dep	60 ^B	60 ^B	mes
Costo de Seguro del Vehículo	$C_{\text{seg_veh}}$	8,269,800 ^B	8,269,800 ^B	COP
Costo de Impuesto del Vehículo	$C_{\text{imp_veh}}$	3,307,920 ^B	3,307,920 ^B	COP
Consumo de Combustible del Vehículo en Conducción	$C_{\text{Scond_veh}}$	0.33 ^B	0.4 ^B	l/km
Número de Hogares por Punto de Recolección	n_{hogpr}	10 ^A		-
Consumo de Combustible del Vehículo en Inactividad	$C_{\text{Sinac_veh}}$	4 ^B	3 ^B	l/h
Precio de Combustible	P_{comb}	4,631.088 ^B	4,631.088 ^B	Cop/litro
Distancia de Acarreo del Vehículo	$D_{\text{acar_veh}}$	397,160 ^A	953,184 ^A	km
Consumo de Combustible del Vehículo en Acarreo	$C_{\text{Sacar_veh}}$	0.25 ^B	0.25 ^B	l/km

A: Valores supuestos

B: Tomado de Groot et al. 2014

C: Tomado de Gomes et al. 2008

* Los valores tomados de Groot et al. 2014 fueron convertidos de Euros a COP con una tasa de \$3.307,92

3.1.2.2. RESULTADOS DEL MODELO

Tabla 3.3. Resultados del modelo

Resultados				
No. Ecuación	Abreviatura	Curbside	Drop-off	Unidad
(1)	C_{anual}	4,570,210,720		COP
(2)	C_{anual}		3,979,136,155	COP
(3)	C_{cont}		6,762,070	COP
(4)	n_{cont}		3	Contenedor
(5)	$Q_{\text{año}}$		19,858	t/año
(6)	$C_{\text{inv_cont}}$	2,894	578,886	COP
(7)	C_{contcurb}	68,438,218		COP
(8)	C_{bolsas}	121,885,208		COP
(9)	C_{veh}	137,850,823	460,477,352	COP
(10)	$C_{\text{inv_veh}}$	35,998,790	43,687,852	COP
(11)	n_{veh}	3	8	Vehículos
(12)	T_{total}	6,954	19,997	h
(13)	$T_{\text{cond_veh}}$	144	31	h
(14)	$T_{\text{inac_veh}}$	190	4,080	h
(15)	$T_{\text{acar_veh}}$	6,619	15,886	h
(16)	$D_{\text{acar_veh}}$	397,160	953,184	km
(17)	$n_{\text{descargas}}$	11,032	26,477	Descargas
(18)	$C_{\text{com_veh}}$	3,543,710,594	2,354,248,781	COP
(19)	$C_{\text{cond_veh}}$	1,842,876,838	882,822,453	COP
(20)	$\text{Dist}_{\text{cond_veh}}$	1,205,867	476,574	km
(21)	n_{pausas}	66,994		pausas
(22)	n_{pausas}		26,477	pausas
(23)	$C_{\text{inac_veh}}$	1,241,013,028	367,856,582	COP
(24)	$C_{\text{acar_veh}}$	459,820,728	1,103,569,746	COP
(25)	C_{salarios}	766,764,095		COP
(26)	C_{salarios}		1,157,647,953	COP

3.1.2.3 ANÁLISIS DEL MODELO

Para desarrollar un SRRD eficiente y económicamente viable, es relevante conocer previo a su implementación, el detalle de cada uno de los costos fijos y variables en los que incurriremos. Entre los costos fijos encontramos: los vehículos para realizar la recolección, la contratación de personal y la inversión en contenedores ó bolsas de plástico. Entre los costos variables encontramos: el consumo de combustible en tiempo de conducción, inactividad y acarreo.

Una característica fundamental del modelo desarrollado, es que puede ser aplicado a SRRD que empleen separación de residuos en la fuente en dos o más fracciones y permite calcular los costos de contenedores tanto para el método drop-off como para el método curbside.

Antes de utilizar el modelo, es necesario definir de forma clara el método seleccionado y cada uno de sus componentes (ver tabla 3.1.).

Los costos de un SRRD son altamente influenciados por aspectos como la capacidad de los contenedores, la capacidad de las bolsas (en caso de ser empleadas), la capacidad de los vehículos y el tipo de combustible que estos consumen, el personal a contratar y no menos importante, la caracterización de los residuos y la fracción en la que serán recolectados.

Al observar los resultados del modelo podemos observar que el SRRD es mucho más costoso cuando empleamos el método curbside. Esto como consecuencia del alto consumo de combustible de los vehículos en tiempo de conducción y en tiempo de inactividad. Además, el entregar bolsas o contenedores por cada hogar, contribuye al incremento del costo total.

Para calcular la diferencia total en porcentaje (%), emplearemos los resultados de las ecuaciones (1) y (2) de la tabla 3.3. los cuales muestran los costos totales según el método seleccionado.

La diferencia total se calcula a partir de la ecuación (27) de la siguiente forma:

$$\text{Diferencia de costos} = 100 \frac{(C_{\text{anual-Curb}} - C_{\text{anual-Dropoff}})}{C_{\text{anual-Curb}}} = 13\% \quad (27)$$

Al momento de observar los resultados, podemos identificar que las principales diferencias se encuentran en el costo de los vehículos, el costo de combustible y el costo de contratación del personal. Cabe resaltar que estos son factores que el equipo planeador del sistema puede manejar.

En el caso de los vehículos, la diferencia en costos radica principalmente en que los vehículos utilizados con el método curbside tienen una capacidad mayor a la de los vehículos utilizados con el método drop-off. A mayor capacidad del vehículo, menor es el número de vehículos a adquirir.

En el caso del combustible, la diferencia radica en el método de recolección. Mientras que con el método curbside, es el vehículo quien se desplaza hasta cada hogar, con el método drop-off, son los residentes quienes se desplazan hasta el punto de recolección. Una forma de optimizar esto, es estableciendo mejores rutas de recolección que optimicen los tiempos de conducción, inactividad y acarreo y como consecuencia, exista una reducción en el consumo del combustible.

La diferencia en los costos de contratación del personal, radica en que el método drop-off emplea 4 trabajadores por punto más 1 conductor por vehículo, mientras que el curbside sólo emplea al conductor del vehículo más dos cargadores de residuos.

En conclusión, el 13% de diferencia entre el costo anual del método curbside y el costo anual del método drop-off puede variar de acuerdo a las decisiones tomadas por el equipo planeador respecto a la compra de los vehículos, la selección de las rutas de recolección y la conformación de los equipos de trabajo.

Cambiando los parámetros de entrada y supuestos, el modelo de costos, se convierte en un elemento de gran apoyo para planear SRRD eficientes y económicamente viables.

CONCLUSIONES

A lo largo de esta investigación, confirmamos la falta de información sobre la etapa de planeación de un SRRD. Son muchos los casos de estudio donde se analizaron los SRRD durante su implementación en una región determinada, pero la información sobre el proceso de planificación del sistema era escasa.

Analizando los casos de estudio y las evaluaciones de los diferentes sistemas, fue posible la creación de un diagrama de flujo que contiene las actividades del proceso de planeación. Dentro de estas actividades, la de mayor importancia es determinar si existe una legislación que imponga la creación de un SRRD o si la implementación es voluntaria. Las políticas que existan sobre la gestión de residuos, se convierten en un factor determinante para el éxito o el fracaso del sistema, ya que de allí depende la participación de los usuarios.

Posterior a la creación del diagrama de flujo, creamos una tabla de datos útil para la conformación de un SRRD. Dentro de los principales componentes, encontramos el método de recolección, tipo de servicio, tipo de vehículo, frecuencia de recolección, tipos de materiales, forma de clasificación, tipo de contenedor y ubicación del contenedor.

Conformado el SRRD, procedimos a crear un modelo para estimar los costos del mismo. Este modelo es producto del análisis de diferentes modelos de costos de otros SRRD implementados en diversas regiones del mundo y su objetivo principal es calcular un estimado de la cantidad de dinero requerida para financiar el sistema, sea de metodología curbside o drop-off y con uno o varios tipos de residuos, lo que lo hace diferente a los otros modelos de costos. Adicional a esto, tuvimos en cuenta los costos de los componentes básicos, como lo son los vehículos, los contenedores y bolsas, el combustible y la contratación de personal.

En el ejemplo de aplicación del modelo, es posible observar la diferencia entre el costo total cuando se emplea el método curbside y cuando se emplea el método drop-off. Esto como consecuencia del consumo del combustible del método curbside por realizar una recolección más directa.

Futuras investigaciones podrán ser orientadas a desarrollar modelos para optimizar las rutas de recolección, así como para estimar los costos de las emisiones de gases de efecto invernadero ocasionados por los SRRD.

Adicional a esto, otra observación a partir de nuestra investigación, es que en la planeación del SRRD y en el modelo de costos, no se incluyen los gastos de búsqueda, selección y contratación del personal que realizará la planeación del SRRD ni los costos de realizar el estudio demográfico, la caracterización del flujo de residuos y la elaboración de las estrategias de información del sistema.

Para investigadores e interesados en el tema, para confirmar la efectividad del SRRD, se debe determinar el grado de recuperación de materiales. Un complemento para este modelo, sería desarrollar otro que permita estimar la eficiencia de la recuperación de materiales, porcentajes de recuperación y de reutilización de los materiales.

BIBLIOGRAFIA

Beigl, P., Lebersorger, S., & Salhofer, S. (2008). Modelling municipal solid waste generation: A review. *Waste management*, 28(1), 200-214.

Beliën, J., De Boeck, L., & Van Ackere, J. (2012). Municipal solid waste collection and management problems: a literature review. *Transportation Science*, 48(1), 78-102.

Bernon, M., & Cullen, J. (2007). An integrated approach to managing reverse logistics. *International Journal of Logistics: Research and Applications*, 10(1), 41-56.

Bilitewski, B., Härdtle, G., Marek, K. .: Waste Management, *Springer, Berlin 1997, P. 21*

Dahlén, L., & Lagerkvist, A. (2010). Evaluation of recycling programmes in household waste collection systems. *Waste Management & Research*, 28(7), 577-586.

Dahlén, L., Vukicevic, S., Meijer, J. E., & Lagerkvist, A. (2007). Comparison of different collection systems for sorted household waste in Sweden. *Waste Management*, 27(10), 1298-1305.

De Feo, G., & Malvano, C. (2012). Technical, economic and environmental analysis of a MSW kerbside separate collection system applied to small communities. *Waste management*, 32(10), 1760-1774.

El Tiempo. (2014). El reciclaje puede llegar al 20 % en las ciudades del país. Bogotá, Colombia. Recuperado de: <http://www.eltiempo.com/bogota/reciclaje-en-colombia-red-como-vamos/14233618>

Fleischmann, M., Krikke, H. R., Dekker, R., & Flapper, S. D. P. (2000). A characterisation of logistics networks for product recovery. *Omega*, 28(6), 653-666.

Gallardo, A., Bovea, M. D., Colomer, F. J., & Prades, M. (2012). Analysis of collection systems for sorted household waste in Spain. *Waste Management*, 32(9), 1623-1633.

Gallardo, A., Bovea, M. D., Colomer, F. J., Prades, M., & Carlos, M. (2010). Comparison of different collection systems for sorted household waste in Spain. *Waste Management*, 30(12), 2430-2439.

Garcés, C., Lafuente, A., Pedraja, M., & Rivera, P. (2002). Urban waste recycling behavior: antecedents of participation in a selective collection program. *Environmental management*, 30(3), 378-390.

Gomes, A. P., Matos, M. A., & Carvalho, I. C. (2008). Separate collection of the biodegradable fraction of MSW: An economic assessment. *Waste Management*, 28(10), 1711-1719.

Groot, J., Bing, X., Bos-Brouwers, H., & Bloemhof-Ruwaard, J. (2014). A comprehensive waste collection cost model applied to post-consumer plastic packaging waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 85, 79-87.

Iriarte, A., Gabarrell, X., & Rieradevall, J. (2009). LCA of selective waste collection systems in dense urban areas. *Waste Management*, 29(2), 903-914.

Kogler, T. (2007). Waste collection—A report. With support from ISWA Working Group on Collection and Transportation Technology. 2007) [2013-12-01]. <http://scholar.googleusercontent.com/scholar>.

Lakhan, C. (2015). Diversion, but at what cost? The economic challenges of recycling in Ontario. *Resources, Conservation and Recycling*, 95, 133-142.

Larsen, A. W., Merrild, H., Møller, J., & Christensen, T. H. (2010). Waste collection systems for recyclables: an environmental and economic assessment for the municipality of Aarhus (Denmark). *Waste Management*, 30(5), 744-754.

Marshall, R. E., & Farahbakhsh, K. (2013). Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries. *Waste Management*, 33(4), 988-1003.

Mayring, P. (2003). Qualitative inhaltanalyse – *Grundlagen und Techniken*. [Qualitative content analysis] (8th Ed.). Weinheim, Germany: Beltz Verlag.

Mcdougall, F. R., White, P. R., Franke, M., & Hindle, P. (2001). Integrated solid waste management: A Life Cycle Inventory. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 6(5), 320.

Mølgaard, C. (1995). Environmental impacts by disposal of plastic from municipal solid waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 15(1), 51-63.

Monroy, N., & Ahumada, M. C. (2006). Logística reversa: “retos para la ingeniería industrial”. *Revista de Ingeniería*, (23), 23-33.

Özdemir-Akyıldırım, Ö. (2015). Deposit-refund system vs. compliance scheme membership: How to comply with producer responsibility regulations? *International Journal of Production Economics*, 162, 25-44.

Palmer, K., Sigman, H., & Walls, M. (1997). The cost of reducing municipal solid waste. *Journal of Environmental Economics and Management*, 33(2), 128-150.

Rodrigues, S., Martinho, G., & Pires, A. (2016). Waste collection systems. Part A: a taxonomy. *Journal of Cleaner Production*, 113, 374-387.

Rogers, D. S., & Tibben-Lembke, R. S. (1999). *Going backwards: reverse logistics trends and practices* (Vol. 2). Pittsburgh, PA: Reverse Logistics Executive Council.

Seadon, J. K. (2010). Sustainable waste management systems. *Journal of Cleaner Production*, 18(16), 1639-1651.

Simon, B., Amor, M. B., & Földényi, R. (2016). Life cycle impact assessment of beverage packaging systems: focus on the collection of post-consumer bottles. *Journal of Cleaner Production*, 112, 238-248.

Tanskanen, J. H., & Kaila, J. (2001). Comparison of methods used in the collection of source-separated household waste. *Waste management & research*, 19(6), 486-497.

The Council of Supply Chain Management Professionals [CSCMP]. (2016) CSCMP Supply Chain Management Definitions and Glossary. Illinois, EU: CSCMP. Recuperado de: <https://cscmp.org/supply-chain-management-definitions>

Thøgersen, J. (1994). Monetary incentives and environmental concern. Effects of a differentiated garbage fee. *Journal of Consumer Policy*, 17(4), 407-442.

Tonjes, D. J., & Mallikarjun, S. (2013). Cost effectiveness of recycling: A systems model. *Waste management*, 33(11), 2548-2556.

United Nations Environment Programme (2015) Global Waste Management Outlook. Recuperado de <http://www.unep.org/ietc/Portals/136/Publications/Waste%20Management/GWMO%20report/GWMO%20full%20report.pdf>

Wagner, T. P. (2013). Examining the concept of convenient collection: An application to extended producer responsibility and product stewardship frameworks. *Waste management*, 33(3), 499-507.

Wagner, T. P., & Broaddus, N. (2016). The generation and cost of litter resulting from the curbside collection of recycling. *Waste Management*, 50, 3-9.

Wright, R. E., Richey, R. G., Tokman, M., & Palmer, J. C. (2011). Recycling and reverse logistics. *The Journal of Applied Business and Economics*, 12(5), 9.

Yu, H., & Solvang, W. D. (2016). A general reverse logistics network design model for product reuse and recycling with environmental considerations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-19.