

Estado del arte para el diseño de una cadena de recuperación de llantas usadas en el contexto local considerando las perspectivas de la gestión de residuos

Autora:

Luisa Valentina Gracia Prada

Código 2320141037

Tutora:

Angie Marcela Ramírez Rubio

Investigador y co-tutor:

Andrés Alberto García León

Informe de asistencia de investigación, dentro del proyecto de investigación  
“Modelamiento de una cadena de recuperación de llantas usadas en el contexto urbano.  
Caso Ibagué.”

Universidad de Ibagué  
Facultad de Ingeniería  
Programa de Ingeniería Industrial  
Ibagué 2018

## Tabla de contenido

<b>1. Resumen</b> .....	4
<b>2. Metodología</b> .....	5
<b>3. Marco teórico del diseño de cadenas de suministro inversas a partir de la gestión de residuos</b> .....	6
3.1. El manejo de los residuos sólidos en el contexto urbano .....	9
3.2. Evolución del término .....	9
3.3. La logística inversa en la gestión de residuos .....	10
3.4. El sistema de la gestión de residuos sólidos urbanos. ....	11
3.5. Sistemas de recolección de residuos .....	12
3.6. Indicadores para la recolección de residuos .....	14
3.7. Modelos de apoyo para la evaluación y gestión de residuos sólidos .....	15
<b>4. Casos empíricos del diseño de cadenas de abastecimiento inversas con perspectiva de la gestión de residuos</b> .....	16
4.1. Ubicación de sitios de recolección y zonificación, Italia. ....	18
4.2. Ciudad de Kampala, Uganda. ....	20
4.3. Optimización de las rutas de recolección y transporte de residuos sólidos municipales, India. ....	21
4.4. Industria del neumático, Turquía. ....	23
4.5. Compañía de electrodomésticos, Serbia.....	26
4.6. Sistemas de gestión de residuos en países de la Unión Europea. ....	27
4.7. Universidad de Lagos (Unilag), Lagos, Nigeria. ....	28
4.8. Vehículos al final de su vida útil, Japón.....	29
4.9. Empresa de neumáticos, Irán.....	30
4.10. Recolección de residuos en Comas, Distrito de Lima, Perú .....	32
<b>5. Aspectos relevantes de la gestión de residuos en el diseño de una cadena dedicada a la recuperación de llantas usadas</b> .....	34
5.1. Según las etapas de la recolección del sistema de gestión de residuos .....	34
5.2. Según la ubicación donde se desarrolle el sistema.....	36
5.3. Según las estrategias de planificación.....	36
5.4. Consideración de la incertidumbre .....	37
5.5. La importancia de la ubicación de los sitios de recolección .....	37
5.6. Transporte .....	38
5.7. Aspectos medioambientales .....	39

5.8.	Actores .....	40
5.9.	Aspectos por destacar para la ciudad de Ibagué .....	41
<b>6.</b>	<b>Gestión de residuos sólidos en el contexto colombiano.....</b>	<b>45</b>
6.1.	CEMPRE .....	45
6.2.	Baterías MAC.....	47
6.3.	Conceptos Plásticos y Bioplast .....	47
6.4.	Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá .....	48
6.5.	Logística inversa en el sector hospitalario, aplicación en Medellín .....	49
6.6.	Logística inversa en el sector plástico en Cartagena.....	52
6.7.	Recolección de aceite vehicular usado en la ciudad de Pereira .....	53
6.8.	Recolección y acopio de envases y empaques vacíos de plaguicidas en Boyacá.....	54
6.9.	Neumáticos al final de su vida útil en Colombia – Responsabilidad ampliada del conductor .....	56
<b>7.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>60</b>
<b>8.</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>60</b>

## 1. Resumen

El problema de la presente investigación se centra en la ineficiente gestión de los residuos de llantas usadas en la ciudad de Ibagué. Este problema no solo afecta el medio ambiente, sino que también desaprovecha oportunidades de negocio y empleo, factores importantes para el desarrollo sostenible en una región.

En este orden de ideas, para el diseño de una cadena de recuperación de llantas usadas en el contexto urbano se deben considerar diferentes aspectos como la gestión eficiente de los residuos como una fuente de generación de valor después de la fase de consumo. Con el fin de construir un plan de gestión de residuos en Ibagué se deben conocer los distintos sistemas a nivel mundial y adaptarlos para que funcionen bajo las condiciones de la ciudad, conociendo los referentes exitosos de gestión de residuos que han sido implementados por ciudades desarrolladas.

Los objetivos de la presente investigación son: 1) Determinar las bases conceptuales (marco teórico) necesarias para el diseño de una cadena de abastecimiento inversa desde la perspectiva de la gestión de los residuos, 2) Identificar y explicar casos empíricos en los que se hayan formulado o diseñado sistemas de gestión de residuos para una cadena de abastecimiento y, finalmente, 3) Identificar los aspectos relevantes que se deben tener en consideración a la hora de diseñar una cadena de abastecimiento que se dedique a la recuperación de llantas usadas. Estos objetivos se van a cumplir por medio de una revisión sistemática de la literatura de artículos científicos relacionados con la perspectiva de la gestión de los residuos.

El presente trabajo contribuye a la solución del problema abordado en el proyecto macro debido a que se presenta la información y relación entre los conceptos relevantes para el estudio, donde a su vez se puede tener una perspectiva general de cómo ha sido la evolución en este campo del conocimiento, facilitando su comprensión para el desarrollo del presente proyecto. Además, se presenta una sistematización de los casos en los que la gestión de los residuos sólidos se ha desarrollado en distintas regiones y cómo esta influye tanto en el impacto ambiental de la zona como en la generación de empleo e ingresos para la comunidad involucrada. Lo anteriormente mencionado proporciona a la investigación un marco de referencia para seleccionar las metodologías más apropiadas considerando el contexto de la ciudad de Ibagué mediante el estudio de los métodos utilizados por otros autores. Adicionalmente, el conocimiento de otras investigaciones le proporciona al presente proyecto los campos que no se han estudiado anteriormente y las brechas en la investigación que, a su vez, abren el camino para diseñar sistemas de gestión de residuos con distintos y nuevos aspectos a considerar.

El documento está estructurado de la siguiente forma: primero, se explica la metodología utilizada para la búsqueda de la información, después se presenta información respecto a la importancia de la logística inversa en la cadena de abastecimiento con flujo inverso, así como la relación de estos conceptos con la gestión de los residuos sólidos y los principales componentes de cada concepto, incluyendo evolución del concepto, procesos de cada uno y modelos de referencia. Posteriormente se presentan casos de estudio de diferentes países y regiones, desarrolladas y en

vía de desarrollo, con el fin de crear una base conceptual que permita identificar cómo estos sistemas han afectado a la ciudad y viceversa. Luego, se plantean qué aspectos son claves para tener en cuenta para diseñar una cadena de abastecimiento inversa en el contexto urbano. Después, se investigaron los casos colombianos en los que se ha formulado y/o implementado un sistema de logística inversa para la gestión de los residuos. Finalmente se presentan las conclusiones del estudio y la bibliografía utilizada.

## 2. Metodología

La metodología utilizada se basa en el marco de revisión de literatura propuesto por Newbert (2007), el cual consta de siete fases: 1) Encontrar las palabras claves para la revisión de literatura, para este fin se seleccionaron los artículos más relevantes de la gestión de residuos en el contexto urbano, y a partir de estos se desarrollaron nuevas palabras clave y sinónimos relevantes, que para este estudio son las 15 a continuación: *Waste management, Techniques, Reverse logistics, Solid waste, Waste characterization, Waste collection, Municipal solid waste, Recycling, Reverse supply chain, Route optimization, Waste management system, Strategies y Collection trends*. 2) En la segunda etapa, se hace uso de las 15 palabras claves para formar frases o cadenas de búsqueda que ayuden a encontrar literatura relevante del tema de estudio; para este estudio, algunas de las que se utilizaron son las siguientes:

- *Municipal solid waste collection trends*
- *Solid waste collection strategies management system*
- *“waste collection system” AND “life cycle assessment”*
- *“solid waste” AND management AND collection AND systems AND (strategies OR techniques)*
- *“waste management” AND “reverse supply chain”*
- *“waste management” AND “reverse logistics”*
- *Design reverse supply chain waste management*

3) En la tercera etapa, la búsqueda se limitó a artículos científicos de revistas especializadas de alto impacto en la clasificación de *Scimago SJR* que estuvieran ubicadas en los cuartiles 1 y 2 para asegurar la calidad de las publicaciones. Se incluyeron solamente revistas en inglés disponibles en las bases de datos de *ScienceDirect* y *Scopus*. La búsqueda se restringió al título, resumen y palabras clave de los artículos. El filtro temporal fueron los últimos diez años (2007-2018). En estas bases de datos, se contó con el sistema que proporciona sugerencias de artículos similares o relacionados a los previamente leídos, a partir de allí se extrajeron los artículos relevantes. 4) Para la cuarta etapa se consolidaron los resultados de búsqueda de las bases de datos usadas y se realizó la eliminación de duplicados con el fin de tener un resultado más relevante a la investigación. 5) En esta etapa se leyeron todos los resúmenes de los artículos restantes para así descartar aquellos que no tuvieran relevancia para el tema y se eliminaron los artículos que son revisiones de libros, para obtener un total de 31 artículos en esta etapa. 6) En la sexta etapa se hizo una completa revisión de los artículos seleccionados, en donde se descartaron algunos artículos por no proporcionar información relevante para el objeto de esta investigación, por lo

tanto, la cantidad de artículos se redujo a 23. 7) Por último, se clasifican los artículos seleccionados.

Posteriormente se procedió a realizar una revisión de la literatura sobre la gestión de los residuos sólidos en el contexto colombiano. Para esta etapa, se usaron dos cadenas de búsqueda:

- “*Waste management*” AND Colombia, en la base de datos ScienceDirect.
- "logística inversa" AND Colombia, en Google Académico.

A partir de los artículos que se revisaron en estas bases de datos, se encontró que los periódicos colombianos El Tiempo y El Espectador tienen información sobre empresas y organizaciones que se dedican a recuperar los residuos, de esta forma se obtuvo el nombre de las organizaciones y mediante la búsqueda en las páginas web oficiales de estas, se encontró más información útil para este estudio.

### **3. Marco teórico del diseño de cadenas de suministro inversas a partir de la gestión de residuos**

En la gran mayoría de las empresas o cadenas de abastecimiento se distribuyen productos terminados a consumidores finales, a esto se le conoce como flujos directos, los cuales son usualmente efectivos. Sin embargo, cuando se trata del movimiento de bienes en el sentido inverso suelen haber contratiempos de transporte, falta de instalaciones, entre otros, que causan mayores costos e ineficiencias. Es por esto que surge la necesidad de desarrollar e implementar un sistema de logística inversa para manejar adecuadamente los flujos en la cadena de suministro inversa (Djikanovic & Vujosević, 2016).

La logística inversa es definida por De Brito & Dekker (2004) como la planificación, implementación y control de los flujos inversos de materias primas, inventario en proceso, empaque y productos terminados desde un punto de fabricación, distribución o uso hasta un punto de recuperación o adecuada disposición. Varios autores han definido de forma distinta, aunque con aspectos similares, esta rama de la logística, sin embargo, en todas las definiciones se ve involucrada la recuperación de recursos y el movimiento de estos materiales desde el punto de consumo hasta el punto de origen y adicionalmente extiende la vida de los productos, pues involucra actividades de recolección, transporte, reprocesamiento, adición de valor y disposición final. En este orden de ideas, la implementación de una logística inversa es la solución para gestionar los residuos (Kinobe, Gebresenbet, Niwagaba, & Vinnerås, 2015).

La logística inversa ha recibido una importancia creciente y más organizaciones la están adoptando como una herramienta estratégica debido a las crecientes preocupaciones ambientales, la legislación, la responsabilidad social corporativa y la competitividad sostenible (Kannan, Palaniappan, Zhu, & Kannan, 2012).

Ahora bien, existe un sistema que integra la logística convencional, es decir, los flujos directos, con la logística inversa, sistema que es conocido como cadena de suministro de circuito cerrado *Close Loop Supply Chain* (CLSC). En la práctica estos flujos suelen ir separados, sin embargo, algunos



En la gestión de la cadena de suministro, las principales preocupaciones en un problema de logística inversa son la gestión de los residuos, la recuperación de materiales o recuperación de productos (Pokharel & Mutha, 2009). Para llevar a cabo la gestión de residuos usando la logística inversa, varios autores han explicado los procesos clave para ellos desde distintas perspectivas, sin embargo, Agrawal et al. (2015) los ha sintetizado como sigue:

- Adquisición de productos: se entiende también por productos, los materiales o componentes usados que se adquieren de los usuarios finales para su posterior procesamiento. Sin embargo, existe la posibilidad de que el producto se devuelva al consumidor si no es permitido para el sistema. Esta toma de decisión se le conoce como “compuerta”.
- Recolección: los productos son recogidos y entregados a la instalación.
- Inspección y clasificación: es necesario evaluar la apariencia general y el estado de los elementos del producto. La clasificación depende de los costes de transporte, eliminación y desembalaje, así como de la calidad del producto devuelto.
- Disposición: la decisión de disposición para un procesamiento posterior tiene unas alternativas según Tibben-Lembke & Rogers (2002), reutilización del producto, actualización del producto, recuperación de materiales y la gestión de residuos.

Tanto la logística inversa como los sistemas de gestión de desechos en la mayoría de los países en desarrollo suelen ser informales y desordenados, con múltiples actores involucrados, los cuales no sólo reducen la eficiencia de esta cadena, sino que, además, ponen en riesgo la salud de quienes están más involucrados en el sistema (Kinobe et al., 2015). Esta mala gestión suele obedecer a la falta de conocimientos técnicos, a los recursos financieros limitados y usualmente insuficientes, y a políticas y legislaciones gubernamentales inadecuadas (Vidanaarachchi, Yuen, & Pilapitiya, 2006).

Siguiendo este orden de ideas, Colombia como país en desarrollo tiene una gestión de residuos desordenada que poco se ha explorado (Martínez-Giraldo & J. Sarache-Castro, 2014), y en la ciudad de Ibagué, la recolección de las llantas usadas representaría un beneficio económico y ambiental, además de proponer un modelo para las otras ciudades que tengan el mismo interés. Las llantas usadas suelen acumularse convirtiéndose en focos contaminantes e incluso algunas son quemadas a cielo abierto, lo cual contamina el aire y afecta la calidad de vida de quienes respiran el mismo, por lo que el desarrollo de métodos de recuperación alternativos se ha convertido en un tema vital (Subulan, Taşan, & Baykasoğlu, 2015). Las nuevas tendencias de consumo han provocado que la vida útil de los autos disminuya considerablemente y con el paso de los años más vehículos son sacados de las carreteras, dejando sin uso una cantidad de componentes que bien pueden ser reutilizados o eliminados, como lo son las llantas. (Phuc, Yu, & Tsao, 2017).

Las estadísticas muestran que durante el año hay más de 1.000.000 de toneladas de llantas que salen como desecho en todo el mundo y estas no son aptas para eliminar en vertederos, debido a su contenido de carbón y humo, sin embargo, su estructura revela grandes oportunidades para su reutilización. La literatura muestra que la mayoría de los estudios investigan el problema de la cadena de suministro de neumáticos en la cadena directa o inversa, por separado, causando resultados inapropiados y sin considerar la incertidumbre. El diseño de una cadena de suministro

de ciclo cerrado optimizada no sólo generaría ganancias para los fabricantes de neumáticos, sino que también se disminuye el desperdicio para un desarrollo sostenible (Pedram et al., 2017).

### 3.1. El manejo de los residuos sólidos en el contexto urbano

En la última década, el manejo de los residuos ha sido un tema que ha tomado fuerza debido a la alerta ecológica que ha traído el calentamiento global (Kayakutlu, Daim, Kunt, Altay, & Suharto, 2017). Este fenómeno ha ido evolucionando gracias al crecimiento poblacional y las condiciones de consumo modernas que han provocado que los residuos aumenten considerablemente. Asimismo, los espacios determinados para la eliminación de residuos son cada vez más limitados y la tarea de clasificar los mismos es más difícil. Lo anterior hace que la necesidad de reducir, reciclar y reutilizar los recursos se haga cada vez más notoria sin importar de qué ciudad se hable o el nivel de avance tecnológico que haya en ella, puesto que la gestión de los residuos es clave para satisfacer las necesidades futuras de la sociedad de manera sostenible (Cobo, Dominguez-Ramos, & Irabien, 2017; Djikanovic & Vujosević, 2016; Kayakutlu, Daim, Kunt, & Altay, 2017).

Los estudios previos sobre gestión de residuos en logística inversa se dirigieron principalmente a los desechos industriales, es decir, los desechos electrónicos y sus materiales, y los desechos peligrosos, como los desechos nucleares (Zhang, Huang, & He, 2011). Sin embargo, desde hace más de una década, no solo es una técnica que debe adoptarse por las industrias, sino que el manejo de los residuos sólidos urbanos o municipales se ha convertido en una prioridad para las comunidades urbanas de todo el mundo (Huang & Chang, 2003).

Los residuos sólidos urbanos (RSU) están compuestos por desechos de bienes duraderos, bienes no duraderos, envases y empaques, restos de comida, restos de poda y desechos inorgánicos misceláneos de fuentes residenciales, comerciales e industriales (Demirbas, 2011). La generación mundial de estos desechos se estimó en alrededor de 7-10 mil millones de toneladas por año durante el 2015, y la cantidad per cápita ha aumentado en los últimos 50 años (Wilson et al., 2015). A pesar de que en todos los países y ciudades se generan residuos, la composición de ellos varía según la estación, el estilo de vida, demografía, geografía y la legislación local (Adeniran, Nubi, & Adelopo, 2017).

### 3.2. Evolución del término

La Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés de *Environmental Protection Agency*) define el sistema de manejo de residuos como un sistema completo de reducción, recolección, compostaje, reciclaje y eliminación de residuos. Demirbas (2011) define la gestión de residuos como “la recolección, el transporte, el procesamiento, el reciclaje o la eliminación, y la supervisión de los materiales de desecho. Un sistema típico de gestión de residuos comprende la recolección, el transporte, el tratamiento previo, el procesamiento y la eliminación final de los residuos” y el sistema de gestión de residuos como “el conjunto de actividades relacionadas con la manipulación, el tratamiento, la eliminación o el reciclado de los materiales de desecho”. Además, agrega que su propósito es que los materiales de desecho se eliminen de la fuente o ubicación donde se generan y tratan, desechan o reciclan de manera segura y adecuada. Para (Orhan, 2011)

la gestión de residuos es un método que dirige a las gerencias e instituciones a actuar por la sostenibilidad al mostrar su capacidad para usar y proteger los recursos actuales. El manejo de desechos sólidos municipales según Das & Bhattacharyya (2015) es una actividad multidisciplinaria que incluye generación, separación de fuentes, almacenamiento, recolección, transferencia y transporte, procesamiento y recuperación, y finalmente, disposición. Según Leblanc (2016) un manejo de los residuos sólidos que sea eficiente considera cómo reducir, reusar, reciclar y manejar los residuos para proteger la salud humana y el medio ambiente. Para Cobo et al. (2017) el sistema de gestión de residuos es aquel que proporciona funciones para el tratamiento de los residuos y su valorización. El tratamiento de residuos busca minimizar los impactos ambientales generados y la valorización transforma los materiales en productos capaces de proporcionar un servicio.

### 3.3. La logística inversa en la gestión de residuos

Para manejar los residuos se requiere implementar una cadena de abastecimiento inversa que esté enfocada a ellos, pero su diseño varía según el tipo de tratamiento que se le hará al residuo. Según Agrawal et al. (2015) el diseño de la red de logística inversa enfocada a la recolección de los residuos puede extenderse a redes de reciclaje, reutilización y de remanufactura, así:

- La red de reciclaje suele ocuparse de recuperar material de productos con un valor bastante bajo (Blackburn, Guide, Souza, & Wassenhove, 2004). Es usual que los costos de inversión sean altos debido a los equipos requeridos para el reciclaje, por lo tanto, requieren un alto volumen de procesamiento para que sea económicamente viable. Por esto se prefiere una estructura de red de circuito abierto y centralizada que implique una pequeña cantidad de niveles. Los modelos de redes de reciclaje se diseñan para tomar decisiones sobre el número de instalaciones, la ubicación, la región que se desea cubrir y su capacidad. La mayoría de metodologías usadas para el diseño de estas redes incluyen métodos determinísticos, modelos estocásticos, de simulación y heurísticos. Por ejemplo, enfocándose en el campo de interés de esta investigación, para la industria de los neumáticos, Subulan et al. (2015) diseñan una red de cadena de suministro de ciclo cerrado con diferentes alternativas de recuperación mediante el uso de la programación de objetivos difusos.
- En red de reutilización, los productos que se van a reutilizar directamente solo requieren de una inspección, limpieza y mantenimiento menor. Se prefiere una estructura de red plana y descentralizada que implique una pequeña cantidad de niveles. Estos productos vuelven a la cadena de suministro de reenvío y forman una cadena de suministro de circuito cerrado. Por ejemplo, Dai & Wang (2014) plantean un modelo para ubicar un centro de logística inversa para reutilización directa usando simulación estocástica, un algoritmo genético y programación lineal.
- Las redes de remanufactura suelen llevarse a cabo por los fabricantes debido a que se tratan productos de alto valor y tienen el conocimiento del producto. Se prefiere usar instalaciones existentes para la remanufactura formando una cadena de suministro de circuito cerrado. Esta red funciona como intermediaria entre la recolección y la redistribución y por ende forma una estructura de múltiples niveles. Por ejemplo, Sasikumar, Kannan, & Haq (2010) plantean un

modelo para maximizar los beneficios de una red de logística inversa de varios niveles para la remanufactura de neumáticos.

#### 3.4. El sistema de la gestión de residuos sólidos urbanos.

Según el Parlamento y Consejo Europeo (European Parliament and Council, 2008) la gestión de residuos municipales consiste en varias actividades que incluyen la recolección, el transporte, el tratamiento, la recuperación de materiales y energía, y disposición de los mismos que deben abordarse de acuerdo con las prioridades acordadas por la Dirección de la Unión Europea de Marco de Residuos. Lo anterior demuestra que para cualquier sistema de gestión de residuos se deben tener en cuenta las legislaciones locales.

Para Armijo de Vega, Ojeda Benítez, & Ramírez Barreto (2008) determinar cantidad, calidad y potencial de reciclaje de los residuos generados son datos que proporcionan la información necesaria para establecer un programa integrado de gestión de residuos. Para su caso de estudio en la Universidad Autónoma de Baja California, la caracterización de estos datos tuvo tres etapas: (1) estimación de la generación diaria de residuos sólidos, (2) muestreo y caracterización de residuos sólidos, y (3) captura de datos y análisis de los montos y tipos de desechos generados.

Para Demirbas (2011) el sistema de gestión de residuos consta de cuatro fases que las resume de forma muy general como: 1) Generación de los desechos, 2) recolección, donde intervienen los sistemas de recolección y transporte de los desechos, 3) tratamiento, por ejemplo, transformación de desechos a productos útiles y 4) disposición final, es decir, el uso del producto o el fin de su vida útil en el vertedero. Añade que el papel de la gestión sostenible de los residuos es reducir la cantidad de residuos que se descargan al medio ambiente mediante la reducción de la cantidad de residuos generados y en su investigación se plantea que la mayor preocupación en el diseño de sistemas de gestión de residuos sólidos es la sostenibilidad, especialmente en los países en desarrollo (Elsaid & Aghezzaf, 2015).

Para Oguntoyinbo (2012) el sistema formal de gestión de residuos hace referencia a la gestión municipal a cargo de las agencias gubernamentales locales. Por otro lado, el sistema informal de gestión de residuos se refiere a las actividades no reguladas y no registradas de las personas involucradas en la recolección, disposición y reciclaje de los residuos. Un sistema de gestión de residuos incluso trata de incluir, valga la redundancia, el sector informal de residuos para la sostenibilidad ambiental y alivio de la pobreza. De este sector informal hacen parte los recicladores de calles, barrenderos, recolectores de basura puerta a puerta y compradores ambulantes, actores de los cuales se habla más adelante.

De forma similar a Demirbas, en la investigación de Guerrero, Maas y Hogland (2013) mencionan las etapas del sistema de gestión de residuos que se tuvieron en cuenta, las cuales son: 1) Generación y separación de residuos, 2) recolección, transferencia y transporte, 3) tratamiento, 4) reciclaje y 5) disposición final.

Ghiani, Laganà, Manni, Musmanno & Vigo (2014) proponen que un sistema de gestión de residuos puede descomponerse en dos subsistemas: 1) Un sistema regional de gestión de residuos que se

encarga de las decisiones estratégicas para diseñar las redes, por ejemplo, las inversiones para las instalaciones necesarias y 2) un sistema de recolección municipal que lidia con decisiones tácticas y operacionales como las rutas de transporte y la asignación de los flujos de residuos.

Arena & Di Gregorio (2014) proponen una serie de principios que los sistemas de gestión de residuos deben seguir: 1) Minimizar el uso de vertederos y asegurarse de que ningún residuo depositado contenga sustancias peligrosas, 2) minimizar operaciones que consuman demasiadas materias primas y energía y no produzcan una ventaja ambiental, 3) maximizar la recuperación de materiales y 4) maximizar la recuperación de la energía en materiales que no se pueden reciclar, ya que ahorra volumen en los vertederos y recursos de combustibles fósiles.

Según Adeniran et al. (2017) un sistema integrado de manejo de residuos es uno de los mayores retos para el desarrollo sostenible. El primer paso que se debe llevar a cabo en cualquier sistema de recolección de residuos para que sea exitoso es la caracterización de los mismos, conocer la composición de los residuos permite definir las estrategias de separación, recolección y frecuencia de recolección para el reciclaje (Armijo de Vega et al., 2008), puesto que cuando son eliminados indiscriminadamente conducen a la obstrucción de canales, drenajes y contaminación de los cuerpos de agua (Adeniran et al., 2017).

### 3.5. Sistemas de recolección de residuos

Una forma de cuidar los recursos es produciendo a partir de productos reciclables, para esto los materiales deben ser recuperados, aquí es donde el sistema de recolección es esencial para la incorporación de estos materiales al sector de fabricación. Los problemas de recolección y transporte son uno de los problemas operacionales más difíciles para desarrollar un sistema integrado de manejo de desechos (Nuortio, Kytöjoki, Niska & Bräysy, 2006). En la investigación realizada por Mwanza, Mbohwa & Telukdarie (2018) se identificó que el sistema de recolección de los residuos, así como la participación de los usuarios, afecta la cantidad y calidad de los materiales reciclables y sin un conocimiento de esta influencia se pueden retrasar los procesos de recuperación.

Otro aspecto que la recolección de los residuos afecta es los costos de implementar todo el sistema, puesto que es la operación que tiene un impacto más significativo en estos (Bertanza, Ziliani, & Menoni, 2018). Estos costos están influenciados por las características del municipio (tamaño y densidad de población), características del área donde se realiza la actividad (distancias, altitud, red de carreteras), entre otros (Greco, Allegrini, Del Lungo, Gori Savellini, & Gabellini, 2015). Así como los costos, la recolección de los residuos está asociada con las emisiones que genera un sistema de gestión de residuos sólidos, debido al sistema de transporte que se hace por medio de camiones, por esto es importante optimizar las rutas de recolección; si un sistema de recolección de residuos tiene muchas emisiones, existe una contradicción respecto al objetivo principal que es la conservación del medio ambiente (Jaunich et al., 2016).

Asimismo, los sistemas de recolección tienen gran relevancia en el sistema de gestión de residuos debido a que no solo contribuyen a la recuperación de materiales reciclables y a que se reduzca la

contaminación, sino que se crean empleos y se reducen los costos de transporte. La investigación de (Mwanza et al., 2018) identificó cuatro principales sistemas:

- **Recolección en la acera (*kerbside collection system*):** Este sistema implica la asignación de contenedores, bolsas o sacos a familias individuales como recipiente para los desechos, donde cada una saca el recipiente, con los desechos clasificados según el contenedor, a la acera en los días de recolección y al ser vaciado debe ser devuelto a su lugar de almacenamiento. En Dinamarca se realizó una evaluación ambiental con distintos tipos de recolección, donde se llegó a la conclusión que desde el punto de vista ambiental resulta más beneficioso la recolección de acera que los puntos de recolección y entrega. En este sistema se depende mucho del comportamiento de los ciudadanos.
- **Puntos de entrega (*drop-off collection system*):** los residentes deben dejar sus desechos en puntos de entrega, bien sean centros o sitios. En ambos casos los flujos de residuos clasificados son llevados, pero los sitios se hacen en contenedores a nivel del vecindario y los centros son puntos de reciclaje. Se ha mostrado que la facilidad de acceso a los contenedores es un factor motivador. Este sistema reduce costos comparado con otros sistemas de recolección.
- **Recompra (*buy-back collection system*):** Se presenta cuando se recicla a cambio de un pago en efectivo. Esta acción incentiva a los usuarios a reciclar. Las instalaciones donde se compra pueden procesar estos materiales y suelen revenderlos a fabricantes o intermediarios. El hecho de procesar o no los materiales no limita su influencia en el sistema de gestión de residuos, pues siguen siendo un vínculo entre el generador de desechos y la recuperación de estos. La ubicación de los centros de recompra es un factor importante por considerar, deberían estar cerca a industrias y centros comerciales, de tal forma aseguran la obtención de gran cantidad de materiales reciclables. En el ámbito social, este sistema contribuye a la creación de puestos de trabajo en la comunidad y, además, agrega valor. En las economías en desarrollo, donde la mayor parte de los residuos se recupera informalmente, se debe prestar atención a este sistema.
- **Depósito-reembolso (*deposit refund system*):** La legislación de contenedores retornables es un ejemplo de este sistema, donde se combina el cargo del producto y un subsidio para su eliminación o reciclaje adecuado. Este sistema se ha usado para aumentar y capturar el reciclaje de envases. En ocasiones este sistema es implementado voluntariamente por las empresas o son iniciativas estatales. Este sistema muestra más altos niveles de calidad en el producto devuelto que en la recolección en la acera, así como presenta mayores tasas de recuperación, sin embargo, cuenta con costos más altos. Este sistema no sólo se aplica a envases de bebida, sino también a envases de pesticidas, neumáticos, baterías, y en general, a los residuos con un valor económico.

Para esta etapa de recolección en la gestión de residuos, se han desarrollado métodos para optimizar todo tipo de sistema o método de recolección y la programación de los camiones encargados de esta labor, tales como el problema del vendedor viajero (TSP), de donde se derivó el problema del enrutamiento de vehículos (VRP), el VRP con ventanas de tiempo y el problema

del enrutamiento de vehículos de período (PVRP). También existen métodos estocásticos, simulación, algoritmos heurísticos y metaheurísticos (Gilardino, Rojas, Mattos, Larrea-Gallegos, & Vázquez-Rowe, 2017). Cabe resaltar que para cualquier tipo de modelamiento de un problema de recolección de residuos es importante considerar dos parámetros: la duración media de la parada en una ubicación de servicio y el tiempo entre paradas (Jaunich et al., 2016).

### 3.6. Indicadores para la recolección de residuos

Bertanza et al. (2018) proponen algunos indicadores tecno-económicos que pretenden evaluar simultáneamente aspectos relacionados con la caracterización de los residuos y el desempeño económico y operativo. Se abordaron indicadores simples, aquellos que la información requerida puede obtenerse mediante datos comúnmente disponibles en las bases de los municipios y compañías de gestión de residuos. Los indicadores consideran varios aspectos que influyen en la eficiencia de los sistemas de recolección de residuos sólidos urbanos, como el tipo de servicio prestado, la mano de obra requerida y el equipo utilizado. Este enfoque pretende cubrir los aspectos que más impactan el rendimiento del servicio de recolección. Se definieron tres grupos de indicadores: Descriptivos (D), de rendimiento (P) y económicos (E).

Los indicadores descriptivos resaltan las características principales de los residuos recolectados (cantidad y composición) y las características del servicio de recolección, tales como:

- a. D0: porcentaje de composición de los residuos recogidos en términos de fracciones recogidas por separado, residuos voluminosos, residuos urbanos y no clasificados.
- b. D1: cantidad anual (kg/año) de desechos recolectados per cápita.
- c. D2: cantidad anual de horas hombre gastadas para recoger una fracción de desechos.
- d. D3: cantidad anual de horas vehículo gastadas para recoger una fracción de desechos.
- e. D4: volumen (m<sup>3</sup>) anual disponible (en contenedores, papeleras, bolsas) para la recolección de desechos.

Los indicadores de rendimiento pretenden mostrar la eficiencia de las estrategias adoptadas y el equipo usado para la recolección de desechos como siguen:

- a. P1: cantidad (kg) de material recolectado por unidad de volumen de contenedores (m<sup>3</sup>).
- b. P2: cantidad (kg) de material recolectado por hora-hombre.
- c. P3: cantidad (kg) de material recolectado por hora-vehículo.
- d. P4: porcentaje de residuos clasificados respecto a la cantidad producida.

Los indicadores económicos se calculan para cada fracción o flujo de material, pueden ser:

- a. E1: costo de contenedores por cantidad de desechos recolectados.
- b. E2: costo de personal por cantidad de desechos recolectados.
- c. E3: costo de los vehículos por cantidad de desechos recolectados.
- d. E4: costo total, es decir, la suma de los costos anteriores.

### 3.7. Modelos de apoyo para la evaluación y gestión de residuos sólidos

Para lograr una reducción en el consumo de recursos naturales llevando a cabo la reutilización de los desechos, existen modelos que permiten desarrollar y evaluar los sistemas de gestión de residuos de forma multidimensional e integral (Cobo et al., 2017; Guerrero et al., 2013). Algunos de estos modelos se presentan a continuación:

- Sistemas circulares de gestión integral de residuos: los CIWMS (*Circular Integrated Waste Management Systems*) son sistemas que intentan imitar los sistemas autosuficientes propios de la naturaleza (como el ciclo del agua, por ejemplo). Tiene como objetivo transformar los residuos en recursos, de tal forma que se cuida al medio ambiente y no se descuida el crecimiento económico. Un caso en que se aplicó exitosamente este sistema fue la producción de aluminio secundario a partir de chatarra, su fabricación consume menos del 5% de la energía que se necesita para la producción de aluminio primario, aunque es preciso resaltar que los materiales secundarios, por sus propiedades químicas y físicas, no tienen un funcionamiento igual de eficiente al de los materiales primarios (JRC – Joint Research Centre, 2014). Un CIWMS busca mejorar la circularidad de recursos mediante el fortalecimiento del vínculo entre el tratamiento de residuos y la recuperación de recursos. Su objetivo es lograr un beneficio económico bajo impactos ambientales mínimos al reducir el consumo de recursos naturales por medio de la extensión del ciclo de vida del material reciclado. El diseño de la configuración óptima del sistema debe basarse en programación matemática y análisis de flujo de materiales para garantizar la circularidad del material (Cobo et al., 2017).
- Evaluación de ciclo de vida: LCA (*Life Cycle Assessment*) es un método para evaluar los impactos ambientales relacionados con el producto desde la adquisición de materia prima hasta su disposición final, proporcionando una visión holística del sistema pues evalúa todos los impactos involucrados. Actualmente es una de las metodologías más utilizadas para evaluar los sistemas de gestión de residuos en los países desarrollados, sin embargo, los estudios en los países en desarrollo referentes al tema son escasos (Goulart Coelho & Lange, 2018). El estudio consta de cuatro etapas: 1) definir objetivo y alcance, 2) análisis de inventario, que ofrece una descripción de los flujos de materiales y energía dentro del sistema y su interacción con el medio ambiente, 3) evaluación de impacto, donde se detallan los resultados de cada indicador de impacto y 4) revisión crítica, análisis de sensibilidad y presentación de resultados (Muralikrishna & Manickam, 2017). El caso en el que Goulart Coelho & Lange (2018) aplicaron esta evaluación fue en el sistema de gestión de residuos municipales en Río de Janeiro, Brasil, donde se evaluaron ocho escenarios de gestión de residuos (un escenario es el que se desempeña actualmente y los otros siete son propuestas). La evaluación arrojó muchas inconsistencias en el sistema actual, por lo que es urgente implementar nuevas estrategias para un sistema sostenible. La estrategia de gestión de residuos más sostenible para la ciudad en términos de beneficios ambientales que mostró la LCA consiste en centrarse en la recolección de materiales separados y la recuperación de los mismos en lugar de incinerar o verter los desechos mezclados. Los hallazgos mostraron la

importancia de considerar las características específicas locales, por ejemplo, en Brasil la energía es renovable a partir de hidroeléctricas, lo que influye en que los resultados del LCA no conlleven a estrategias de generar energía a partir de residuos.

- Gestión integrada y sostenible de residuos: ISWM (*Integrated Sustainable Waste Managment*) es un modelo que permite estudiar los sistemas complejos y multidimensionales de forma integral. Fue desarrollado por asesores de WASTE y organizaciones de países en desarrollo a mediados de 1980. El modelo reconoce la importancia de tres dimensiones a analizar en un sistema de gestión de residuos: 1) Las partes interesadas, 2) las etapas del flujo de materiales desde su generación hasta el tratamiento y eliminación final y 3) los aspectos (llamados “lentes”) a través de los cuales se analiza el sistema (Guerrero et al., 2013).

#### **4. Casos empíricos del diseño de cadenas de abastecimiento inversas con perspectiva de la gestión de residuos**

Para lograr proponer un sistema efectivo de recolección y reutilización de las llantas en el que los costos sean mínimos, se requiere tener un concepto o marco de referencia de cómo ha sido la recolección de los agentes contaminantes en diferentes partes del mundo (papel, plástico, caucho, entre otros) teniendo en cuenta el lugar donde se desarrollan estas actividades y su contexto local.

Los países en desarrollo suelen tener un bajo porcentaje de recolección de los residuos, por ejemplo, Nigeria genera 32 millones de toneladas de residuos anuales y sólo entre el 20% y 30% es recolectado y son eliminados indiscriminadamente, obstruyendo canales, drenajes y contaminando los cuerpos de agua (Adeniran et al., 2017).

Los casos a continuación muestran diferentes técnicas para abordar el tema del manejo de residuos sólidos. Existen algunos casos en los que el manejo de residuos se desarrolla únicamente por medio de programas de prevención, campañas de información e incentivos financieros por parte del estado, como lo es el caso de CINVESTAV (Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional), que logró reducir en un 67% la masa de desechos que generaba gracias al impacto positivo que tuvo la implementación de un programa de manejo de recursos (Maldonado, 2006). En otros casos, se formulan modelos matemáticos para optimizar la recolección de los residuos de tal forma que se aumente el beneficio.

A continuación, en la Tabla 1 se resumen los datos más importantes sobre los casos empíricos, los cuales serán explicados a detalle posteriormente.

Tabla 1. Resumen de los casos empíricos.

Lugar	Residuo	Objetivo del modelo	Método	Autor (año)
Nardo, Italia	Residuos residenciales	Ubicación adecuada de sitios de recolección.	Modelo de programación matemática con enfoque heurístico.	G. Ghiani et al. (2014)
Kampala, África	Plásticos, polietileno suave, papel, textiles y metal	Optimización de las opciones disponibles en gestión de residuos y reducir la presión en el vertedero.	Integración de la logística inversa con el sector informal.	Kinobe et al. (2015)
Kolkata, India	Residuos sólidos municipales	Optimización de las rutas de recolección y transporte.	Programación de enteros mixtos con ayuda del TSP.	Das & Bhattacharyya (2015)
Turquía	Neumáticos	Maximizar el beneficio y minimizar el impacto ambiental en el sistema.	Programación interactiva de objetivos difusos.	Subulan et al. (2015)
Serbia	Electrodomésticos	Minimizar el costo total en los flujos directos e inversos.	Programación lineal mixta con múltiples productos.	Djikanovic & Vujosević (2016)
Europa	Residuos sólidos municipales	Determinar los sistemas de clasificación y recolección.	Sistemas regidos por legislaciones de la Unión Europea.	Bing et al. (2016)
Lagos, Nigeria	Residuos residenciales e institucionales	Estrategias para reducción y reciclaje.	Políticas de reciclaje	Adeniran et al. (2017)
Japón	Vehículo al final de su vida útil	Minimizar el costo de la red de suministro inversa.	Programación de enteros mixtos con parámetros difusos.	Phuc et al. (2017)
Teherán, Irán	Neumáticos	Maximizar la rentabilidad de la red logística.	Programación lineal de enteros mixtos (MILP).	Pedram et al. (2017)

Comas, Perú	Residuos generales y reciclables.	Minimizar el número de sitios de recolección.	Modelo de optimización matemática.	Gilardino et al. (2017)
-------------	-----------------------------------	---	------------------------------------	-------------------------

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1. Ubicación de sitios de recolección y zonificación, Italia (Ghiani, Manni, Manni, & Toraldo, 2014).

El objetivo de la investigación es ubicar sitios de recolección de residuos con contenedores en una zona residencial y luego zonificar el territorio de servicio, es decir, dividir el distrito para que cada zona sea servida por un solo vehículo de recolección y de tal forma las cargas de desechos no excedan las capacidades de los vehículos encargados de la recolección, problema para el cual se propone un modelo de programación matemática con enfoque heurístico. El modelo fue aplicado en la ciudad de Nardo, Italia, donde la producción de desechos per cápita es de 1,3 kg/día.

La finalidad fue evaluar el impacto que tiene la ubicación de sitios de recolección eficiente en la siguiente fase de zonificación, mostrando que al ubicar eficientemente los sitios de recolección se logran ahorros consistentes en la zonificación. Para lo primero, se tuvo en cuenta la compatibilidad entre los contenedores al asignarlos al sitio. Se entiende por compatibilidad entre dos contenedores el que su contenido de desechos pueda ser arrojado al mismo vehículo, por lo tanto, el objetivo principal es evitar ineficiencias por el hecho de que dos o más vehículos visiten un sitio de recolección determinado, debido a contenedores que no pueden ser descargados por el mismo tipo de vehículo. Para resolver el problema se formuló por separado cada fase, la ubicación de sitios de recolección y la zonificación.

##### a. Ubicación de sitios de recolección

Para la formulación de esta etapa el objetivo es minimizar el número total de sitios de recolección que se ubicarán. El modelo determina la cantidad óptima de ciudadanos asignados a cada sitio de recolección, así como la cantidad de canecas a ubicar, donde no se exceda la capacidad de las áreas de recolección y la distancia no supere el umbral determinado. Cada tipo de contenedor tiene una longitud, una capacidad y un vehículo (o conjunto de vehículos) que lo descargan. En este caso, un vehículo puede atender varios contenedores y un contenedor puede ser atendido por varios vehículos, lo que debe garantizarse es que dos contenedores que no se pueden descargar al tiempo en el mismo vehículo no se coloquen en el mismo sitio de recolección. El modelo se formula de la siguiente manera:

F.O.: minimizar el número total de sitios de recolección activados

Restricciones:

- Garantizan que los desechos dirigidos a un sitio de recolección no excedan su capacidad.
- El tamaño de los contenedores se ajuste a su ubicación.

- Los centroides (agrupación de ciudadanos asignados a un contenedor según su posición) se asignen exactamente a un sitio de recolección dentro de la distancia umbral y que sea el más cercano.
- Que no se usen más contenedores de los disponibles.
- Que no se coloquen en un sitio contenedores que no son compatibles entre sí.

Para este proceso se desarrolla un método heurístico rápido y eficiente para abordar las instancias reales y la dinámica de la heurística es la presentada a continuación:

En la primera fase, se comienza con una gran cantidad de sitios activados; luego, si es factible y representa una disminución en los costos, se empieza a eliminar un sitio a la vez. En primer lugar, cada centroide es asignado al sitio de recolección más cercano, el cual debe tener una capacidad mayor que la generación diaria de desechos del centroide y esta se calcula con la longitud. Para esta primera fase no se tiene en cuenta el objetivo de minimizar el número de sitios activados. Si las condiciones anteriores no se cumplen para un centroide en particular, el centroide no es asignado al sitio. Luego, se elimina un sitio de recolección temporalmente, asignando sus centroides a los sitios restantes. Si la operación es exitosa y se cumplen las condiciones, se repite de forma iterativa de tal forma que al finalizar la fase exista un subconjunto de sitios que se van a activar.

En la segunda fase, se escogen la cantidad y los tipos de contenedores que se asignan a cada sitio de recolección. Primero se verifica si, para cada sitio, un único contenedor  $k$  es suficiente para satisfacer la suma de los desechos producidos en los centroides asignados y si es compatible con los contenedores previamente asignados. Si la operación no es exitosa, se selecciona un tipo de contenedor  $k$  con la capacidad máxima disponible siempre y cuando sea compatible con los otros contenedores y se empieza a incrementar la cantidad de contenedores iterativamente hasta que la suma de las capacidades de estos sea mayor que el total de desechos que van a ser dirigidos.

#### b. Zonificación

Las zonas de recolección deben ser tales que la suma de las cargas de desechos sólidos de los sitios activados no exceda la capacidad de los vehículos que realizan la recolección. En esta actividad se formula el modelo de la siguiente manera:

F.O.: Minimizar el número de vehículos utilizados para realizar las operaciones y la distancia recorrida por cada uno.

Restricciones:

- La flota tiene una cantidad de vehículos de recolección heterogéneos.
- Cada vehículo  $f$  tiene un punto de partida o llegada donde debe iniciar o terminar su ruta y también una capacidad real de carga.
- Cada ruta tiene una duración máxima y un lugar donde termina que es donde finalmente descargan los desechos.

- Un vehículo  $f$  puede visitar un sitio si los desechos de los contenedores en este pueden cargarse en el vehículo.

Para resolver este problema se basa en el método paradigma de inserción más barato, donde se inserta de manera sucesiva a los clientes en las rutas, es decir, en cada paso se inserta un cliente. En este caso, para cada sitio de recolección para visitar se le asigna un vehículo que puede realizar esta tarea al menor costo adicional posible. La heurística está codificada en Java y los modelos matemáticos se resolvieron mediante IBM ILOG CPLEX 12.3.

Los resultados han demostrado la efectividad de los procedimientos propuestos: Con el enfoque heurístico se logra reducir el número de sitios de recolección activados entre un 12% y 18%, respecto al modelo anterior planteado por el mismo autor, donde la principal diferencia reside en la elección del tipo de contenedores. En la zonificación, y de nuevo basándose en el modelo anterior, se obtuvo una zona menos, es decir, se necesita un vehículo menos para realizar la recolección y la reducción de la distancia recorrida oscila entre el 19% y el 31%, lo que puede resultar en ahorros monetarios y disminución del impacto ambiental.

#### 4.2. Ciudad de Kampala, Uganda (Kinobe et al., 2015).

La ciudad de Kampala cuenta con un sistema de recolección y clasificación de residuos informal que comprende recolectores de basura, niños de la calle, cargadores de desecho y comerciantes a pequeña escala, donde en ocasiones se ven involucrados en actividades de recolección puerta a puerta de materiales como plástico, vidrio, metal y envases de bebidas con el fin de obtener dinero para su supervivencia. El vertedero de la ciudad recibe todos los residuos de esta, donde al final de cada día, los residuos que no se llevaron los recicladores son cubiertos por tierra y compactados.

La secuencia de pasos en la recolección de residuos en Kampala es como sigue:

- Previo al vertedero, los recolectores de basura y niños de la calle se mueven en hogares y contenedores de basura para buscar materiales que puedan vender a comerciantes o plantas de reciclaje, entre estos materiales están las botellas de plástico y de vidrio, metales y prendas de vestir.
- Los cargadores de residuos separan algunos materiales reciclables de los desechos en los vertederos temporales durante la carga a los camiones y los venden a recicladores a pequeña escala, agentes intermediarios o pequeños comerciantes.
- En el vertedero, los recicladores hacen clasificación con las manos, sin protección alguna y expuestos a riesgos de los materiales. Estos son sometidos a limpieza, lavado y secado, para posteriormente ser empacados y vendidos a los distribuidores.
- El transporte de los materiales (un factor muy importante para el éxito de un canal de distribución inversa) es usualmente realizado en ciclo, moto y, cuando son proporcionados por los comerciantes, en camiones. A partir de allí cada empresa de reciclaje es quien toma las decisiones sobre los residuos que se llevaron.

Existe una logística que se vio involucrada indirectamente llamada logística de terceros (3PL), que consiste en comerciantes y agentes que actúan como un enlace entre los recolectores, recicladores y las fábricas establecidas en la creación de canales de comercialización. Esto con el fin de que las empresas transfieran el riesgo que trae la recolección y clasificación de los residuos a terceros.

Basándose en la disposición a pagar por los materiales reciclables, se determinó la cantidad de desechos que abandonan o pueden abandonar el vertedero, entre ellos plásticos (31%), polietileno suave (37%), papel (12%), textiles (15%) y metal (5%). Estos generan alto flujo de dinero en el vertedero, a diferencia de los desperdicios de alimentos y el vidrio, puesto que no hay plantas dedicadas al reprocesamiento del vidrio y las actividades de compostaje e incineración demandan un alto costo operativo, por lo tanto, son enterrados y allí se termina su vida útil.

Los productos para reprocesar mencionados anteriormente representan un 14% del total entregado al vertedero, sin embargo, existe un 63% de productos potenciales a revertir que los recicladores omiten, dando finalmente un total de 77% de posibles productos a revertir. Un contratiempo presente en este caso es que la mayoría de los productos reciclables no llegan al vertedero, pues son clasificados antes por los recolectores, cargadores y niños de la calle.

La integración de la logística inversa en este vertedero tiene como fin optimizar las opciones disponibles en gestión de residuos y reducir la presión en el vertedero (Kinobe, Gebresenbet, & Vinnerås, 2012). Se propone hacer uso de las TIC para el desarrollo de sistemas de identificación y etiquetado de productos, por ejemplo, identificación por radiofrecuencia (RFID), que facilitaría el seguimiento de los productos además de hacerlo más rápido. También es necesaria la intervención gubernamental donde se integren cadenas de logística inversa con políticas relacionadas con el reciclaje.

#### 4.3. Optimización de las rutas de recolección y transporte de residuos sólidos municipales, India (Das & Bhattacharyya, 2015).

En India, según la complejidad del problema y las características de los desechos, se utilizan diferentes tipos de vehículos para la recolección y el transporte. Un sistema integrado de gestión de residuos puede mejorar el enrutamiento, el despacho, el mantenimiento y la gestión del vehículo. Esta investigación se centra en la recolección, la transferencia y el transporte de residuos sólidos generados en hogares, mercados, instituciones y oficinas hacia la planta de procesamiento o vertedero. Los siguientes factores influyen en la recolección y el transporte de residuos sólidos municipales:

- Cantidad de generación de desechos sólidos municipales.
- Número de recolectores de basura y su distribución heterogénea para cubrir toda la ciudad.
- Vehículos que corren desde y hacia las estaciones de transferencia donde se recoge la basura para llevar a la planta de procesamiento respectiva.

Para optimizar las rutas se propone utilizar el problema del vendedor viajero (TSP), uno de los esquemas más destacados en la optimización combinatoria y que consiste en que un vendedor

visite una vez y solo una vez cada una de  $n$  números de ciudades distintas, comenzando en una ciudad base y regresando a ella, donde el objetivo es encontrar el recorrido más corto posible.

Para empezar a formular el problema se tiene la siguiente información: En el sistema de gestión de residuos, hay  $n$  fuentes en diferentes lugares de una ciudad donde cada una genera cierta cantidad de desechos en un día. El sistema recoge estos residuos y los procesa a través de diferentes plantas. El objetivo principal es encontrar las rutas óptimas que minimicen los costos de recolección y transporte de desechos en el diseño del sistema de gestión de residuos.

El esquema propuesto divide el sistema integrado de gestión de residuos en cuatro fases distintas. En la metodología empleada para darle solución al problema se utiliza una técnica de optimización local para cada parte individual del problema, es decir, se soluciona fase por fase. El esquema descrito se encuentra optimizado y, por lo tanto, el costo total también. Cada una de las fases, y su solución, se describen a continuación:

Primera fase, recogida óptima de residuos desde el origen hasta el centro de acopio: El objetivo principal en esta etapa es minimizar el costo de la ruta de recolección de residuos donde cada recolector de desechos recoge los residuos desde distintas fuentes. Las restricciones aseguran que  $m$  cantidad de recolectores salen de una fuente inicial, visiten las demás fuentes y regresen al punto de inicio y también aseguran que cada fuente de residuos sea visitada por al menos un recolector de desperdicios. La solución consiste en que cada fuente se conecte a fuentes vecinas mediante al menos una ruta, se han señalado todas las posibles rutas de conexión entre ellas y por medio de la técnica de optimización se descubren las rutas más óptimas.

Segunda fase, transferencia óptima de los residuos desde el centro de acopio hacia la estación de transferencia: La transferencia se lleva a cabo en vehículos pequeños. La ruta optimizada entre el centro de acopio y de transferencia minimiza el costo de transporte de residuos. El objetivo en esta etapa es que los costos de viaje y de visita sean mínimos. Las restricciones garantizan que cada centro de acopio en la ruta tenga una ruta entrante y una saliente, que la demanda de cada centro de acopio sea cubierta, que no hayan sub-rutas y se definan variables binarias. En la solución la ubicación de los centros de acopio y las rutas se han seleccionado según el mapa existente y con el esquema propuesto se optimiza el transporte de los residuos desde el centro de acopio hacia la estación de transferencia.

Tercera fase, transferencia óptima desde la estación de transferencia hacia la planta de procesamiento: Las plantas se encuentran en las afueras de la ciudad, por lo que se usan vehículos pesados para su transporte. La longitud óptima de la ruta minimiza el costo de este transporte. El objetivo en esta etapa es minimizar la longitud del camino entre la estación de transferencia y la planta de procesamiento, así como minimizar los costos de viaje y visita. En esta etapa cualquier vehículo puede visitar más de una vez una estación de transferencia. Las restricciones aseguran que la demanda en cada estación de transferencia sea cubierta, que se visite cada estación y que no hayan sub-rutas. En la solución se ubican las rutas entre las estaciones de transferencia a través del estudio detallado de los mapas y se descubre la ruta óptima por medio del proceso de optimización.

Cuarta fase, transferencia óptima de residuos desde la planta de procesamiento hacia el vertedero: Para esta se disponen los residuos sin ningún costo debido a que, en un escenario de la vida real, estos desechos se usan para construcción de vías y, por lo tanto, contratistas de terceros se llevan el material de las plantas de procesamiento.

La combinación de los resultados proporcionados por las soluciones en cada fase muestra la forma óptima de recolección, transferencia y transporte de desechos. Los resultados se obtuvieron mediante la simulación en el software MATLAB para importar los datos reales y optimizar las rutas aplicando el TSP. Para la primera fase, la longitud total de la ruta es de 2947 metros y la longitud óptima es de 2009 metros. Si el tiempo de recolección es constante, se puede reducir el número de recolectores de desechos, que conlleva a una reducción del costo global de recolección de residuos sólidos urbanos. Para la segunda fase, la longitud de la carretera en área de estudio es de 19,89 kilómetros y la longitud óptima es de 12 kilómetros. La longitud óptima puede reducir el número de vehículos de transferencia de residuos y el tiempo de transferencia, reduciendo el costo total de transferencia de residuos sólidos urbanos. Para la tercera fase, la longitud de la carretera en área de estudio es de 106,26 kilómetros y la longitud óptima es de 58,33 kilómetros. Esta longitud puede reducir la cantidad de vehículos de transporte y reduce marginalmente el costo de transporte de los residuos sólidos urbanos.

Los resultados muestran que el esquema propuesto es capaz de reducir más del 30% de la longitud total de la ruta de recolección de desechos. Esta reducción de la longitud de la ruta en la recolección y el transporte de residuos determina un ahorro monetario constante en las operaciones de gestión de residuos.

#### 4.4. Industria del neumático, Turquía (Subulan et al., 2015).

En este estudio se examinan opciones de recuperación como la refabricación, el reciclaje y la recuperación de energía, presentando un enfoque holístico para coordinar un sistema integrado de gestión de neumáticos. El modelo tiene como objetivo maximizar el beneficio total de la cadena de suministro de circuito cerrado (*Closed Loop Supply Chain, CLSC*) y minimizar el impacto ambiental a lo largo del sistema. El objetivo principal del estudio es desarrollar un modelo de diseño de red multiobjetivo, multinivel, multiproducto y de período múltiple para una cadena de abastecimiento de ciclo cerrado de neumáticos.

Para cuantificar el impacto ambiental se emplea la metodología eco-indicador 99, un método de modelado de daños basado en la evaluación de ciclo de vida de un producto, en este caso, los neumáticos.

En la cadena de suministro directa, los neumáticos nuevos se envían a los centros de distribución, sin embargo, estos centros también reciben neumáticos reencauchados directamente enviados de empresas dedicadas al reencauche de estos. En la cadena de suministro inversa, un porcentaje de neumáticos usados se recoge de los usuarios al final de su vida útil y los usuarios los reemplazan por neumáticos nuevos con el distribuidor. Todos los neumáticos devueltos son inspeccionados: los que están en condiciones óptimas para el reencauche se llevan a las empresas pertinentes; y

los restantes, los desechados, se les puede dar distintos usos, tales como la recuperación de energía, reciclaje de materiales, relleno e incineración. Asimismo, las plantas que producen neumáticos pueden adquirir su materia prima de dos formas: 1) Comprando el caucho, acero y fibra a proveedores externos y 2) adquiriéndolo a través del reciclaje de neumáticos. Además, el granulado de neumáticos puede usarse para pavimentación de carreteras, campos deportivos, material para calzado y partes de automóviles (Panagiotidou & Tagaras, 2005) y los neumáticos de desecho se pueden usar para: reutilización directa, reencauche, reciclaje, recuperación de energía y eliminación (relleno o incineración).

Para aplicar el método eco-indicador 99 se consideran las fases de adquisición de materia prima, producción, distribución/transporte, uso, recolección al final de la vida útil, procesamiento al final de la vida útil, recuperación de energía, refabricación, reciclaje, almacenamiento y eliminación. El uso de neumáticos por parte de los usuarios finales no se toma en cuenta pues no tiene impacto en el modelo matemático propuesto.

Algunos de los supuestos del modelo son los siguientes:

- No está permitida la escasez o retraso en el modelo,
- Los parámetros de costos en todas las etapas de la CLSC no varían a lo largo del tiempo,
- No se consideran plazos de entrega de transporte entre etapas,
- Las demandas de los fabricantes de llantas nuevas y reencauchadas y las cantidades de neumáticos usados devueltos a través de los centros de recolección son conocidas y deterministas.
- Para los usuarios finales que dejan los neumáticos usados en el centro de distribución, las llantas nuevas se supone que van a tener un precio de venta más bajo.
- Se elige una sola tecnología de protección ambiental para cada planta de llantas nuevas.
- Solo las llantas de camiones y autobuses pueden ser reencauchadas.
- Las capacidades de transporte en cada etapa se calculan multiplicando el número de camiones disponibles por sus capacidades respectivas en masa (toneladas).
- El inventario inicial en las plantas de neumáticos nuevos, centros de distribución y de retorno es cero.
- Se aceptan índices específicos de incineración y vertimiento.

Para formular el modelo se tienen dos principales objetivos: Primero, maximizar el beneficio total en la red de ciclo cerrado, estos ingresos se maximizan vendiendo neumáticos nuevos, reencauchados, para la recuperación de energía y reciclados para otras aplicaciones. Los costos totales se deben a la apertura y operación de instalaciones, procesos de producción, compra del material, transporte, inventario, eliminación, refabricación, reciclaje, recolección, tecnología y aumento de capacidad de los módulos. El segundo objetivo es la minimización del puntaje total del eco-indicador 99, que significa un menor impacto ambiental.

Las restricciones garantizan que las cantidades de producción, refabricación y reciclaje con la tecnología seleccionada no superen las capacidades de las instalaciones; que se escoja una sola tecnología de protección ambiental; que se puedan calcular los niveles de inventario de cada tipo

de llanta y material en cada una de las instalaciones; que determinen las capacidades de almacenamiento de las plantas de neumáticos, centros de distribución y puntos de retorno; que la demanda de los comerciantes de cada tipo de llanta sea completamente satisfecha; que el flujo de la cantidad de llantas devueltas y la cantidad de llantas reencauchadas sea equilibrado; que el material reciclado que se trabaja en las plantas de neumáticos y se vende a terceros no exceda la totalidad de material obtenido; que hayan unos niveles mínimos de rendimiento en las plantas; que se consideren las capacidades de los vehículos que salen de las plantas de neumáticos nuevos, centros de distribución, distribuidores de neumáticos, centros de recolección, puntos de retorno, empresas de reencauche e instalaciones de reciclaje de neumáticos; entre otras.

Para desarrollar el modelo se tienen en cuenta las condiciones de la red en Turquía, las cuales son:

- Tiene dos plantas de neumáticos nuevos.
- Cuatro sitios potenciales para centros de distribución, veinte distribuidores de neumáticos.
- Cinco centros de recolección iniciales.
- Cuatro sitios potenciales para puntos de retorno centralizados.
- Tres ubicaciones potenciales para compañías de recauchutado de neumáticos.
- Dos sitios potenciales para instalaciones de reciclaje de neumáticos.
- Dos hornos de cemento como centros de recuperación de energía.
- El período de planificación es de un año.
- Se pueden utilizar tres tipos de vehículos con distintas capacidades, costos e impactos ambientales.
- Hay tres tipos de tecnología de protección ambiental disponible.

El modelo determinístico fue ejecutado con un solucionador de programación de enteros mixtos, ILOG OPL Studio versión 6.3 incluyendo el producto CPLEX 12.1.0 para la primera función objetivo (maximización de ganancias totales) y la segunda (minimización del puntaje total eco-indicator 99) por separado como un único modelo de programación entero objetivo, arrojando los siguientes resultados: En las fases de refabricación y reciclaje se obtienen ganancias ambientales, al igual que la recuperación de energía. Para las tecnologías de protección ambiental, el nivel de avance es proporcional al costo, la tecnología 3 es la más avanzada. Para el transporte, el tipo de camión con capacidad de 40 toneladas es más costoso, pero más amigable con el medio ambiente. La recolección al final de la vida útil, acumular llantas de desecho con los centros de recolección inicial es la forma más costosa y contaminante. Para el almacenamiento, aumentar la capacidad del módulo aumenta el daño ambiental. En la eliminación, el vertedero causa más daño que la incineración y depende del tamaño de la llanta. Adicionalmente, se abrieron dos centros de distribución y una empresa de reencauchado.

Ahora bien, cuando se aplica un enfoque interactivo de programación de objetivos difusos se tiene que: Los mayores costos se dan por concepto de apertura total, operación de las instalaciones, costos de producción, transporte y reencauche. El transporte, la recolección y la producción tienen un alto impacto ambiental, sin embargo, el reciclaje y la refabricación tienen impactos positivos.

En esta solución se abre una empresa de reencauchado, dos centros de distribución, tres puntos de retorno y dos instalaciones de reciclaje de llantas

Finalmente, por medio del método experimental de Taguchi se hacen un análisis de sensibilidad, donde lo primero a tener en cuenta son los factores controlables que afectan los dos objetivos del problema: las tasas de neumáticos devueltos, el número de camiones, la fracción de las llantas que se incineran y el precio unitario de materiales reciclados para vender a terceros. Posteriormente se determinó que, a excepción del precio de venta de los materiales reciclados, los demás factores no influyen mucho en el beneficio total de la cadena, por el contrario, los demás factores influyen altamente en el impacto ambiental a excepción del precio de venta. Los principales factores con efectos en el beneficio total de la CLSC son el precio de los materiales reciclados y el número de vehículos; asimismo, el número de vehículos y la tasa de devolución son los factores con mayor efecto en el medio ambiente. El beneficio total disminuye cuando la tasa de retorno y la de incineración aumentan de forma simultánea. Sin embargo, el beneficio aumenta cuando la tasa de retorno alcanza el nivel máximo, pero no hay alteraciones en la fracción de incineración. Por otro lado, cuando el número de vehículos y la tasa de retorno aumentan simultáneamente, el beneficio total aumenta y, de forma similar, si se disminuye el número de vehículos y el precio de los materiales reciclados se obtiene una configuración más amigable con el medio ambiente.

#### 4.5. Compañía de electrodomésticos, Serbia (Djikanovic & Vujosević, 2016).

Los dispositivos eléctricos y electrónicos contienen en ellos sustancias peligrosas, como el plomo, el berilio, entre otros. Sin embargo, son productos con altas posibilidades de reciclaje y reutilización debido a las múltiples partes y tecnologías con las que cuenta cada uno.

El trabajo de logística inversa que está realizando esta empresa consiste en recopilar los dispositivos que han llegado al final de su vida útil, los cuales se obtienen de los clientes que ya no quieren utilizarlos y los devuelven al centro de consumo. Al final del ciclo de vida, los productos son devueltos por los usuarios al centro de atención al cliente y luego enviados a un depósito para el desmontaje de los productos devueltos, donde se clasifican en dos grupos: los que pueden repararse y por lo tanto son devueltos al fabricante y los que no pueden repararse que son enviados a un centro de eliminación, tal y como se muestra en la Ilustración 2:

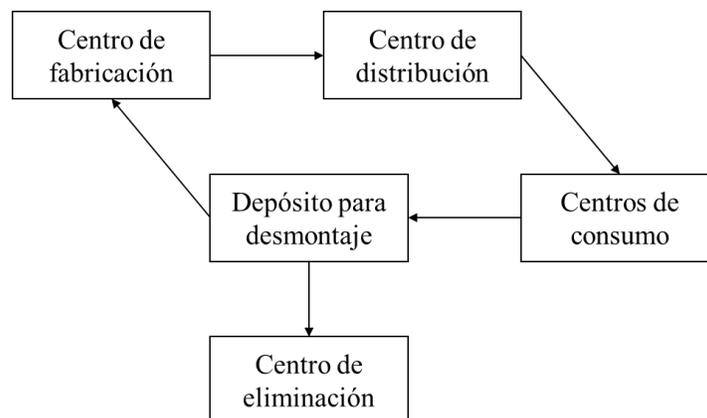


Ilustración 2. Sistema de logística de circuito cerrado implementado por empresa serbia de electrodomésticos

Fuente: Djikanovic & Vujosević (2016).

La formulación del modelo integrado de logística directa e inversa se desarrolla como un modelo de programación lineal mixta con múltiples productos, donde la función objetivo minimiza el costo total en los flujos directos e inversos.

Para el transporte se consideran 15 vehículos con capacidades entre 310 a 350 productos por vehículo. El transporte influye en la contaminación y sus costos deben reducirse a un nivel aceptable. De lo contrario, el transporte y sus costos entran en conflicto con la motivación de la recuperación. Por lo tanto, los costos de transporte ocupan un lugar muy importante en el flujo de logística inversa.

Otros costos que se tienen en cuenta son los costos de nuevas instalaciones, de envío y procesamiento, así como los costos de penalización si los productos no se entregan. Los costos de operación incluyen costos de realizar diferentes procesos en todas las instalaciones. Cabe resaltar que se asume que la recuperación de productos se realiza en el centro de fabricación.

Este modelo matemático es resuelto mediante el uso de la herramienta informática CPLEX *solver*. La solución arrojó que:

- El porcentaje de productos que los consumidores devuelven varía desde el 10% hasta el 35%.
- Los porcentajes de los productos que se entregan en el centro de eliminación varían del 5% al 15% del número total de productos.
- El valor óptimo para la función objetivo varía de 2.709.851,75 hasta 3.133.050,84 unidades monetarias con diferentes porcentajes de productos devueltos y eliminados.
- Se debe abrir un centro de eliminación nuevo si el porcentaje de productos eliminados llega a aumentar del 5% al 10%, pero si pasa del 10% al 15% no será necesario.
- El valor de la función objetivo es muy sensible a los cambios en la demanda.

Una limitación detectada es la velocidad de operación de la herramienta, la cual disminuye al adicionar variables y restricciones o al incrementar la complejidad del sistema.

#### 4.6. Sistemas de gestión de residuos en países de la Unión Europea (Bing et al., 2016).

La red de reciclaje estudiada en esta investigación incluye procesos de recolección, separación, clasificación y reprocesamiento. Sólo se tienen en cuenta procesos de reciclaje y no se incluyen productos químicos o electrónicos.

El proceso utilizado es el siguiente: en unas ocasiones la separación de los residuos se hace en el punto de recolección y en otras, los residuos se recogen y envían al centro de separación. Luego, el desecho es enviado a un centro de clasificación, donde se clasifican los materiales por composición y/o color. Los centros de *cross-docking* son los lugares en donde se realiza el transbordo y empaque de los desechos. Los desechos clasificados se envían a instalaciones de tratamiento especializadas para transformarlos para reciclar. El uso de las instalaciones de tratamiento varía según el país, por ejemplo, países como Alemania, el Reino Unido y Portugal tienen sus propias instalaciones de recuperación de materiales domésticos (clasificación y otros

tratamientos), mientras que países pequeños como los Países Bajos tienen la mayor parte del proceso de clasificación realizado en las instalaciones de los países vecinos.

Para la recolección se presentan dos tipos de ubicación de recolección de los desechos sólidos urbanos: En el borde de la acera y en puntos centrales donde las personas deben ir a depositar sus desechos. Respecto al método de recolección existen tres esquemas comunes: 1) Separación en las aceras en diferentes compartimientos de un vehículo especializado. Este método suele modelarse como un problema de enrutamiento de arco, donde cada arco en el gráfico debe visitarse para permitir la recolección de residuos en todas las calles de la ciudad; 2) se recoge el material en un vehículo de un solo compartimiento y la clasificación se realiza en una instalación específica y 3) los habitantes reciben dos contenedores y se les pide que en uno coloquen papel y cartón y en el otro plásticos, vidrios y latas los cuales al ser recolectados se mantienen separados en un camión de dos compartimientos. Puntos importantes por considerar son la cantidad de flujos de desechos que se recolectan en una misma ruta y las frecuencias de recolección de un sitio a otro.

La investigación mostró tres principales oportunidades de estudio futuro desde distintas perspectivas para los sistemas de gestión de residuos:

- Múltiples dimensiones: El manejo de los residuos no se puede ver desde una única perspectiva puesto que muchos problemas están interrelacionados (por ejemplo, las preocupaciones ambientales y sociales), esto indica una integración de varias disciplinas en el modelado del reciclaje de residuos sólidos urbanos.
- Visión holística: El reciclaje de los residuos es un problema mundial donde se exportan residuos entre continentes, por lo tanto, los residuos se deben considerar como recursos globales y que, así como la globalización económica crea oportunidades, la globalización ambiental también lo hace.
- Solución a medida: Para cumplir la demanda y expectativas de mejorar la eficiencia y sostenibilidad de las redes de reciclaje de residuos municipales, se debe adaptar una solución para cada tipo de residuo, comprendiendo las características de cada uno.

#### 4.7. Universidad de Lagos (Unilag), Lagos, Nigeria (Adeniran et al., 2017).

Las instituciones académicas tienen la obligación moral de ser líderes en movimientos para la protección del medio ambiente. Una gestión adecuada de los residuos no sólo es un beneficio financiero para la institución, sino también propone un modelo a seguir para la comunidad, pues las prácticas adoptadas por las instituciones tienen potencial de ser adoptadas por las comunidades cercanas. En los países desarrollados, los programas de manejo de residuos en las instituciones académicas comenzaron hace más de 30 años (Armijo de Vega et al., 2008).

Un ejemplo de implementación de sistemas de gestión de residuos es la Universidad de Lagos en Nigeria, la Universidad cuenta con un sistema de recolección que divide la Universidad en cuatro zonas (A, B, C y D). Un gestor de residuos se encarga de la zona A y B y otro de la C y D. Los desechos se disponen al centro de clasificación de la Universidad donde cada gestor clasifica los

desechos reciclables y los transfiere a la compañía recicladora. Los que no son reciclables se eliminan. La generación diaria de residuos se determinó midiendo la dimensión de cada camión de desperdicios al 90% de su capacidad. En la Ilustración 3 se muestran las proporciones del material recolectado en la Universidad durante el año 2016.

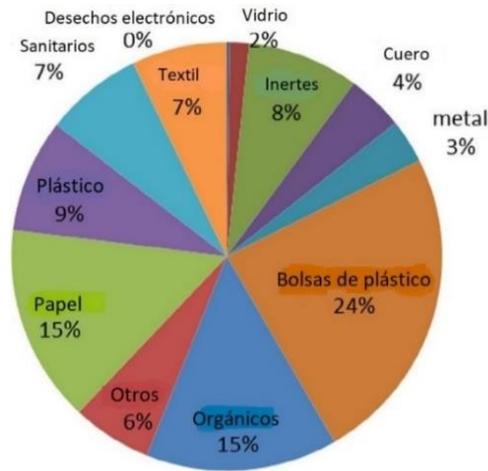


Ilustración 3. Proporción de los residuos generados durante un año en la Universidad de Lagos.  
Fuente: Adeniran et al. (2017).

El estudio determinó que los residuos de la Unilag tienen un potencial de reciclaje del 75% y menos del 1% (0,74%) se está recuperando, el resto es enviado al vertedero. De estos residuos, el 15% son desechos orgánicos y la Universidad plantea como estrategia comenzar su propia unidad de compostaje que, de paso, impulsa el compromiso del gobierno federal con la agricultura. Las bolsas plásticas y el plástico son generados por el consumo de agua en bolsa, por lo tanto, la estrategia de la Universidad es promover el consumo de agua del dispensador y desalentar el consumo de agua en bolsa haciéndola más costosa.

Para ser una institución académica hay un bajo volumen de desechos de papel (15%). Esto debido al esfuerzo de la Universidad para reducir la utilización del papel con la introducción de una política sin papel, esto es, que la mayoría de los registros se realizan en línea por medio de dispositivos electrónicos.

La Universidad además de implementar políticas que evitan la creación de desechos innecesarios por medio de su eliminación en la fuente, también incentiva el reciclaje por medio de la facilitación de bolsas con códigos de color para los residentes a un bajo costo de tal forma que los residuos sean clasificados inmediatamente después de su uso o consumo.

#### 4.8. Vehículos al final de su vida útil, Japón (Phuc et al., 2017).

En Japón se estima que se desechan 5 millones de vehículos anualmente (Sakai, Noma, & Kida, 2007). Para este caso de estudio, Phuc et al. (2017) proponen modelar el problema con un modelo de programación entera mixta dándole un enfoque difuso. El enfoque difuso para modelar

cadena de suministro inversas ha surgido como un candidato potencial debido a la flexibilidad en el manejo de varios tipos de incertidumbres. La tasa de devolución, la calidad de los productos desechados, las opciones de recuperación, entre otros, son aspectos que requieren un enfoque difuso debido a su ambigüedad, falta de datos históricos y su interdependencia.

La forma en la que funciona el sistema de disposición de los vehículos es la siguiente: Cuando un vehículo llega al final de su vida útil, es enviado al centro de inspección donde se le realiza la prueba de calidad. Los vehículos que pasan la prueba de calidad son trasladados a los centros de reparación para su reprocesamiento y son entregados a mercados de vehículos usados. Los que no pasan la prueba de calidad, son enviados a los centros de desmantelamiento y se desarman allí. Al final de este proceso, los artículos se clasifican en: componentes reutilizables, artículos que se tratan en centros de trituración y residuos peligrosos.

Los componentes reutilizables se devuelven a los centros de inspección: los que pasan la prueba son distribuidos a mercados de piezas usadas; los que no, se transfieren a centros de trituración. En los centros de trituración se llevan a cabo operaciones como separación, clasificación ferrosa, entre otros. Los materiales que no requieren procesos químicos se venden al mercado de materiales usados; de lo contrario, se deben procesar en un centro de tratamiento químico. Los residuos peligrosos son enviados a instalaciones donde son procesados para luego ser desechados en los vertederos.

El modelo propuesto tiene como objetivo minimizar el costo total de toda la red de suministro inversa, incluida la apertura fija, el transporte variable y los costos de procesamiento para el cual se tienen en cuenta las suposiciones:

- El modelo es una red de cadena de suministro inversa de varios niveles.
- Las ubicaciones de vehículos usados, partes usadas y mercados de materiales y vertederos están predeterminadas.
- Las capacidades de las instalaciones son limitadas.
- El costo de transporte es proporcional a la cantidad de entrega y la distancia de viaje.
- Se supone que las tasas de retorno se predicen sobre la base de datos históricos de ventas.
- Los mercados materiales tienen una demanda ilimitada.

En los problemas de programación de enteros mixtos, la estabilidad de las soluciones es un reto y es muy difícil realizar los análisis de las posibles combinaciones. Para obtener resultados más estables se sugirió aplicar un enfoque de optimización basado en la simulación a este problema. Una vez se realiza de esta forma el modelo y se toman decisiones para el diseño de la red, las decisiones de planificación táctica (flujo entre instalaciones) se optimizan en función de cada período de tiempo.

#### 4.9. Empresa de neumáticos, Irán (Pedram et al., 2017).

El objetivo de este caso es determinar una red logística de máxima rentabilidad que satisfaga la demanda de neumáticos reencauchados y nuevos. La empresa desea desarrollar una red de logística inversa y reencauchado para las llantas de camiones, con el fin de reducir costos y

aumentar el nivel de servicio. La compañía tiene 3 plantas de producción, 10 centros de distribución regionales y 40 puntos de entrega agregados.

El modelo vincula la cadena de suministro directa con rutas de logística inversa, la cual tiene centros de recolección, reencauchado y reciclaje. Se considera la incertidumbre ligada a la demanda y recolección de los productos devueltos, además de considerar incertidumbres ambientales.

En la cadena de producción, los manufactureros producen distintos tipos de llantas que son enviadas a los centros de distribución. Estos centros de reciben llantas nuevas de la planta de fabricación y también llantas reencauchadas de los centros de reencauche. Ambos tipos de neumático son enviados desde los centros de distribución hasta los clientes. Una parte de la demanda (los neumáticos usados) se recoge de los clientes y se envía a los centros de recolección. Los productos usados recolectados en las tiendas minoristas se envían al centro de recolección. Los productos que pasen el control e inspección de calidad en el centro de recolección se envían al centro de reencauchado, mientras que el resto se envían al centro de reciclaje. En el centro de reencauchado las llantas se reacondicionan para ir al centro de distribución. La Ilustración 4 expone de forma general el sistema que se propone y describe anteriormente.

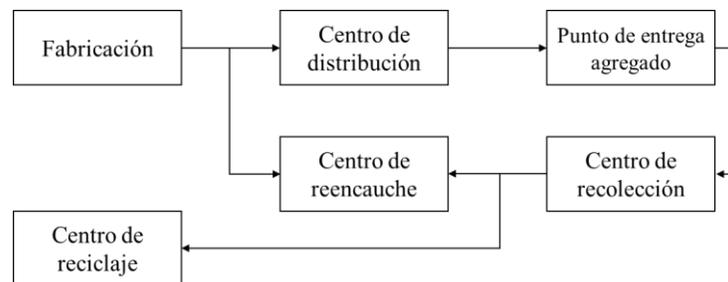


Ilustración 4. Propuesta de cadena de suministro de circuito cerrado.

Fuente: Pedram et al. (2017).

El modelo de programación lineal entera mixta propuesto determina la cantidad óptima de centros de distribución, recolección, reencauchado y reciclaje. Para superar el problema de la incertidumbre se desarrolla un modelo que considera tres escenarios: el optimista, el más probable y el pesimista. La formulación del problema se realiza de la forma a continuación.

F.O.: maximizar los beneficios, lo cual se calcula restando el costo total (suma de costos de apertura de instalaciones, costos de transporte, costos de fabricación, costo de distribución, costo de recolección, costo de reencauchado y costo de penalización por demanda insatisfecha) de los ingresos totales.

Restricciones:

- Límites de capacidad de todos los centros.
- Garantizar que el cliente reciba lo que demanda.
- Conservar el equilibrio en los flujos.
- Asegurar que la cantidad de producción no sea un valor negativo.

Además, se tienen en cuenta los siguientes supuestos:

- Los manufactureros tienen una capacidad de producción limitada.
- Está dada la capacidad de los centros de distribución, recolección, reencauchado, reciclaje y minoristas.
- Está dada la demanda de productos nuevos.
- Se identifican las tasas de recolección, reciclaje y manufactura.
- La ubicación de los fabricantes, los centros de distribución, los minoristas, los clientes, los centros de recolección, los centros de reencauche, los centros de reciclaje, está fija y predeterminada.
- Las llantas sólo pueden reencaucharse una vez.

Los costos de fabricación, del centro de distribución, del centro de recolección y reencauchado son proporcionados. Entre los costos del centro de reencauchado, la inspección es una fuente importante de costos, pues los neumáticos deben revisarse antes y después del proceso. Los modelos se ejecutaron a través del software de optimización GAMS rev 140, que incluye la producción de CPLEX.

Resultados: el resultado muestra que, para tener una configuración de red óptima, algunas instalaciones deben cerrarse. Cuando la capacidad del centro de distribución aumenta, el valor de la función objetivo aumenta y la cantidad de instalaciones abiertas disminuye. La misma situación se observa para los centros de recolección y que una alteración en el costo de transporte tiene un efecto significativo sobre el valor de la función objetivo, con una reducción del 20% en el costo de transporte, el valor objetivo aumenta alrededor del 3%.

#### 4.10. Recolección de residuos en Comas, Distrito de Lima, Perú (Gilardino et al., 2017).

Los países en desarrollo son los que cuentan los problemas más críticos de gestión de residuos debido a la falta de recursos económicos y mano de obra calificada. En Perú, solo el 42% del territorio se beneficia de los planes de gestión de residuos, además, estos sistemas no son eficientes y existe también un déficit en vertederos sanitarios certificados.

En Perú, la generación de desechos per cápita es de 0,54 kg/día (sólo en los hogares, se excluyen industrias, mercados y limpieza de calles) y para la investigación fue necesario pronosticar la generación per cápita para el horizonte temporal del estudio, basado en el crecimiento poblacional. Actualmente, en Comas los desechos son recogidos puerta a puerta, a diario y sin clasificar. Un total de 18 camiones compactadores realizan esta labor. Se estimó una distancia total recorrida de 431 km/día por camión. El servicio es provisto por una empresa privada que cobra 33 USD por tonelada métrica. El objetivo de esta investigación fue instalar el mínimo número posible de sitios de recolección.

La formulación del modelo propuesto para los sitios de recolección se planteó bajo las siguientes condiciones:

- Agrupamiento y distancia máxima: La ubicación de las unidades de eliminación de desechos es un problema que se puede resolver agregando la demanda, por lo tanto, se agruparon las viviendas considerando un rango de 40 a 70 m (entre mayor densidad de viviendas, menor rango de agrupamiento). A partir del centroide de este sector, se instaló un sitio de recolección a 200 m de distancia.
- Contenedores considerados: Solo fueron considerados contenedores de carga trasera, los sitios de recolección de residuos generales y reciclables se ubican por separado debido a la cantidad per cápita que se produce de cada uno, siendo considerablemente mayor la producción de residuos generales. Los residuos reciclables para este estudio fueron: papel, vidrio, latas y plástico. Se asume una recolección diaria de los residuos generales y para los reciclables se formula así: el papel se recoge tres veces por semana y el resto de residuos dos veces. En cada sitio se considera tener dos, tres o cuatro contenedores de 1100 litros para residuos generales y dos o cuatro contenedores de 800 litros para residuos reciclables.
- Supuestos metodológicos: El área del distrito se divide en 9 parcelas diferentes (teniendo en cuenta una extensión total de 48,7 km<sup>2</sup> que tiene el territorio).
- El modelo matemático busca garantizar que un grupo de ciudadanos siempre se asigne al sitio de recolección más cercano. La función objetivo minimiza la cantidad total de sitios de recolección. Las restricciones buscan, entre otras cosas, y para cada tipo de contenedor: 1) Que cada grupo quede asignado a un solo sitio de recolección, 2) limitar la capacidad de los contenedores, 3) que los ciudadanos caminen lo menos posible, es decir, minimizar distancia recorrida y que esta distancia sea igual o menor a la distancia máxima específica, teniendo en cuenta el índice de variación.

La formulación del modelo propuesto para las rutas de recolección se planteó bajo las siguientes condiciones:

- Supuestos metodológicos: para recoger los residuos generales, se considera una velocidad promedio de 20 km/h por camión, el tiempo de servicio varía según el número de contenedores en el sitio, se considera una capacidad de 20 m<sup>3</sup> y un porcentaje de ocupación máximo del 95% y, finalmente, dos turnos diferentes de ocho y doce horas. En este distrito los vehículos no motorizados son la forma actual como se recogen los residuos reciclables, por lo tanto, se asumió de esta forma, con una velocidad promedio de 8 km/h, una capacidad de 6 m<sup>3</sup> y dos turnos de ocho horas por día.
- Enfoque heurístico: al VRP se le agrega una restricción: tiempo límite para cada vehículo para visitar a los clientes. Lo anterior se codifica en el *software* Matlab.

Se utilizó la evaluación de ciclo de vida LCA para comparar los impactos ambientales del sistema de gestión de residuos actual con el propuesto. Los datos requeridos fueron obtenidos por medio de entrevistas a los gestores de residuos.

El modelo de optimización se resolvió utilizando el lenguaje AMPL y el solucionador IBM ILOG CPLEX 12.6. La solución arrojó que para las 9 localidades se deben instalar 2334 contenedores de residuos generales y 1262 de residuos reciclables.

Para los residuos generales se obtuvieron 13 rutas de recolección, con 7 camiones para atender estas rutas en cada turno y un total de 254 km recorridos para los 7 camiones, lo que arroja una reducción del 41.1% en comparación al escenario actual.

Para los residuos reciclables el algoritmo calculó 6 rutas para recolección del plástico, 7 para latas y 7 para vidrio, que se realizan dos (2) veces por semana. Para el papel se calculan 7 rutas que se realizan tres (3) veces por semana.

La evaluación de impactos ambientales muestra mejoras sustanciales en las emisiones al aire, especialmente emisiones de gases de efecto invernadero que se reducen en casi 14%. El análisis de sensibilidad muestra que el impacto ambiental aumenta cuando las distancias recorridas son mayores y si los camiones requieren mayor mantenimiento.

Este modelo ha demostrado ser una base interesante para pasar a un sistema de contenedores, pues se observan ganancias ambientales en la mayoría de categorías de impacto. La investigación permitió minimizar el número de sitios de recolección usando la capacidad disponible de contenedores, satisfaciendo la distancia máxima para los ciudadanos al sitio de recolección y minimizando la distancia recorrida por los camiones compactadores, reduciendo la cantidad de estos en más de la mitad. El enfoque heurístico permite desarrollar escenarios alternativos para la ubicación de sitios de recolección variando los parámetros, por ejemplo, la generación de desechos per cápita o la densidad de los residuos.

## **5. Aspectos relevantes de la gestión de residuos en el diseño de una cadena dedicada a la recuperación de llantas usadas**

A continuación, se muestran los aspectos que se deben tener en cuenta según algunos autores que han dedicado su investigación a esta temática.

También se incluyen algunos que se dedujeron a partir de los casos empíricos que fueron estudiados para esta investigación. Los factores que se muestran a continuación son factores influyentes en cualquier sistema de gestión de residuos sin importar el material del que se trate, es decir, estos aspectos pueden afectar positiva o negativamente una cadena de abastecimiento de llantas usadas.

Estudios demuestran el impacto de las múltiples perspectivas y factores que se consideran en cualquier decisión que se tome respecto al tema de manejo de residuos, como lo son factores demográficos como la edad, el tamaño del hogar y el nivel de educación (Tadesse, Ruijs, & Hagos, 2008).

### **5.1. Según las etapas de la recolección del sistema de gestión de residuos**

Guerrero et al. (2013) realizaron una investigación en la que, además de hacer una extensiva revisión literaria, se logró por medio de investigaciones y entrevistas encontrar los factores que más afectan e influyen en el sistema de gestión de residuos en los países en desarrollo, donde

encontró una gran brecha en comparación a la situación de los países desarrollados. Cada etapa del sistema de gestión de residuos tiene limitantes que se muestran a continuación:

- **Generación y separación:** El conocimiento limitado sobre tecnologías y buenas prácticas, falta de equipos para la recolección de materiales seleccionados y ausencia de tomadores de decisiones son factores que obstaculizan el desarrollo de programas de separación de residuos. La separación mejora cuando hay campañas de sensibilización, cuando los recicladores pagan por recoger los materiales reciclables, y finalmente, cuando los ciudadanos comparten la responsabilidad con el municipio en la toma de decisiones sobre la gestión de residuos. Los tres componentes más importantes son: 1) conciencia de los ciudadanos y líderes municipales, 2) conocimiento de tecnologías nuevas y buenas prácticas y 3) disponibilidad de equipos y maquinaria.
- **Recolección, transferencia y transporte:** Se ve afectado por sistemas inadecuados de recolección, mala planificación de rutas, falta de información sobre el calendario de recolección, infraestructura insuficiente, caminos pobres y número de vehículos para recolección de residuos. Se encontraron dos dimensiones, cada una representando diferentes factores: 1) apoyo del gobierno central y local, los proveedores de servicios y el apoyo de los usuarios al sistema son elementos clave para la eficiencia de esta etapa y 2) infraestructura que, en general, los municipios son responsables de la infraestructura y los equipos necesarios para llevar a cabo esta etapa. La mejora de la infraestructura afecta positivamente la eficiencia del sistema.
- **Tratamiento:** La falta de conocimiento de los sistemas de tratamiento por parte de las autoridades es un factor que afecta el tratamiento de los desechos. También los sistemas ineficientes de recolección de residuos promueven a que las personas encuentren soluciones independientes para sus residuos, como la quema doméstica y compostaje. Sin embargo, muchas instalaciones de compostaje han sido cerradas por el mal monitoreo de la calidad del compost y la incompatibilidad de la planta con los residuos. Ambos factores son debido al conocimiento e infraestructura.
- **Reciclaje:** Los factores sociales, altruistas y reguladores, la corta distancia desde el hogar hasta los contenedores de reciclaje, son factores que hacen que algunas comunidades desarrollen mejores prácticas de reciclaje. Además, existen más probabilidades de contar con la participación de los ciudadanos cuando estos reciben información de los beneficios del reciclaje, cómo clasificar los desechos y cómo participar en el diseño de los programas. El éxito del reciclaje también depende de la eficiencia de los equipos e infraestructura.
- **Disposición final:** Se ve afectada también por la larga distancia entre el hogar y los contenedores, causando que los residuos sean botados en áreas abiertas y recursos financieros insuficientes en los rellenos sanitarios. También es muy influyente el interés de los líderes municipales o tomadores de decisiones en asuntos ambientales. El suministro de equipos e infraestructura son factores esenciales para la eficiencia del sistema además de la existencia de un marco legal efectivo.

Finalmente, añade que todo el sistema de gestión de residuos se puede ver favorecido por factores como la participación del sector privado para mejorar la eficiencia, apoyo de las

autoridades municipales y desarrollo de planes estratégicos que permitan monitorear y evaluar el sistema.

### 5.2. Según la ubicación donde se desarrolle el sistema

En la investigación realizada por Bing et al. (2016) se encontraron factores que influyen altamente en el sistema de recolección de residuos en los países de la Unión Europea pero que, sin embargo, pueden influir en cualquier país del mundo:

- Factores externos: Las regulaciones sobre tratamiento de residuos son el principal impulsor que ejerce presión sobre los países para que transfieran los rellenos sanitarios al reciclaje y a la reutilización. Para alcanzar los objetivos, los impuestos son utilizados como incentivos en muchos países para promover el reciclaje y cubrir costos de recolección y tratamiento. La demanda de materiales impulsa el mercado de productos reciclados, el precio que se paga por estos es muy importante para la competitividad de las iniciativas de reciclaje y es un aspecto que requiere mayor atención.

Por otro lado, para (Kayakutlu et al., 2017) las actividades que se realizan para la recolección de los residuos varían según el tamaño de la ciudad, sin embargo, existen criterios que se tienen en cuenta para poner en marcha un sistema de manejo de residuos, tales como:

- Factores económicos, donde se incluyen los costos de la puesta en marcha de la instalación y los costos totales de implementación.
- Factores sociopolíticos, que pueden ser referentes a la oportunidad de empleo que genere el sistema y la aceptabilidad social, ya que es esencial el apoyo de los ciudadanos.

### 5.3. Según las estrategias de planificación

Para Bing et al. (2016) además de los factores que son influidos por la ubicación directamente existen unos más enfocados al diseño y planificación, es decir, aspectos más técnicos como el diseño de red y la planificación de la recolección:

- Diseño de red (decisión estratégica): En este aspecto influye la ubicación de las instalaciones, así como su capacidad y la cantidad de estas. Se relaciona con el proceso de separación y clasificación de los materiales. El diseño de la red debe ser capaz de adaptarse y ajustarse a los requisitos de cada material a manejar y los materiales a manejar juntos.
- Planificación de la recolección: La unidad organizativa de recolección afecta el diseño del enrutamiento, así como el proceso de recolección. El método de separación de los residuos y la asignación de los puntos de recolección, son factores importantes que deciden el tipo de camión a utilizar. Asimismo, los camiones que se usan dependiendo de sus compartimientos, marcan la diferencia en el enrutamiento y la programación de la recolección de los desechos.

Kayakutlu et al. (2017) plantea también dos factores que cualquier ciudad, sin importar su avance tecnológico, debe considerar a la hora de planificar un sistema de gestión de residuos:

- Factores técnicos, que hacen referencia a la implementación tecnológica necesaria para llevar a cabo de forma efectiva el sistema.
- Factores ecológicos, donde se evalúa qué tanto se disminuye el nivel de contaminación al desarrollar el sistema. Los residuos por reciclar deben ser maximizados.

#### 5.4. Consideración de la incertidumbre

En casos reales, siempre está presente la incertidumbre en variables aleatorias como lo es la oferta y la demanda y en el proceso de producción (el rendimiento de las operaciones y tiempos), la eficiencia de los procesos de tratamiento, la tasa de degradación de los desechos, pero la variable principal con la que se asocia la incertidumbre es la composición de los desechos (Cobo et al., 2017). Por eso es recomendable desarrollar un modelo de gestión de residuos sólidos municipales de logística inversa que gestione las interacciones entre la planificación del transporte, características del inventario y planificación de la producción, todo lo anterior considerando la incertidumbre en el sistema. Para un caso real, ignorar estas incertidumbres en la toma de decisiones puede aumentar los costos operacionales y de transporte debido a la adición de cargas extras en las áreas de procesamiento de información, comunicación y coordinación (Zhang et al., 2011). Aunque la incertidumbre ha sido investigada relativamente en pocos casos, Subulan et al. (2015) propone que el desarrollo de los modelos con incertidumbre son una tendencia futura.

En general, la mayoría de las incertidumbres relacionadas con la gestión de residuos en logística inversa de la cadena de suministro se han resuelto mediante programación matemática difusa (FMP). Sin embargo, en el estudio realizado por Cobo et al. (2017) se identificaron algunas metodologías usadas por distintos autores para cuantificar los efectos de la incertidumbre, tales como: programación difusa, programación estocástica, programación por intervalos, diseño factorial y análisis de remordimiento *Minimax*. Algunos autores han utilizado una combinación de estas técnicas. Además, se añade que un análisis de incertidumbre debe basarse en la identificación de los parámetros y las suposiciones que aportará la incertidumbre al modelo.

#### 5.5. La importancia de la ubicación de los sitios de recolección

Para una gestión de residuos sólidos urbanos eficiente se debe recolectar, posiblemente transformar y eliminar los desechos. Estas actividades requieren la toma de decisiones a nivel estratégico, táctico y operativo, como lo es la ubicación de los sitios de tratamiento y vertederos (Wang, Qin, Li, & Chen, 2009).

El problema de ubicar sitios de recolección es complejo y poco agradable puesto que los ciudadanos prefieren un sitio de recolección lo más cerca posible de su residencia, pero, al mismo tiempo, desean pagar la menor cantidad de impuestos para garantizar este servicio. Por otro lado, también desean que el impacto visual sea mínimo debido a la presencia de los contenedores cerca a los hogares, así como no desean tener que lidiar con los malos olores que genera un depósito de residuos, convirtiendo así en objetivo clave el proporcionar el mejor servicio con la menor cantidad de contenedores posibles (Ghiani et al., 2014).

La ubicación de los sitios de recolección, así como la cantidad de contenedores que deben ir en cada sitio para abastecer la demanda, es un factor clave en el diseño de un sistema de gestión de residuos debido a que, como se demostró en la investigación de Ghiani et al. (2014), la eficiente ubicación de estos sitios permite que todo el sistema de gestión de residuos reduzca sus costos de transporte y recolección, los cuales representan el más alto porcentaje de los costos totales en el sistema. Estos costos de transporte se ven ahorrados por concepto de minimización de las rutas, eliminación de vehículos necesarios para la recolección e ineficiencias como lo es, por ejemplo, la llegada de dos camiones a descargar contenedores que ya han sido descargados. Además de ahorros monetarios para el sistema, se evidencia el beneficio ambiental debido a la disminución de las emisiones proporcionadas por cantidad de vehículos activados y por tiempo de viaje en las carreteras.

## 5.6. Transporte

Como se mencionó anteriormente, la recolección de los residuos es la etapa más influyente en cuanto a costos de todo el sistema de gestión de residuos, por lo tanto, un diseño de transporte es crucial para el éxito de un canal de distribución inversa, además de ser un factor que representa el más alto porcentaje de costos en el sistema de gestión de residuos. Estos altos costos e importancia se deben a que en esta fase hay gran intensidad de mano de obra y, evidentemente, un masivo uso de vehículos para llevar a cabo la operación del transporte de los residuos sólidos (Amponsah & Salhi, 2004; Guerrero et al., 2013; Kinobe et al., 2012).

Los servicios de transporte para la recolección de los residuos sólidos son usualmente proporcionados por el gobierno o por la industria que se encuentra interesada en la recolección de estos, sin embargo, algunos países que están en vía de desarrollo no cuentan con un sistema de recolección formal, lo que dificulta de por sí diseñar un sistema de transporte que sea efectivo (Demirbas, 2011). El diseño de un sistema de transporte parte desde el tipo de camión que se utiliza para cada etapa de la recolección de los residuos, por ejemplo, en Suecia se lanzó el uso de camiones híbridos durante el 2008 con el fin de hacer la recolección de una forma más sostenible (Bing et al., 2016).

El sistema de transporte se ve principalmente afectado por factores de infraestructura, como el estado de las vías y calidad y cantidad de los vehículos que se utilizan, y factores logísticos como la mala planificación de rutas e información errada sobre el calendario de recolección (Guerrero et al., 2013). Además de estos factores externos, el nivel de automatización de un vehículo, la habilidad del conductor y de los trabajadores en la recolección son factores propios del medio de transporte que influyen en los tiempos requeridos para recolectar los desechos en cada parada y, por ende, afectan la eficacia del sistema de recolección (Jaunich et al., 2016).

La investigación realizada por Jaunich et al. (2016) demuestra que el uso del combustible es un factor determinante en el transporte puesto que no sólo es una cuestión cuantificable en costos, sino que también es una cuestión ambiental, debido al origen de este combustible y las emisiones del medio de transporte en sí. La masa de material recolectado en cada parada afecta el costo y el uso del combustible pues influye en el tiempo requerido para llenar el camión y, por ende, los

viajes a la instalación de disposición que un camión puede hacer en un día. En esta investigación se analizaron distintas ciudades en Estados Unidos, una de las conclusiones es que el consumo de combustible, medido sobre tonelada métrica de residuos, es mayor cuando se recolectan materiales reciclables que cuando son residuales, debido a que los reciclables están presentes en menor cantidad y su densidad es menor, lo que significa que el camión lleno tiene menos masa. A partir de esto se logró también concluir que la distancia total registrada, los residuos recolectados, el uso de combustible y la capacidad del camión estiman finalmente la eficiencia de combustible.

### 5.7. Aspectos medioambientales

Como bien se mencionó en los casos empíricos y en los factores previos, el transporte es un factor que afecta no sólo los costos del sistema de gestión de residuos sino también el aspecto ambiental, pues por concepto de este es que se generan la mayor cantidad de emisiones, por lo cual es muy importante considerar estas al momento de diseñar un sistema de gestión de residuos. Sin embargo, esta etapa del sistema no es la única que genera un impacto en el ambiente, existen algunas etapas donde el impacto ambiental es negativo y otras donde el impacto es positivo.

Estas etapas y su impacto se pueden apreciar en la investigación realizada por Subulan et al. (2015), donde el residuo que se maneja son llantas nuevas y usadas. En este estudio se utilizó la metodología de evaluación de impacto ambiental eco-indicador 99, la cual tiene un enfoque de ciclo de vida, es decir, evalúa el impacto en cada fase del ciclo de vida del residuo en cuestión. Durante la ejecución y resultados se determinó que cuando se fabricaba con productos reciclados, se refabricaban los neumáticos y se utilizaban estos residuos para generar energía, había una ganancia a nivel ambiental, al igual que cuando se utilizan camiones con mayores capacidades. Por el contrario, almacenar neumáticos de desecho es una actividad muy contaminante, pues deben eliminarse o utilizarse para producir energía. Ahora bien, en la eliminación también existen las preferencias en favor al medio ambiente, pues enterrar en un vertedero este tipo de desecho resulta más contaminante que la misma incineración e, igualmente, depende del tamaño del neumático.

Lo anterior hace referencia a las fases del ciclo de vida más y menos contaminantes, pero cuando se habla de una cadena de abastecimiento de ciclo cerrado para neumáticos, en este caso, existen también factores que se ven en las distintas fases de la cadena, tales como: las tasas de neumáticos devueltos, el número de camiones, la fracción de las llantas que se incineran y el precio unitario de materiales reciclados para vender a terceros. De todos estos factores el que menos influencia tiene sobre el medio ambiente es el precio de venta de los materiales reciclados, los demás factores influyen altamente en el impacto ambiental, especialmente el número de vehículos y la tasa de devolución.

A manera de conclusión, Subulan et al. (2015) afirma que la evaluación y medición del daño ambiental total son tareas desafiantes para el diseño de un sistema de gestión de residuos, puesto que disminuir el impacto ambiental es uno de los principales objetivos de recuperar desechos, por lo tanto, la ejecución de estos sistemas debe conservar este objetivo.

La investigación anteriormente referenciada coincide con la afirmación de varios autores que han afirmado que, aparte de la fase de uso, las fases de producción y vertimiento son las que tienen un mayor impacto ambiental. Por el contrario, la recuperación de energía, reencauche y reciclaje se obtienen valores negativos en cuanto al impacto ambiental, por lo tanto, hay beneficios ambientales.

#### 5.8. Actores

La gestión de residuos involucra muchas partes interesadas, no sólo es responsabilidad de las autoridades locales. Identificar y entender estas partes interesadas es un paso importante para establecer un sistema efectivo. La investigación Guerrero et al. (2013) muestra que a nivel de residentes, la generación y separación de residuos se ve afectada por el tamaño de la familia, el nivel de educación, el ingreso mensual, el género, la influencia de los compañeros, tamaño del terreno y ubicación del hogar.

Por otro lado, se identificaron cuáles son los principales *stakeholders* en un sistema de gestión de residuos de un país en desarrollo. Los principales *stakeholders* formales, es decir, de los que se tiene certeza, son la autoridad local, algunos ministerios del gobierno, contratistas privados que prestaban el servicio, usuarios del servicio (hogares, organizaciones civiles, sector comercial e industrial). Los informales, que en ocasiones no son considerados, fueron recicladores puerta a puerta, en la calle o lugar de depósito, compradores ambulantes de desechos, propietarios de tiendas de chatarra y barrenderos.

Un actor indirecto y que no está a simple vista para los investigadores son las universidades y centros de investigación, estos tienen la responsabilidad de preparar profesionales y técnicos en los ámbitos ambientales, pues algunos países ya han visto las ventajas de invertir en educación e investigación al tener ciudades más limpias, ciudadanos que asumen responsabilidades y un estatus más elevado de los trabajadores de residuos sólidos.

El sector informal es un actor importante en los sistemas de gestión de residuos en los países en desarrollo, como lo mostró Oguntoyinbo (2012) en su investigación en Nigeria, donde los recicladores del sector informal juegan un papel importante en la recolección y eliminación de desechos, así como en la clasificación de los materiales reciclables en los vertederos. A pesar de no estar registrados ni regulados, sus actividades se relacionan mucho con la gestión formal de residuos en la recuperación de materias primas secundarias. Las actividades que desarrollan son ilegales debido al método antihigiénico de separación de residuos y vertimiento indiscriminado en las calles. Los trabajadores parecen estar más preocupados por la supervivencia económica y les prestan poca atención a los riesgos de sus condiciones de trabajo. El reconocimiento oficial de su actividad permitirá tener mayor seguridad económica además de alcanzar tres objetivos de desarrollo: mitigación de la pobreza, generación de empleo y sostenibilidad ambiental. Durante la investigación se detectaron las barreras que no permiten desarrollar un sistema integrado de gestión de residuos, es decir, un sistema en donde este sector informal sea oficialmente reconocido:

- Método antihigiénico de operación: los legisladores y autoridades formales de residuos tienen una perspectiva muy negativa respecto al sector informal de residuos, por esto consideran incompatibles estas actividades con la gestión moderna de residuos. Además, los materiales reciclables se contaminan fácilmente y la clasificación informal de los desechos se hace manualmente y de forma muy desaseada.
- Política pública represiva y percepción pública negativa: la sociedad considera estas actividades informales vergonzosas, un problema social y molestia pública, donde se ha llegado a considerarlos como ladrones a quienes realizan las mismas. Se han decomisado carros de recolección por parte de los funcionarios y no se han considerado los beneficios económicos del reciclaje informal.
- Baja cantidad y calidad de materiales reciclables: los recicladores informales tienen experiencia para identificar desechos con valor potencial, sin embargo, sus métodos antihigiénicos eliminan este potencial. La falta de incentivos y el mercado limitado reducen las tasas de reciclaje.
- La falta de evidencia de apoyo: los datos son limitados sobre las actividades del sector informal, sin embargo, un estudio muestra un costo de evitación de vertederos del 79,5% y un ahorro 78% de ahorro si se incluyen los recicladores informales al programa integrado de reciclaje.

Un cambio positivo en la percepción que tiene la sociedad frente a los recicladores informales como proveedores de servicios ambientales es un paso importante y la cooperación con el sector formal es necesaria. En India, la capacitación de recicladores informales aumentó la calidad y cantidad de material reciclable obtenido y minimizó los riesgos ocupacionales. Para maximizar la rentabilidad, este servicio puede prestarse a vecindarios de bajos ingresos. Algunas ciudades han adoptado un enfoque positivo para la integración del sector informal a través de varias iniciativas dirigidas por los municipios que implican el registro de cooperativas informales y que les permiten acceder a los desechos generados en áreas seleccionadas. La actividad informal puede ser efectiva en presencia de políticas amistosas que serán beneficiosas para todas las partes interesadas en la gestión de desechos sólidos, por lo tanto, debe apoyarse, no abolirse.

#### 5.9. Aspectos por destacar para la ciudad de Ibagué

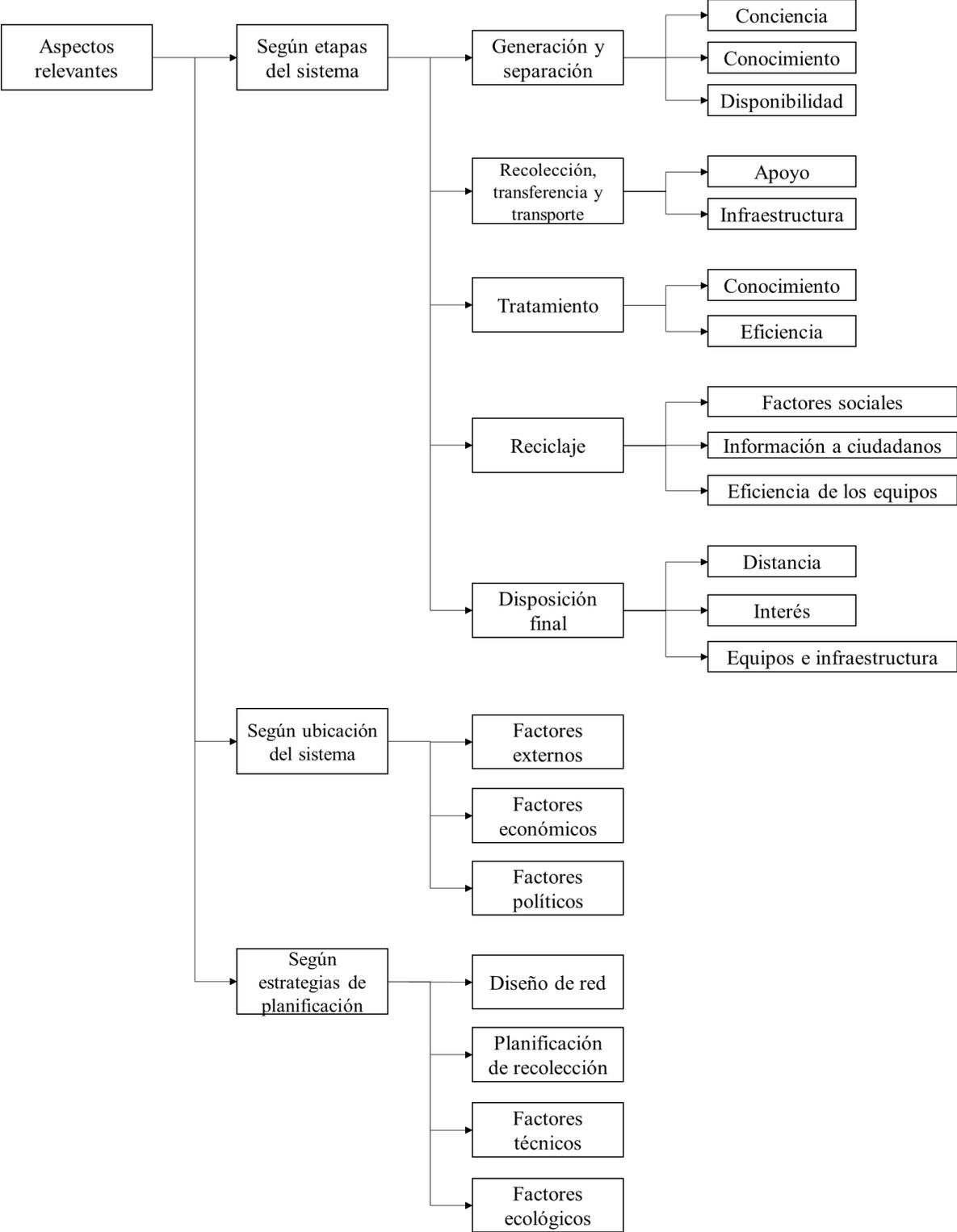
Basados en los aspectos relevantes que se identificaron durante esta investigación, los factores para tener en cuenta al momento de diseñar una cadena de abastecimiento de llantas usadas en la ciudad de Ibagué son:

- La recolección de los distintos residuos en la ciudad de Ibagué se realiza por medio de recolección en la acera y sin separación en la fuente de generación de estos, sin embargo, para las llantas se debe implementar un sistema distinto que no combine los residuos municipales con los neumáticos de tal forma que se evite la contaminación de estos últimos y altere su calidad.
- La infraestructura de la malla vial en Ibagué es muy limitada, debido a su escaso espacio y no muy buena calidad, por lo tanto, no cualquier tipo de camión podrá moverse de

forma adecuada en la ciudad sin causar daños en la vía y en la movilidad de los ciudadanos.

- Las autoridades ambientales y estatales de la ciudad también deben considerarse, esto debido a que el apoyo de estas entidades a un proyecto que abarca toda la ciudad es fundamental, como se vio en los casos empíricos, no solo por aspectos financieros y de presupuesto, sino también para tener una mejor organización del sistema y lograr integrar varias ramas de la logística.
- La incertidumbre, como se dijo anteriormente, debe considerarse en cualquier sistema, y para este caso en específico es necesario considerar incertidumbre en la cantidad, calidad y frecuencia con la que se van a obtener las llantas usadas por parte de los usuarios y/o de los montallantas. También debe considerarse la incertidumbre en la oferta, puesto que el sistema de recolección de llantas usadas también es dependiente del uso final que se le va a dar a estas.
- Como en la mayoría de los países en desarrollo, los sistemas de recolección de residuos cuentan con actores informales que no son considerados oficialmente por las autoridades. La ciudad de Ibagué no es una excepción a este aspecto, por lo tanto, los recicladores informales y compradores de residuos deben tenerse en cuenta para esta cadena de abastecimiento inversa y, aunque no se tiene claridad sobre el papel que puedan tomar en la recolección de este residuo específico, su papel en la recolección de residuos municipales es activo y, por lo tanto, es un *stakeholder* que debe considerarse.

Finalizando los aspectos relevantes de la gestión de residuos en el diseño de una cadena dedicada a la recuperación de llantas usadas, la Ilustración 5 a continuación resume estos aspectos encontrados que se discutieron en esta sección con el fin de proporcionar una herramienta visual que identifique de forma rápida lo esencial para considerar.



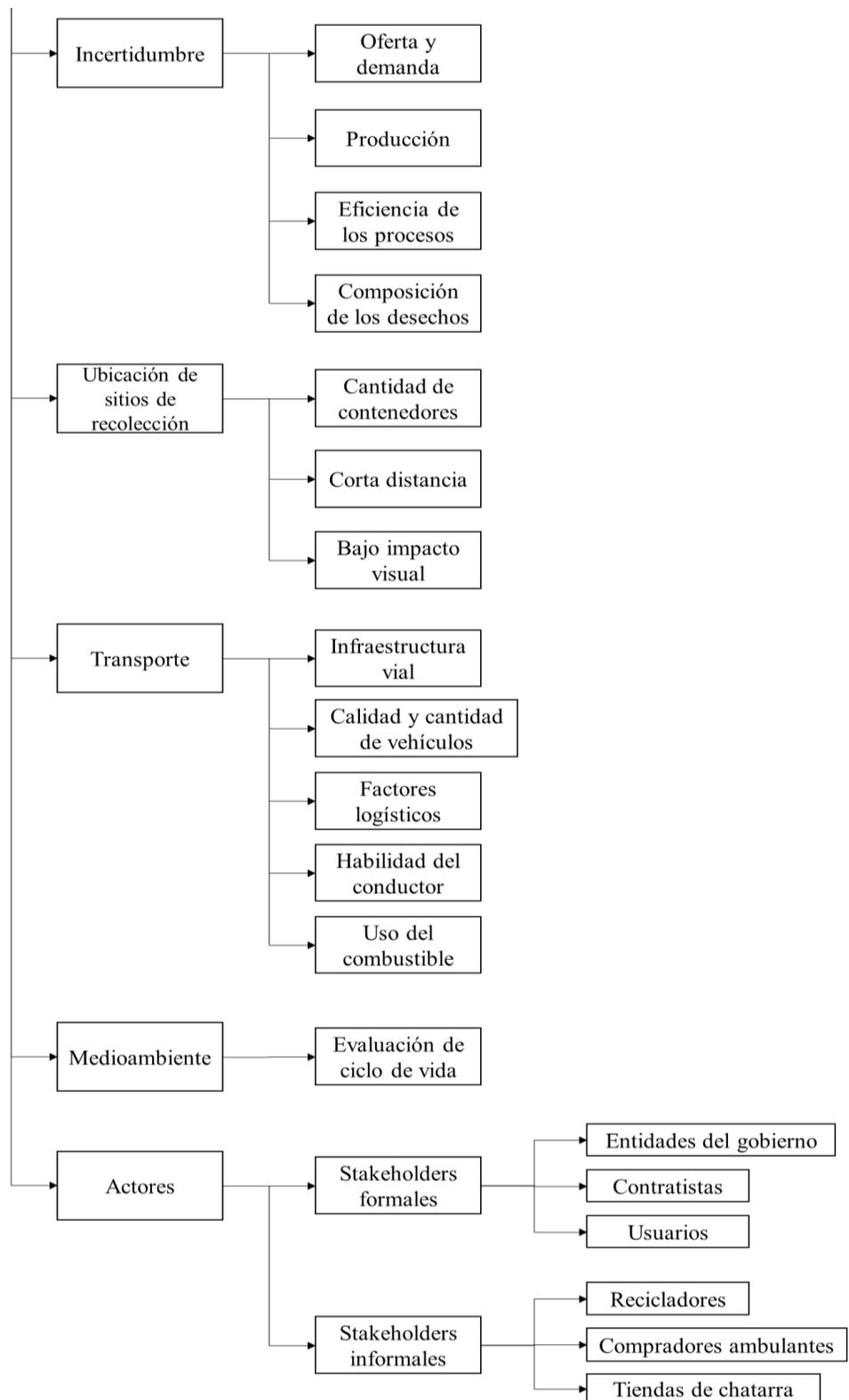


Ilustración 5. Aspectos relevantes de la gestión de residuos en el diseño de una cadena dedicada a la recuperación de llantas usadas

Fuente: Elaboración propia.

## 6. Gestión de residuos sólidos en el contexto colombiano

En Colombia se han adaptado distintas políticas para administrar varios productos al final de su vida útil, tales como contenedores de plaguicidas, medicamentos, baterías de plomo y ácido, bombillas, baterías pequeñas, computadoras y llantas con el fin de disminuir el impacto ambiental (Park, Díaz-posada, & Mejía-dugand, 2018), y aunque los materiales de diversos productos y empaques han avanzado para ser más amigables con el medio ambiente, es mejor cerrar su ciclo de vida re-integrándolos a la cadena de producción y evitar así el desgaste de los recursos naturales. Es por esto por lo que las empresas en Colombia han optado por implementar una economía circular (El Tiempo, 2018). A continuación, se plantean los sistemas de gestión de residuos que se han implementado en distintos sectores de producción en Colombia.

### 6.1. CEMPRE

En el país se implementó el Compromiso empresarial para el Reciclaje (CEMPRE) en Colombia a partir del 2009, una organización que busca incentivar las cadenas de valor y fomentar el reciclaje inclusivo, es decir, crear una cadena donde se incluya el trabajo realizado por los recicladores del sector informal (El Tiempo, 2018).

- CEMPRE: Tiene como objetivo concientizar a la comunidad en los temas de gestión de residuos sólidos, apoyando y articulando a los grupos de interés. Se trabaja a partir de 5 ejes: 1) Articulación de las cadenas de valor, donde se identifican los actores clave de la cadena y se definen oportunidades de mejora con el manejo de los residuos, 2) sensibilización respecto a la gestión integral de residuos mediante infografías, campañas, talleres, entre otros, 3) formulación y desarrollo de estrategias para el manejo y aprovechamiento de los residuos, 4) implementación de sistemas integrados de gestión de residuos que involucren a los actores de la cadena de valor y asegure la trazabilidad hasta el cierre del ciclo y 5) crear estrategias de responsabilidad ambiental y social para que las organizaciones adopten (CEMPRE, 2018).

En el 2010, CEMPRE inició un programa llamado “Reciclar tiene valor”, que consiste en ubicar ecopuntos en algunos supermercados donde recicladores le ayudan al consumidor a ubicar los elementos recolectados, según el material, en alguna caneca del ecopunto; luego de esto, los recicladores se encargan de la comercialización del material, obteniendo el total de los ingresos más incentivos por parte de CEMPRE (Quintero, 2012). En el informe realizado por Moreno Torres (2015), se profundiza en las actividades que se realizaron en el programa mencionado: se instalaron puntos de reciclaje en tiendas Carrefour (en Bogotá y Medellín), donde cada punto contaba con 4 contenedores (papel, plástico, vidrio y metal) y era acompañado por un reciclador de oficio que recibía el material en un horario determinado y, como reconocimiento a la labor del usuario, el reciclador entregaba un incentivo a quienes llevaban el material; este era acopiado en espacios destinados por el supermercado, recolectado por la organización de recicladores con una frecuencia de máximo 2 días, transportado al centro de acopio, clasificado, seleccionado y finalmente comercializado por la organización de recicladores. Durante los 3 años que el proyecto fue ejecutado (2010 – 2012) se contribuyó a que 291,5 toneladas de residuos sólidos no llegaran al relleno sanitario

y se generaron 143 empleos directos a recicladores de oficio. Debido a la funcionalidad de los Ecopuntos instalados, se tomó la decisión de cerrar los puntos en Medellín y continuar con los de Bogotá. Este informe muestra que la participación de los usuarios depende de los incentivos que se dan, por ejemplo, del 13 de Abril del 2010 hasta el 15 de octubre del 2010 se registró participación de 8.601 usuarios, sin embargo, a partir de esa fecha hasta el 31 de diciembre del 2012 se registró participación de 8.345 usuarios; todo esto debido al cambio de incentivos que hubo, donde en la primera fase se les otorgaba una boleta para participar en rifas de bonos de \$500.000 redimibles en las tiendas Carrefour y después de esto los incentivos eran imanes, manillas, lapiceros y bolsas ecológicas.

Existen varias empresas que se han asociado a CEMPRE y que implementan programas para la adecuada gestión de sus residuos, tales como:

- **Natura:** El programa de Residuos Sólidos recupera los empaques post-consumo, donde motiva a sus consultores a separar los materiales en la fuente. En cada ciudad de Colombia donde se tiene el programa, hay una alianza con organizaciones de recicladores, donde se garantiza que tengan la infraestructura y logística para ocuparse de la recolección del material a reciclar. En Bogotá, por ejemplo, se cuenta con la alianza de la Asociación de Recicladores de Bogotá, donde hay 2.100 recicladores afiliados y 9 centros de acopio. Natura tiene también como objetivo dignificar el trabajo del reciclador, promoviendo la cultura del reciclaje como una práctica fundamental para la preservación del medio ambiente (Natura, n.d.).
- **PAVCO:** El programa “Recicle con Pavco”, iniciado en el año 2016, busca cerrar el ciclo de los residuos de PVC y CPVC provenientes de obras de instalaciones hidrosanitarias y eléctricas en Bogotá. La empresa recicladora Ambientes Plásticos de Colombia en Bogotá, capacita a los trabajadores en obra y acondiciona el sitio de recolección; luego, en las obras se realiza la recolección de los sobrantes de tuberías y accesorios; estas tuberías son clasificadas, limpiadas, molidas, empacadas y reprocesadas para ser incorporadas en nuevos productos. El programa consta de 5 principales fases o momentos: 1) La generación de los residuos en las obras, 2) la recolección llevada a cabo por la empresa recicladora directamente en las obras, 3) separación, recuperación y acondicionamiento del material recogido, 4) reciclaje y 5) fabricación de nuevos productos. Durante el 2017 se lograron recuperar 41,6 toneladas de residuos de PVC y CPVC (Pavco, 2017, 2018).
- **Carvajal Empaques:** En el informe de sostenibilidad realizado por Carvajal Empaques (2017) se habla sobre el programa de cierre de ciclo de productos con el objetivo de lograr que los plásticos sean aprovechados y no lleguen a los ecosistemas o rellenos sanitarios en Cali. La campaña “Cambia el rumbo del plástico” ha construido una cadena de valor que hace posible cerrar el ciclo del plástico, convirtiéndolos en productos útiles para la comunidad como madera y estibas plásticas, casas para mascotas, arpones, juguetes, macetas y otros. Durante el 2017, junto con Recicloplas, se recuperaron 41,2 toneladas de plástico posconsumo para transformar y que no llegó al relleno sanitario o al ecosistema. El informe describe la cadena de valor de la siguiente forma:

- i. Comienza con el primer eslabón del proceso: los consumidores. Junto con la autoridad ambiental se realizan capacitaciones sobre la correcta separación de plásticos en centros comerciales, universidades y empresas y se verifica que sean recogidos y llevados a una planta de reciclaje.
- ii. Luego, los recolectores u operadores logísticos recogen los plásticos acopiados en las comunidades objetivo y los almacenan en bodegas para entregarlos a Recicloplas, la primera empresa de recicladores en Cali que recupera este material.
- iii. La empresa Recicloplas transforma los plásticos posconsumo en resinas de polipropileno, poliestireno, aglutinado de polietileno y poliestireno espumado que se comercializan como materia prima posconsumo, calificada como premium.
- iv. Finalmente, empresas fabricantes adquieren esta materia prima para fabricar los productos y a su vez, los productos son adquiridos por la comunidad.

## 6.2. Baterías MAC

Las baterías deben ser tratadas con un procedimiento responsable debido a su contenido de plomo y ácido, que suponen un grave riesgo para el medio ambiente y una amenaza para la salud. El programa Ecosteps de Johnson Controls permite cerrar el ciclo de vida del producto, evitando que estos residuos generen impactos ambientales o afecten la salud de las personas.

El proceso de recuperación de la batería inicia cuando el usuario lleva su batería usada a un centro de almacenamiento de baterías usadas (centros de servicio vehicular y puntos de venta autorizados), donde el usuario cambiará su batería por una nueva, debido a esta acción adquiere un beneficio o descuento para la compra de la nueva batería. Las baterías se acopian temporalmente en estos centros de servicio hasta que Ecosteps las recoja; este programa tiene una flota de vehículos que cuenta con los requisitos para el transporte terrestre de residuos peligrosos de plomo – ácido. Los camiones llevan las baterías a la planta de reciclaje donde se realiza el proceso técnico de destrucción de baterías para determinar y procesar los componentes que serán reutilizados en el proceso de producción de nuevas baterías.

La empresa lleva registro sobre la trazabilidad del proceso de logística inversa, con el objetivo de conocer el estado y destino final de los componentes de una batería expirada, se realiza un seguimiento desde el levantamiento de los residuos peligrosos hasta su aprovechamiento como materia prima (MAC, 2016).

## 6.3. Conceptos Plásticos y Bioplast

Conceptos Plásticos es una compañía creada en el 2014 que construye casas a partir del plástico reciclado. Óscar Méndez, su fundador, explica que el proceso inicia con los recicladores de barrio: ellos separan los residuos, se los llevan a sus instalaciones y sacan lo que comercializan normalmente, como tapas y bolsas; el porcentaje que no sirve llega a Conceptos Plásticos. En la planta se realizan los procesos de trituración e identificación, mezcla y extrusión mediante los cuales se obtienen los productos. Méndez afirma que más importante que el proceso de transformación del plástico lo es la forma de recolección de este, es decir, mediante los recicladores de barrio. Para el 2017, la empresa estaba llegando a la construcción de 3.200 metros cuadrados (Becerra, 2017).

Por otro lado, Bioplast es una empresa que nació en Antioquia en el 2013 que recupera y transforma residuos plásticos. La cadena de recuperación empieza con el reciclador informal, quien lleva los residuos sólidos plásticos a las cooperativas, fundaciones y unidades productivas, Bioplast les compra los residuos plásticos debidamente clasificados, posteriormente pasa por procesos de granulado, limpieza y un proceso térmico donde sale homogeneizado y listo para incorporarse a la cadena productiva y comercial. La compañía ha logrado recuperar más de 960.000 kilos de residuos plásticos. Además de favorecer al medio ambiente, se trabaja con recicladores de comunidades vulnerables de Medellín, muchas en condición de desplazamiento (El Espectador, 2016).

Estos sistemas de logística inversa apoyan la hipótesis de que incluir al sector informal en los sistemas de recolección de residuos puede traer muchos beneficios no solo a la comunidad sino a la cadena de suministro inversa, en factores de eficiencia de proceso y económicos.

#### 6.4. Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá (Castaño, Misle Rodríguez, Andres Lasso, Gómez Cabrera, & Ocampo, 2013)

El sector de la construcción ha crecido en los últimos 15 años y, por lo tanto, aumenta la producción de RCD. Según la Secretaría Distrital de Planeación y Ambiente de Bogotá, en Bogotá se producen cerca de 15 millones de toneladas de RCD por año, que en muchos casos van a parar a sitios no autorizados, alterando el paisaje y contaminando suelos y acuíferos. Estos residuos poseen aún capacidad de ser valorizados y al desecharlos se presenta una pérdida de recursos potenciales. Múltiples investigaciones han mostrado que los RCD pueden sustituir de forma satisfactoria los agregados naturales, transformando la industria de la construcción en una actividad sostenible.

Las normas legales que regulan la producción y gestión de los RCD van en orden de: reducir la producción de residuos, reutilizar aquellos elementos que así lo permitan, reciclar los residuos que no puedan reutilizarse, la valorización energética de los residuos que no puedan reciclarse y el depósito adecuado en vertedero de lo que no pueda valorizarse. La opción más sencilla es depositar los residuos en vertederos legales, pero es inevitable el agotamiento de los sitios de disposición y, de hecho, se han detectado 94 sitios ilegales en Bogotá que han ido destruyendo humedales.

En la actualidad, se tiene como sistema el vertido, controlado en ocasiones, pero sobre todo incontrolado. También existen los llamados “molineros” que mediante la trituración de los RCD producen arena, sin embargo, la calidad de sus productos no cumple con las normativas para usar en construcción y las condiciones laborales son deficientes. A partir de que la Secretaría de Medio Ambiente expide la resolución 2397 de 2011, donde se obliga a las constructoras bogotanas a aprovechar los residuos de sus obras, se empieza a promover el uso de centros de aprovechamiento, donde se tratan los RCD para crear productos comerciales.

El funcionamiento de estos centros de aprovechamiento o de una planta de transformación de RCD se da de la siguiente forma: Al ingresar los camiones volqueta provenientes de las obras de la ciudad, se hace una inspección visual de la mezcla, se pesa y se determina el tratamiento del

residuo. Ahí mismo se fija el costo de la gestión. Luego de esto, la mezcla es separada y triturada para usar esos agregados en constitución de bases, subbases y mezclas hidráulicas. Este tipo de plantas deben ser aptas para tratar otros residuos como madera, hierro, envases metálicos y plásticos, cartón, papel, vidrio, entre otros. Los residuos que no se pueden transformar o valorizar se deben llevar a un sitio de disposición final. Para hacer un plan de gestión de RCD completo se debe hacer la recolección de estos mediante dos sistemas principalmente: camiones tipo *roll-off* y camiones tipo bañera, siendo más eficientes los primeros debido a su capacidad.

La conclusión principal de la investigación es la necesidad de una solución a los RCD donde la administración cree plantas de transformación de primer nivel y zonas de almacenamiento o vertederos de residuos en zonas aisladas. Además, sustituir agregados vírgenes por reciclados resulta técnicamente viable debido a sus propiedades en cuanto a bases, subbases, lechadas y mezclas de concreto hidráulico y asfáltico.

#### 6.5. Logística inversa en el sector hospitalario, aplicación en Medellín (Gómez, Zuluaga, & Correa, 2014)

En el sector hospitalario se generan residuos que mal gestionados, causan daño al medio ambiente y a la integridad y salud de las personas, debido a la peligrosidad de estos. En Colombia los hospitales de primer, segundo y tercer nivel generan 8.500 toneladas de residuos por año. Por esto, la investigación propone un sistema de logística inversa que contribuya al cumplimiento del decreto 2676 del 2000 y el manual de procedimientos para la Gestión Integral de Residuos Hospitalarios y normativas similares que en Colombia reglamentan su manejo.

El Ministerio de Protección Social y de Ambiente diseñan el Programa Nacional para la Gestión Integral de Residuos Hospitalarios, donde uno de los componentes principales en los que se basa es el Manual de Procedimientos para la Gestión Integral de Residuos Hospitalarios y Similares en Colombia (MPGIRH), el cual tiene como objetivo facilitar la aplicación del decreto 2676 del 2000. Este manual cuenta con actividades propias de un sistema de logística inversa, descritas así:

- Plan de gestión interno y externo de residuos hospitalarios: El componente interno articula todos los procesos (identificación de residuos, separación, almacenamiento, movimiento interno, tratamiento, disposición) realizados al interior de la entidad generadora de residuos. El externo, por el contrario, se enfoca en las empresas por fuera de la entidad generadora que gestionan los residuos.
- Clasificación del tipo de residuo: Hay dos categorías según su riesgo, siendo 1) Residuos generales o comunes, que representan el 80% del total de residuos hospitalarios y no requieren un manejo especial, estos residuos son cajas de cartón, botellas y residuos de procedimientos médicos no contaminantes y 2) Residuos peligrosos, que a su vez se dividen en residuos infecciosos, los cuales contienen patógenos y se componen de residuos de laboratorio, órganos, tejidos, partes corporales extraídas, residuos de sangre, entre otros, representando del 10 al 15% de los residuos; y los residuos especiales, generados en servicios de diagnóstico y tratamiento, los cuales constituyen el 4% del total de residuos.
- Generación y segregación de residuos: Los servicios de laboratorio, cirugía y cuidados intensivos producen más residuos peligrosos. En esta fase se presentan tres actividades:

- i. Reducción y reciclaje: los objetos que más se reutilizan son tubos, guantes y sondas, con su debido proceso de esterilización. Los residuos de alimentos en el hospital pueden usarse como abono.
- ii. Establecer indicadores: se presentan en unidad de kg de residuo sólido por hospital, con el fin de facilitar el monitoreo y control posterior.
- iii. Separación: Los residuos deben ser separados en el mismo lugar donde se originan por los médicos, enfermeras, odontólogos, entre otros, y depositados en recipientes de almacenamiento.
- Almacenamiento y movimiento interno de los residuos: Su movilización no deber ser excesiva debido a la dispersión de los gérmenes. Debe haber recipientes para los residuos generales, los peligrosos y elementos cortopunzantes. Según las características de los residuos hay tres tipos de almacenamiento intrahospitalario:
  - i. Inicial o primario, se almacena en el lugar de origen: habitaciones, laboratorios, consultorios o quirófanos.
  - ii. Temporal o secundario, se realiza en pequeños centros de acopio distribuidos.
  - iii. Final o terciario, se efectúa en una bodega adecuada para todos los residuos de la institución hasta ser recogidos.
- Tratamiento: Debe realizarse en cada establecimiento de salud, se clasifican en:
  - i. Tratamiento inmediato o primario, se realiza en la misma área donde se produjeron.
  - ii. Tratamiento centralizado o secundario, el cual es más especializado y puede ser interno o externo.
- Disposición final y transporte: En esta etapa se deben cumplir los lineamientos de la norma que maximizan la seguridad del personal, minimizar los riesgos ambientales y optimizar costos. Los distintos componentes del proceso son:
  - i. Rellenos sanitarios: los residuos generales y peligrosos tratados se llevan allí sin riesgo, aunque sí con precaución, los residuos peligrosos no tratados requieren una celda especial y control debido a la contaminación a través de microorganismos.
  - ii. Relleno sanitario manual: en centros de salud con el área suficiente se puede construir un relleno sanitario manual, esto en caso de que la recolección y disposición final de la ciudad no cumpla las condiciones de seguridad.
  - iii. Cementerio: las partes del cuerpo humano, por ejemplo, son enterradas allí luego de un tratamiento de desinfección química y con los permisos necesarios.
  - iv. Reciclaje: se debe garantizar que esta práctica no sea un riesgo para quienes manipulen.
  - v. Transporte: el traslado de los residuos desde su fuente hasta el almacenamiento temporal y final. Cada establecimiento de salud debe elaborar un cronograma de recolección y transporte que no interfiera con las actividades propias de la unidad.

Gómez et al. (2014) desarrolla una propuesta teórica y metodológica de diseño de sistema de logística inversa basado en la metodología de PHVA (Planear, Hacer, Verificar y Actuar) y que cumpla con algunos lineamientos del MPIRGH:

- Planear: Esta etapa debe establecer el direccionamiento, principios y estrategias del sistema de logística inversa de residuos hospitalarios. Se proponen cuatro elementos para esta etapa:

- i. Diagnosticar el actual manejo de residuos hospitalarios, para evaluar brechas y necesidades entre el sistema actual y uno de logística inversa.
- ii. Establecer los objetivos, el alcance y las estrategias del sistema de logística inversa.
- iii. Definición de los procesos de logística inversa que cumplan lo establecido.
- iv. Elaboración y aprobación del plan de logística inversa que debe contener responsables, recursos, cronogramas, riesgos e indicadores para su control y mejoramiento.
  - Hacer: En esta etapa se ejecuta el plan de logística inversa, pone en marcha los cronogramas y recolecta los datos necesarios. Los procesos del sistema de logística inversa hospitalaria deben ser representados en un mapa de procesos y caracterizados para comprender su papel en la cadena de suministro. En el mapa de procesos de la investigación se cuenta con tres tipos de procesos:
    - i. Estratégicos: relacionados con la planeación, objetivos, estrategias y alcance, incluyendo aspectos de mejoramiento continuo.
    - ii. Misionales: son las actividades que permiten cumplir los objetivos directos de la logística inversa, donde están 1) identificación de tipos de residuos, 2) segregación de residuos, 3) almacenamiento y movimiento interno, 4) Tratamiento, 5) Transporte y 6) disposición de residuos.
    - iii. De soporte: apoyan y soportan los procesos estratégicos y misionales.
      - Verificar: Esta fase examina que los resultados obtenidos correspondan a lo planeado. Para este caso se puede realizar a través de indicadores, tales como:
        - i. Número de empleados capacitados/mes incapacitados por enfermedad relacionada con residuos hospitalarios
        - ii. Cantidad de residuos almacenados, tratados y transportados por mes (kg/mes).
        - iii. Cantidad de residuos dispuestos en rellenos sanitarios y cementerios por mes (kg/mes).
        - iv. Beneficio económico por aprovechamiento de la gestión de residuos (\$/mes).
        - v. Costos de gestión de residuos (\$/mes).
        - vi. Cantidad de residuos reciclados y recuperados (kg/mes).
    - Actuar: En esta etapa se debe evaluar y analizar los resultados de la verificación para establecer acciones correctivas y preventivas.

Se realizó un diagnóstico y análisis en una IPS de Universidad en Medellín donde se obtuvo que el sistema de residuos hospitalarios se compone de procesos de 1) Segregación de residuos en la fuente, con la ayuda de los recipientes correspondientes en las áreas, 2) transporte interno al sitio de disposición o almacenamiento, según su peligrosidad, 3) almacenamiento, 4) disposición final y/o tratamiento, donde los residuos no peligrosos biodegradables se llevan al relleno sanitario, los no peligrosos son reciclados y los peligrosos son incinerados y llevados a celdas de seguridad, y finalmente, 5) transición a una gestión externa, donde se entregan los residuos a los operarios de transporte y disposición final.

Luego de esto, se realiza una comparación entre el sistema anteriormente descrito y el sistema de logística inversa basado en PHVA, donde se concluye que el sistema actual de la IPS puede ser complementado y fortalecido por el sistema basado en PHVA, debido a que este aumenta su alcance al considerar aspectos estratégicos, económicos, ambientales y sanitarios.

#### 6.6. Logística inversa en el sector plástico en Cartagena (De la Hoz, Vélez, & López, 2017).

En la investigación se realiza un modelo de programación lineal multiobjetivo aplicado a una empresa del sector plástico en la ciudad de Cartagena. El proceso de recuperación del polipropileno para su disposición en la producción industrial consta de cuatro etapas:

- i. Recolección y separación manual: Se recoge manualmente los plásticos de los residuos sólidos urbanos y se clasifican por tipo de plástico y nivel de contaminación. Seguidamente, se transporta al punto de acopio donde es picado o troceado, empacado y almacenado.
- ii. Separación mecánica de los plásticos: Se clasifican mediante técnicas de flotación y hundimiento por diferencia de densidad. El plástico es lavado con una solución ácida o básica, luego es enjuagado con agua, secado y almacenado para después ser llevado a la etapa de molienda.
- iii. Proceso de molienda del polipropileno: Este proceso reduce el tamaño del plástico al tamaño según los requerimientos de la máquina de extrusión (el proceso siguiente). Una vez ha salido del molino, es llevado al proceso de extrusión o es empacado y almacenado para su comercialización.
- iv. Extrusión y aditivación del polipropileno: Consiste en el prensado y moldeado del material hasta obtener la forma usual de cilindro fino y alargado. La cantidad de adición de un antioxidante estabilizante depende del grado de degradación del material antes de ser procesado.

Para el modelo se establecieron dos funciones objetivo, teniendo en cuenta que las variables con mayor impacto en la toma de decisiones corresponden al costo del producto final y a la estabilidad de la degradación del polipropileno recuperado como factor determinante para la calidad del producto final:

- Minimizar el costo de la logística inversa de polipropileno: Esta función objetivo se plantea teniendo en cuenta costos de transporte y almacenamiento, de material de producto fabricado, fuerza de trabajo en horas hombre, contrataciones y despidos, horas ociosas, inventario en bodega, de pedidos satisfechos y no satisfechos y costo del aditivo.
- Minimizar la degradación del polipropileno reciclado: Para esta función objetivo se determinó un comportamiento lineal del índice de degradación en función de la concentración del aditivo estabilizante mediante un análisis de regresión simple.

Seguidamente, se plantean las restricciones de producción, de mano de obra, de contrataciones y despidos, de horas extras y ociosas, de inventarios, de producción no entregada a tiempo, de producción subcontratada, de concentración de aditivo estabilizante agregado y de no negatividad.

Mediante la simulación del modelo en la herramienta Solver de Excel, se logró concluir que el modelo propuesto optimiza los dos objetivos clave para el proceso del objeto de estudio. Los resultados del modelo propuesto se compararon con los del programa que actualmente maneja la empresa y se evidenció una reducción del 12,6% en el costo total del programa de logística

inversa, siendo el costo del aditivo el factor con más impacto en el ahorro, debido a la implementación de la segunda función objetivo.

#### 6.7. Recolección de aceite vehicular usado en la ciudad de Pereira (Castañeda Jiménez & Cardona Arias, 2017)

La problemática ambiental generada por la mala disposición de aceite vehicular usado en Colombia ha permitido que en algunas de las principales ciudades se hayan creado empresas destinadas a la recolección y correcta disposición del desecho. Según un informe técnico de Gulf, empresa productora de lubricantes para automóviles, en el 2012 en Colombia salieron al mercado 45 millones de galones de aceite lubricante para motor, del cual un alto porcentaje no se dispone adecuadamente y el desecho termina en fuentes hídricas o es usado para falsificar lubricantes. En el 2008, por ejemplo, tan solo el 34,1% del total de aceite usado fue recolectado por la entidad encargada de la recolección y adecuada gestión de este residuo.

Se desea implementar una red de logística inversa en la ciudad de Pereira. El problema se identificó como un CVRP (*Capacited Vehicle Routing Problem*) o problema de enrutamiento de vehículos con capacidad, debido a que esta es restringida por el tipo de camión que se utiliza. Para solucionarlo se implementa la heurística del ahorro y luego se realizan agrupamientos (*clusters*) que cumplan con la restricción de capacidad de los vehículos.

El proceso de logística inversa del aceite vehicular usado, de forma general, se compone de: Recolección, inspección y clasificación, recuperación directa, transformación, transporte y almacenamiento. La investigación impacta directamente en las actividades de transporte.

El CVRP es un problema de optimización que cuenta con uno o varios vehículos con límites de capacidad de carga. Las características del CVRP para este caso son que:

- Cada ruta asignada a un vehículo inicia y termina en el depósito.
- Cada cliente pertenece a una sola ruta.
- La demanda de los clientes es menor a la capacidad máxima de los vehículos.
- La suma de las demandas de los clientes visitados en una ruta no debe ser mayor a la capacidad total del vehículo.
- Se define el costo total como la suma de los arcos que pertenecen al ciclo.

El planteamiento del problema se hace de la siguiente forma: Se debe tener una flota de M vehículos con capacidad homogénea y las características previamente descritas. Para la creación de la red de logística inversa se ubicaron 96 puntos (nodos) generadores y el centro de acopio en la ciudad de Pereira. Asimismo, se construyó la matriz de transporte (97 elementos) entre todos los nodos, se determinó la cantidad de galones de aceite vehicular usado generado en cada nodo y se determinó una flota de camiones con capacidad de 3.329 galones de desecho. El objetivo es encontrar un conjunto de rutas al menor costo posible.

- Función objetivo: Minimizar la sumatoria de los costos asociados a cada ruta visitada por cada flota de vehículos.

- Restricciones: Garantizan que del centro de acopio partan  $m$  vehículos, que solo un vehículo visite y abandone cada cliente, que la demanda total no supere la capacidad máxima del vehículo, que no existan sub-rutas y de no negatividad.

Debido al gran tamaño del problema, se utilizan las heurísticas para la toma de decisiones. Para este caso se selecciona una de dos fases: *route-first and cluster-second*, donde en la primera fase crea una ruta usando el método de ahorro y en la segunda, de acuerdo con los límites de capacidad de los camiones, se asigna a cada vehículo una ruta con un grupo de clientes. Se resuelve mediante el software Matlab. Para determinar el mínimo costo se seleccionan dos tipos de camiones (DONG FENG y FAW), ambos con distintas capacidades máximas y costos de transporte, con el fin de encontrar el más óptimo. Finalmente, se escogió el tipo de camión DONG FENG. El resultado arroja que para implementar la red logística:

- Se deben comprar 4 de estos camiones para cubrir la demanda.
- La solución determina las rutas que integran la red de logística inversa con el respectivo orden en que cada vehículo debe visitar los diferentes puntos generadores de aceite vehicular usado.
- El costo total de la ruta es de \$224.926,42 y el costo por galón de residuo transportado es de 19,03 \$/galón.
- Se compone de 4 rutas, cada una atendida por un camión.
- Las cisternas de los camiones tienen una capacidad de 3.329 galones (capacidad total de 13.316 galones).
- Cada ruta inicia y finaliza el recorrido en el centro de acopio, ubicado en un punto donde los costos de transporte desde los nodos hasta allí son los mínimos.
- Los 96 puntos de la red producen 11.822 galones del residuo, por lo tanto, el sistema está en capacidad de recolectar el 100% de los residuos de aceite vehicular generado.
- Solo se está utilizando el 89% de la capacidad de la red.

#### 6.8. Recolección y acopio de envases y empaques vacíos de plaguicidas en Boyacá (Silva & Contreras, 2015)

La investigación fue desarrollada en la unidad de riego Pantano de Vargas del departamento de Boyacá, donde se presenta un problema de manejo y tratamiento inadecuado de los residuos de plaguicidas por parte de los agricultores. El proceso actual que realiza la empresa de recolección, acopio y disposición final de estos residuos es empírico, pues no se utiliza ninguna herramienta tecnológica o ingenieril para la planificación de sus jornadas de recolección, causando retrasos en el proceso y dificultades en la medición de la eficacia.

Se desarrolló un modelo de simulación del proceso de recolección de los envases y empaques vacíos de plaguicidas para presentar propuestas de mejora en aspectos técnicos, mejorando el tiempo de ejecución de las jornadas de recolección, sin considerar variables de costos.

El proceso actual de recolección y acopio de envases y empaques de plaguicidas consta de 3 etapas:

- i. Alistamiento: Se ejecuta una evaluación al transporte, donde se revisan y verifican las medidas mínimas de seguridad que debe tener el vehículo que va a hacer la recolección. También se

diligencia el formato de remisión de residuos peligrosos y para comenzar el recorrido a las fincas, se aprovisiona de combustible el vehículo.

- ii. **Recolección:** Se realiza el recorrido a las fincas donde el generador de residuos de plaguicidas hace entrega de estos a la empresa encargada. Se evidenció que solo 2 de cada 11 fincas entregan los envases clasificados y tratados. El operario recolector realiza una preinspección de los residuos de plaguicidas para luego ser trasladados al vehículo, donde se verifica el tipo y cantidad de residuos entregados, diligenciando el acta de residuos peligrosos firmada por el agricultor que hace la entrega.
- iii. **Acopio:** Una vez finalizada la recolección en las fincas, el vehículo se desplaza hacia el centro de acopio y se realiza el descargue de los residuos recolectados, donde el operario ordena los residuos para apilarlos de forma segura.

La etapa de disposición final no se tuvo en cuenta debido a que se realiza en un lugar distinto a la zona del estudio, por lo tanto, no se incluyó en la investigación.

En la recolección de datos se obtuvo información respecto a actividades repetitivas, como el desplazamiento a cada finca, transporte a lugar de acopio, preinspección de los residuos y transporte de los residuos hasta el vehículo, las cuales pueden considerarse de naturaleza estocástica o probabilística. El tiempo estándar del proceso de logística inversa es de 365,2 minutos y se identificó el desplazamiento a cada finca generadora de residuo como la actividad cuello de botella, pero por su naturaleza, siempre poseerá el mayor tiempo de ejecución. Por lo anterior, el modelo debe ir enfocado a la reducción del tiempo de las otras actividades. Para las actividades de naturaleza estocástica se obtuvieron los datos mediante pruebas de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov y Anderson Darling. Para la validación del modelo se realizó mediante una prueba t Student. De la información recolectada se tiene que:

- **Análisis de salida de datos del vehículo recolector:** Se pudo evidenciar que el 73,7% del tiempo total del proceso, corresponde al desplazamiento entre fincas; el 19,5% del tiempo se usa para cargar los residuos generados en cada finca y el 6,8% del tiempo el vehículo no hace nada, es decir, tiempo ocioso.
- **Análisis de salida de datos para el operario recolector:** Se evidenció que el 80,79% del tiempo total del proceso el operario espera a que se desarrollen ciertas actividades como el transporte de finca a finca; el 6,42% del tiempo para realizar la actividad correspondiente al transporte al lugar de acopio en finca y el 7,03% del tiempo lo usan para desplazarse hasta el vehículo.

Con base en esta información, se crearon dos escenarios posibles para reducir el tiempo total del proceso actual en el software especializado *Flexsim* versión 5. En el primer escenario se adiciona un operario para las actividades de preinspección y recolección de los residuos generados en finca. El segundo escenario consiste en adicionar un vehículo para la recolección que, junto con el operario adicionado en el primer escenario, tomarán una ruta alterna de tal forma que se atiendan 6 de las 11 fincas.

El segundo escenario muestra una mejora del 46%, equivalente a 168,86 minutos, respecto al proceso actual, generando una reducción del tiempo total del proceso de recolección y acopio de residuos de plaguicidas.

#### 6.9. Neumáticos al final de su vida útil en Colombia – Responsabilidad ampliada del conductor (Park et al., 2018)

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial, mediante el Decreto 1457 del 29 de julio de 2010 considerando “Que se requiere organizar la recolección y la gestión ambiental de las llantas usadas para que estas actividades se realicen de forma selectiva y de manera separada de los demás residuos para su adecuada gestión” definió el objeto: “Establecer a cargo de los productores de llantas que se comercializan en el país, la obligación de formular, presentar e implementar los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas, con el propósito de prevenir y controlar la degradación del ambiente”.

Con base en el anterior decreto, existe un principio de política ambiental llamado Responsabilidad ampliada del productor (EPR), que pretende extender la responsabilidad de los productores para cubrir todo el ciclo de vida de sus productos. Esto incentiva a los productores a cambiar el diseño de sus productos para reducir el costo de la gestión del final de su vida útil. Colombia fue uno de los primeros países de América Latina en adoptar esta política para administrar residuos de productos. Desde el 2007 en Colombia se aplicó EPR para desechos peligrosos y se amplió para cubrir desechos no peligrosos, como los neumáticos usados, en el 2010.

En Colombia se importan entre 5,5 y 6,7 millones de neumáticos al año (DIAN, 2017) para satisfacer la creciente demanda de vehículos, que ha pasado de 3,8 millones a 12 millones de vehículos en carretera entre 2002 y 2016 según el (Ministerio de Transporte, 2015). Asimismo, se estima que en Colombia se generan 61.000 toneladas de residuos de llantas al año, y un 71% va a los rellenos sanitarios o son incineradas, es decir, no se aprovechan, de hecho, a pesar de que la quema a cielo abierto, el abandono en espacios abiertos y la eliminación de llantas en vertederos están legalmente prohibidos, se estima que 2 millones de neumáticos usados resultan en estas actividades (Franco, 2016). Se pronostica que para el año 2025 los residuos de llantas que se tendrán serán de 2.651.000, por lo tanto, 13.870.000 llantas de automóvil no serían recolectadas para alargar su vida útil o darles una disposición adecuada (Rodríguez Camargo, López Franco, Chud Pantoja, & Gómez Osorio, 2017).

A pesar del no muy alentador panorama, existen entidades en Colombia que actualmente ejecutan el principio de EPR, como lo es Rueda Verde, que acoge 84 importadores de llantas y realizan sus actividades de logística inversa de forma conjunta y más rentable. Rueda Verde estableció 179 puntos de recolección, cubriendo el 93% de lugares donde se vendieron neumáticos, y contrató a 4 empresas de procesamiento que trituraron las llantas para producir productos de caucho y 13 empresas reencauchadoras. Esta entidad organizó sesiones de capacitaciones para usuarios finales y utilizó prensa, sitio web y material impreso para divulgar la información (Rueda Verde, 2014, 2016). Por otro lado, Sistema Verde tiene sus propias instalaciones de procesamiento y redes de transporte, además de un contrato con una planta de cemento que recupera energía derivada de los neumáticos. En Colombia existen 22 compañías de

residuos que ofrecen procesamiento y gestión para residuos de llantas y alrededor de 87 reencauchadoras (Cardozo, 2016).

La investigación de Park et al. (2018) tuvo como objetivo estudiar dos aspectos del sistema EPR en Colombia: estructura de gobierno y desempeño en la gestión al final de la vida útil:

- Gobernanza: La resolución 1457 de 2010 del Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (2010) impuso obligaciones a fabricantes e importadores para gestionar llantas usadas y propuso roles de apoyo para otros actores del sistema, tales como:
  1. Productores e importadores: el mercado de llantas en Colombia depende principalmente de las importaciones. Estos actores deben formular, presentar e implementar un esquema de gestión de residuos EPR para cumplir los objetivos de recolección y financiar el plan sin pasar los costos a los consumidores. Deben estar a cargo también de diseñar y pagar los programas para informar a los consumidores sobre la devolución de estos residuos.
  2. Usuarios finales y distribuidores de llantas: la resolución propone que los usuarios devuelvan las llantas a los puntos de recogida más cercanos de forma voluntaria y las instituciones organizan una recogida ofrecida por los productores e importadores. También se planteaba que los distribuidores de neumáticos, al ser puntos habituales de venta, manejaran la recolección y almacenamiento de llantas. Cabe resaltar que la devolución y recolección se debe realizar de forma gratuita y sin ningún pago a los usuarios o distribuidores.
  3. Autoridad nacional de licencias ambientales ANLA: entidad pública que evalúa, monitorea y controla actividades sujetas a licencias, permisos o regulaciones ambientales. Esta realiza una evaluación del plan de EPR y supervisa el cumplimiento mediante la revisión de informes y la realización de auditoría, así como también implementa sanciones en caso de evidenciar incumplimientos.
  4. Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS: desarrolla y revisa los reglamentos del EPR, evalúa la operación y rendimiento del sistema y proporciona el apoyo institucional necesario.
  5. Otros: autoridades ambientales regionales, municipios, la policía nacional y las empresas de servicios públicos apoyan las campañas de información y divulgación. El ejército militar, además de ser uno de los mayores consumidores de neumáticos, comparte su infraestructura de envío y transporte para entregar neumáticos desde San Andrés a Cartagena y a plantas de procesamiento.

En general, el sistema EPR de neumáticos colombianos muestra una fuerte característica de la gobernanza privada con una mínima participación del gobierno.

- Desempeño o rendimiento del sistema EPR de neumáticos colombianos: Entre el 2012 y el 2016 las unidades de neumáticos recogidos aumentaron de forma significativa. En el 2016 se recolectaron 45.800 toneladas de llantas. A pesar de esto, el porcentaje de recolección sigue siendo bajo (45%) comparado con otros países donde se supera el 90%. Las llantas fueron reencauchadas, reusadas, procesadas o quemadas. El reencauchado de llantas permaneció estable durante los 5 años, a pesar de haber disminuido durante los últimos 2. Por el

contrario, las llantas procesadas (gránulos de caucho) aumentaron constantemente durante los 5 años. La quema de llantas como combustible se dio por primera vez en el 2015 y al siguiente año se cuadruplicó las toneladas de neumáticos quemados, asimismo se espera que la recuperación de energía a partir de las llantas aumente.

El estudio del EPR de la investigación permitió identificar los factores que obstaculizan el logro de los objetivos de EPR:

- Eficacia ambiental: el sistema debe priorizar sus esfuerzos en el orden de 1) Reducir la generación de desechos de llantas (aumentando la vida útil de los autos, por ejemplo), 2) facilitar su reutilización, 3) promover el reciclaje y otras formas de recuperación del material y 4) recuperación de la energía a partir de las llantas. En Colombia el mercado de reciclaje de neumáticos aún no está bien establecido y funciona de forma ineficaz debido a la falta de capacidades de las empresas de residuos y aún existe una parte del desperdicio de llantas que se maneja a través de canales ilegales como el comercio ilegal, el regrabado de las llantas (que presenta riesgos de deslizamiento o explosión), eliminación incontrolada y quema ilegal, socavando los objetivos del EPR. Deben promoverse las opciones de recuperación de energía para evitar la acumulación de neumáticos recogidos.
- Gobernanza y estructura de incentivos: en el modelo colombiano, los usuarios finales de neumáticos no tienen ninguna responsabilidad o incentivo para devolver los productos, llevando a un bajo nivel de conciencia e interés en devolver estos residuos. Los distribuidores no están comprometidos con la recolección adecuada de las llantas y tienden a no informar a los transportistas para retirar los neumáticos a tiempo, aumentando la ineficiencia y los costos en logística. En los mercados emergentes, el reciclaje no suele ser rentable debido a la tecnología e infraestructura precaria, las pocas instalaciones de procesamiento y los altos costos de recolección y transporte; para esto, algunos gobiernos usan incentivos económicos u obligaciones legales para promover el reciclaje. En Colombia se puede aplicar el programa establecido por importadores de llantas que fue eficiente en un estado de Brasil; este consiste en que los recolectores de residuos y personas sin hogar recogen los residuos de llantas y los venden a las compañías, ayudando a los importadores a cumplir sus obligaciones legales y aprovechando los recursos con los que ya se cuenta.
- Transparencia, monitoreo y marco legal: la evaluación requiere información sobre el flujo material y monetario y de un sistema eficiente que recopile, verifique e informe los datos para calcular los indicadores relevantes (Comisión Europea, 2014). Colombia no cuenta con un sistema así. En Colombia se observó que ANLA era la única autoridad responsable de monitorear, evaluar y sancionar el sistema EPR, causando retrasos y dejando brechas en el monitoreo. Asimismo, la autoridad gubernamental debe mejorar el marco legal, establecer objetivos de reciclaje, además de objetivos de recolección y promover el desarrollo de tecnologías de reciclaje.

Adicionalmente, para garantizar eficacia ambiental del sistema 1) Mejorar marco legal definiendo y siendo flexibles con los objetivos, 2) participación de actores, proporcionando incentivos y recursos y 3) sistema eficiente de gestión de información para compilar y evaluar los datos. Por otro lado, la investigación de Rodríguez Camargo et al. (2017) concluye que, debido a la creciente

producción de residuos de llantas, los productores e importadores no alcanzan a cubrir la total recolección de estas, por lo tanto, se propone la posibilidad de generar incentivos a empresas de trituración, de reencauche o de co-procesamiento para que se responsabilicen de estas llantas que no alcanzan a recoger el sistema de gestión de residuos de los productores e importadores.

En la Tabla 2 se resumen los casos discutidos en esta sección del estudio, así como la estrategia que se utilizó en los diferentes sectores industriales y de servicio:

Tabla 2. Resumen de los casos de gestión de residuos en Colombia.

Empresa	Tipo de residuo	Estrategia	Lugar
CEMPRE	Empaques de empresas como Natura, Carvajal Empaques y tubería PAVCO	Crear una cadena donde se incluya el trabajo realizado por los recicladores del sector informal.	Bogotá
Baterías MAC	Baterías para auto al final de su vida útil	Programa de logística inversa Ecosteps, donde el usuario final juega un papel determinante en la cadena.	Todo el país
Conceptos plásticos y Bioplast	Plástico	Sistemas de logística inversa que incluyen al sector informal en los sistemas de recolección de residuos.	Medellín
-	Residuos de construcción y demolición	Programación lineal mixta con múltiples productos.	Bogotá
IPS universitaria	Residuos en el sector hospitalario	Sistema de logística inversa basado en la metodología de PHVA que cumpla con algunos lineamientos del MPIRGH.	Medellín
Empresa del sector plástico	Plástico (polipropileno)	Modelo de programación lineal multiobjetivo con ayuda de la herramienta Solver de Excel.	Cartagena
-	Aceite vehicular	Heurística del ahorro y luego se realizan agrupamientos. Identificado como un problema de enrutamiento de vehículos con capacidad.	Pereira
Unidad de riego Pantano de Vargas	Envases y empaques vacíos de plaguicidas	Modelo de simulación con creación de dos escenarios en el software especializado <i>Flexsim</i> versión 5.	Boyacá
Productores e importadores de llantas	Neumáticos al final de su vida útil	Responsabilidad ampliada del productor.	Algunas regiones del país

Fuente: Elaboración propia

## 7. Conclusiones

1. El estudio de las bases conceptuales que intervienen en el diseño de un sistema de gestión de residuos sólidos introduce al investigador en el tema, lo relaciona con la terminología pertinente, especifica los requisitos y etapas mínimas para que el sistema funcione y, además, proporciona varias alternativas que se pueden adoptar para construir y evaluar la eficiencia del sistema en cuestión.
2. Los casos empíricos investigados de los sistemas que se han desarrollado y/o mejorado en distintas regiones trabajan como un marco de referencia para determinar qué se puede aplicar a la ciudad de Ibagué a partir de las similitudes y desemejanzas con las ciudades estudiadas, además de fijar un precedente con base científica para futuras investigaciones o correcciones de la investigación actual.
3. Determinar los aspectos relevantes para el diseño de una cadena de abastecimiento de llantas usadas representan factores que no se pueden ignorar debido a que la efectividad de la cadena depende en gran parte de la correcta consideración de estos aspectos, es decir, el sistema no va a funcionar de forma efectiva si como mínimo no se tienen en cuenta aspectos de ubicación, incertidumbre, transporte, actores involucrados, entre otros.
4. El estudio realizado aporta al problema general de la investigación bases de referencia (conceptuales y empíricas) para uno de los factores más importantes de una cadena de abastecimiento inversa: el sistema de gestión de residuos. Por lo tanto, proporciona una visión general que ayuda a solucionar una de las tantas ramas y aspectos que se consideran en el diseño de una cadena inversa.
5. Algunas de las limitaciones se presentan debido a factores específicos de la ciudad de Ibagué que difieren de las ciudades estudiadas, por ejemplo, la cantidad y estado de las vías, el acceso a las tecnologías, la demanda que pueda tener este tipo de mercado, la geografía de la ciudad, entre otras.
6. En el contexto colombiano se han implementado varios sistemas de recolección de residuos que han permitido recuperar grandes cantidades de estos. La mayoría de estos sistemas se caracterizan por incluir al sector informal (recicladores y propietarios de chatarrerías), lo cual genera un beneficio económico y social para la comunidad, así como aumenta la eficiencia del sistema y facilita la trazabilidad de los residuos.
7. Las llantas usadas en Colombia cuentan actualmente con un sistema de recolección que, a pesar de haber recuperado una gran cantidad de estas, sigue desperdiciando un gran porcentaje debido a la falta de roles que se le da a la comunidad y al gobierno, dejando toda la responsabilidad bajo los productores e importadores y limitando el alcance que pueda tener este sistema.

## 8. Bibliografía

- Adeniran, A. E., Nubi, A. T., & Adelopo, A. O. (2017). Solid waste generation and characterization in the University of Lagos for a sustainable waste management. *Waste Management*, 67, 3–10. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.002>

- Agrawal, S., Singh, R. K., & Murtaza, Q. (2015). A literature review and perspectives in reverse logistics. *Resources, Conservation and Recycling*, 97, 76–92.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.02.009>
- Amponsah, S. ., & Salhi, S. (2004). The investigation of a class of capacitated arc routing problems: the collection of garbage in developing countries. *Waste Management*, 24(7), 711–721.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.01.008>
- Arena, U., & Di Gregorio, F. (2014). A waste management planning based on substance flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 85, 54–66.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.05.008>
- Armijo de Vega, C., Ojeda Benítez, S., & Ramírez Barreto, M. E. (2008). Solid waste characterization and recycling potential for a university campus. *Waste Management*, 28(SUPPL. 1).  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.03.022>
- Bautista, J., & Pereira, J. (2006). Modeling the problem of locating collection areas for urban waste management. An application to the metropolitan area of Barcelona. *Omega*, 34(6), 617–629.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.omega.2005.01.013>
- Becerra, L. L. (2017, August 17). El modelo de negocio que construye casas a partir de bloques de plástico. *La República*. Retrieved from <https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/el-modelo-de-negocio-que-construye-casas-a-partir-de-bloques-de-plastico-2537636>
- Bertanza, G., Ziliani, E., & Menoni, L. (2018). Techno-economic performance indicators of municipal solid waste collection strategies. *Waste Management*.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.009>
- Bing, X., Bloemhof, J. M., Ramos, T. R. P., Barbosa-Povoa, A. P., Wong, C. Y., & van der Vorst, J. G. A. J. (2016). Research challenges in municipal solid waste logistics management. *Waste Management*, 48, 584–592. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.025>
- Blackburn, J. D., Guide, V. D. R. J., Souza, G. C., & Wassenhove, L. N. Van. (2004). Reverse supply chains for commercial returns. *California Management Review*, 46(2), 6–22.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.2307/41166207>
- Cardozo, E. (2016). Gestión de neumáticos al final de su vida útil y las actividades de Rueda Verde.
- Carvajal Empaques. (2017). *Informe de sostenibilidad*. Cali, Colombia. Retrieved from <http://carvajalempaques.com/wp-content/uploads/2018/10/Informe-de-sostenibilidad-2017.pdf>
- Castañeda Jiménez, J., & Cardona Arias, J. A. (2017). Diseño de una Red de logística Inversa para recolectar Aceite Vehicular Usado en la ciudad de Pereira implementando CVRP. *Scientia et Technica*, 22(2), 150–160. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.22517/23447214.9243>
- Castaño, J. O., Misle Rodríguez, R., Andres Lasso, L., Gómez Cabrera, A., & Ocampo, M. S. (2013). Gestión de residuos de construcción y demolición ( RCD ) en Bogotá : perspectivas y

- limitantes. *Tecnura*, 17(38), 121–129.
- CEMPRE. (2018). Servicios - CEMPRE Colombia. Retrieved October 13, 2018, from <https://cempre.org.co/servicios/>
- Cobo, S., Dominguez-Ramos, A., & Irabien, A. (2017). From linear to circular integrated waste management systems: A review of methodological approaches. *Resources, Conservation and Recycling*, (January), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.003>
- Comisión Europea. (2014). Development of Guidance on Extended Producer Responsibility. DG Environmnet.
- Dai, L. F., & Wang, X. F. (2014). Research on Mixed Intelligent Arithmetic of Reuse Reverse Logistics Centers' Location Model. *Advanced Materials Research*, 945–949, 3246–3251. <https://doi.org/https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.945-949.3246>
- Das, S., & Bhattacharyya, B. K. (2015). Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes. *Waste Management*, 43, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.033>
- De Brito, M., & Dekker, R. (2004). A framework for reverse logistics. *ERIM Report Series Research in Management*, 1–27.
- De la Hoz, E., Vélez, J., & López, L. (2017). Modelo de Programación Lineal Multiobjetivo para la Logística Inversa en el Sector Plástico de Polipropileno. *Información Tecnológica*, 28(5), 31–36. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000500005>
- Demirbas, A. (2011). Waste management, waste resource facilities and waste conversion processes. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 1280–1287. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2010.09.025>
- DIAN. (2017). Base de datos de comercio internacional de Colombia.
- Djikanovic, J., & Vujosević, M. (2016). A new integrated forward and reverse logistics model: A case study. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 9(1), 25–35. <https://doi.org/10.1080/18756891.2016.1144151>
- El Espectador. (2016, November 17). Una empresa paisa que mitiga el impacto de los productos plásticos. *El Espectador*. Retrieved from <https://www.elespectador.com/especiales/una-empresa-paisa-mitiga-el-impacto-de-los-productos-pl-articulo-666093>
- El Tiempo. (2018, May 27). Reciclaje y disposición, un compromiso empresarial. *EL TIEMPO*. Retrieved from <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/proyectos-de-reciclaje-en-colombia-apoyados-por-empresas-privadas-222384>
- Elsaid, S., & Aghezzaf, E.-H. (2015). A framework for sustainable waste management: challenges and opportunities. *Management Research Review*, 38(10), 1086–1097. <https://doi.org/https://doi.org/10.1108/MRR-11-2014-0264>

- European Parliament and Council. (2008). Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain directives (Waste framework). [https://doi.org/2008/98/EC.; 32008L0098](https://doi.org/2008/98/EC.;32008L0098).
- Franco, F. M. (2016). Sin conciencia civil, el problema de llantas no se va a solucionar. *EL TIEMPO*.
- Ghiani, G., Laganà, D., Manni, E., Musmanno, R., & Vigo, D. (2014). Operations research in solid waste management: A survey of strategic and tactical issues. *Computers and Operations Research*, *44*, 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.10.006>
- Ghiani, G., Manni, A., Manni, E., & Toraldo, M. (2014). The impact of an efficient collection sites location on the zoning phase in municipal solid waste management. *Waste Management*, *34*(11), 1949–1956. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.05.026>
- Gilardino, A., Rojas, J., Mattos, H., Larrea-Gallegos, G., & Vázquez-Rowe, I. (2017). Combining operational research and Life Cycle Assessment to optimize municipal solid waste collection in a district in Lima (Peru). *Journal of Cleaner Production*, *156*, 589–603. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.005>
- Gómez, R. A., Zuluaga, A., & Correa, A. A. (2014). Propuesta de sistema de logística inversa para el sector hospitalario: un enfoque teórico y práctico en Colombia. *Ingenierías USBMed*, *5*(1), 35–52. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21500/20275846.299>
- Goulart Coelho, L. M., & Lange, L. C. (2018). Applying life cycle assessment to support environmentally sustainable waste management strategies in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, *128*, 438–450. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.026>
- Greco, G., Allegrini, M., Del Lungo, C., Gori Savellini, P., & Gabellini, L. (2015). Drivers of solid waste collection costs. Empirical evidence from Italy. *Journal of Cleaner Production*, *106*, 364–371. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.011>
- Guerrero, L. A., Maas, G., & Hogland, W. (2013). Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste Management*, *33*(1), 220–232. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.008>
- Huang, G. H., & Chang, N. B. (2003). The perspectives of environmental informatics and systems analysis. *Journal of Environmental Informatics*, *1*(1).
- Jaunich, M. K., Levis, J. W., DeCarolis, J. F., Gaston, E. V., Barlaz, M. A., Bartelt-Hunt, S. L., ... Jaikumar, R. (2016). Characterization of municipal solid waste collection operations. *Resources, Conservation and Recycling*, *114*, 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.07.012>
- JRC – Joint Research Centre. (2014). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Non-Ferrous Metals Industries. Seville. Retrieved from [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/NFM\\_Final\\_Draft\\_10\\_2014.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/NFM_Final_Draft_10_2014.pdf).
- Kannan, G., Palaniappan, M., Zhu, Q., & Kannan, D. (2012). Analysis of third party reverse logistics

- provider using interpretive structural modeling. *International Journal of Production Economics*, 140(1), 204–211. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.01.043>
- Kayakutlu, G., Daim, T., Kunt, M., Altay, A., & Suharto, Y. (2017). Scenarios for regional waste management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 1323–1335. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.11.147>
- Kinobe, J. R., Gebresenbet, G., Niwagaba, C. B., & Vinnerås, B. (2015). Reverse logistics system and recycling potential at a landfill: A case study from Kampala City. *Waste Management*, 42, 82–92. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.012>
- Kinobe, J. R., Gebresenbet, G., & Vinnerås, B. (2012). Reverse logistics related to waste management with emphasis on developing countries-A review paper. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 1(1), 1104–1118.
- Leblanc, R. (2016). Integrated Solid Waste Management (ISWM) - An Overview. *Sustainable Businesses*.
- MAC. (2016). Conciencia Ambiental - Baterías MAC. Retrieved October 8, 2018, from <https://www.bateriasmac.com/es-co/ambiental>
- Maldonado, L. (2006). Reduction and recycling of urban waste at higher education institutions: a case study. *Revista Ingeniería*, 10(1), 59–68.
- Martínez-Giraldo, J. Sarache-Castro, W. . (2014). Green supply chains: Conceptual bases and trends. In *Green supply chains. Applications in agroindustries* (pp. 13–26). Manizales.
- Ministerio de Medio Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Resolución 1457 de 2010. Bogotá. Retrieved from [https://www.arsura.com/images/stories/documentos/res1457\\_2010.pdf](https://www.arsura.com/images/stories/documentos/res1457_2010.pdf)
- Ministerio de Transporte. (2015). Transporte en Cifras: Estadísticas 2015.
- Moreno Torres, F. (2015). *Reciclar tiene valor*. Retrieved from [http://cempre.org.co/wp-content/uploads/2017/05/reciclar\\_tiene\\_valor.pdf](http://cempre.org.co/wp-content/uploads/2017/05/reciclar_tiene_valor.pdf)
- Muralikrishna, I. V., & Manickam, V. (2017). Chapter five - Life Cycle Assessment. In Butterworth-Heinemann (Ed.), *Environmental Management* (pp. 57–75). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811989-1.00005-1>
- Mwanza, B. G., Mbohwa, C., & Telukdarie, A. (2018). The Influence of Waste Collection Systems on Resource Recovery: A Review. *Procedia Manufacturing*, 21, 846–853. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.192>
- Natura. (n.d.). Reciclaje | Natura. Retrieved October 14, 2018, from <https://www.natura.com.mx/natura/sustentabilidad/Iniciativas/Sociedad-Reciclaje>
- Newbert, S. (2007). Empirical research on the resource-based view of the firm: an assessment and

- suggestions for future research. *Strategic Management Journal*, 28, 121–146.
- Nuortio, T., Kytöjoki, J., Niska, H., & Bräysy, O. (2006). Improved route planning and scheduling of waste collection and transport. *Expert Systems with Applications*, 30(2), 223–232.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eswa.2005.07.009>
- Oguntoyinbo, O. O. (2012). Informal waste management system in Nigeria and barriers to an inclusive modern waste management system: A review. *Public Health*, 126(5), 441–447.  
<https://doi.org/10.1016/j.puhe.2012.01.030>
- Orhan, A. (2011). Eco-economy in sustainable development and waste exchange, a new approach regarding waste management. *Middle East Finance and Economics*, 10, 41–50.
- Panagiotidou, S., & Tagaras, G. (2005). End-of-life tire recovery: the Thessaloniki initiative. *Managing Closed-Loop Supply Chains*, 183–193. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/3-540-27251-8\\_17](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/3-540-27251-8_17)
- Park, J., Díaz-posada, N., & Mejía-dugand, S. (2018). Challenges in implementing the extended producer responsibility in an emerging economy : The end-of-life tire management in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 189, 754–762.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.058>
- Pavco. (2017). Programa “Recicle con Pavco.” Retrieved October 14, 2018, from <https://pavco.com.co/sustentabilidad-pavco>
- Pavco. (2018). Recicle con Pavco [Archivo de video]. Pavco Colombia. Retrieved from [https://www.youtube.com/watch?v=iufqrC\\_CQ4w](https://www.youtube.com/watch?v=iufqrC_CQ4w)
- Pedram, A., Yusoff, N. Bin, Udony, O. E., Mahat, A. B., Pedram, P., & Babalola, A. (2017). Integrated forward and reverse supply chain: A tire case study. *Waste Management*, 60, 460–470. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.029>
- Phuc, P. N. K., Yu, V. F., & Tsao, Y. C. (2017). Optimizing fuzzy reverse supply chain for end-of-life vehicles. *Computers and Industrial Engineering*, 113, 757–765.  
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.11.007>
- Pokharel, S., & Mutha, A. (2009). Perspectives in reverse logistics: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(4), 175–182.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.11.006>
- Quintero, K. (2012, March). Sector privado colombiano le apuesta al reciclaje y la inclusión social. *El Empaque*. Retrieved from <http://www.elempaque.com/temas/Sector-privado-colombiano-le-apuesta-al-reciclaje-y-la-inclusion-social+4087129?pagina=2>
- Rodríguez Camargo, S., López Franco, J. A., Chud Pantoja, V. L., & Gómez Osorio, J. C. (2017). Modelo de simulación dinámica para evaluar el impacto ambiental de la producción y logística inversa de las llantas. *Ingeniería Y Desarrollo*, 35(2).  
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14482/inde.35.2.10165>

- Rueda Verde. (2014). *Informe anual de EPR: el año 2013*.
- Rueda Verde. (2016). *Informe anual de EPR: el año 2015*.
- Sakai, S., Noma, Y., & Kida, A. (2007). End-of-life vehicle recycling and automobile shredder residue management in Japan. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 9(2), 151–158.
- Sasikumar, P., Kannan, G., & Haq, A. N. (2010). A multi-echelon reverse logistics network design for product recovery – a case of truck tire remanufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49(9–12), 1223–1234.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-009-2470-4>
- Silva, J. D., & Contreras, E. D. (2015). Simulación de un proceso de logística inversa: recolección y acopio de envases y empaques vacíos de plaguicidas. *Entre Ciencia E Ingeniería*, 9(18), 16–22.  
 Retrieved from [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-83672015000200003&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-83672015000200003&lng=en&tlng=es).
- Subulan, K., Taşan, A. S., & Baykasoğlu, A. (2015). *Designing an environmentally conscious tire closed-loop supply chain network with multiple recovery options using interactive fuzzy goal programming*. *Applied Mathematical Modelling* (Vol. 39).  
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.11.004>
- Tadesse, T., Ruijs, A., & Hagos, F. (2008). Household waste disposal in Mekelle city, Northern Ethiopia. *Waste Management*, 28(10), 2003–2012.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.015>
- Tibben-Lembke, R., & Rogers, D. (2002). Differences between forward and reverse logistics in a retail environment. *Supply Chain Management: An International Journal*, 7(5), 271–282.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1108/13598540210447719>
- Vidanaarachchi, C. K., Yuen, S. T. S., & Pilapitiya, S. (2006). Municipal solid waste management in the Southern Province of Sri Lanka: Problems, issues and challenges. *Waste Management*, 26(8), 920–930. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.09.013>
- Wang, G., Qin, L., Li, G., & Chen, L. (2009). Landfill site selection using spatial information technologies and AHP: A case study in Beijing, China. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2414–2421. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.12.008>
- Wilson, D. C., Rodic, L., Modak, P., Soos, R., Carpintero, A., Velis, C., ... Simonett, O. (2015). Global Waste Management Outlook. *United Nations Environment Programme (UNEP) and International Solid Waste Association*.
- Zhang, Y. M., Huang, G. H., & He, L. (2011). An inexact reverse logistics model for municipal solid waste management systems. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 522–530.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.09.011>