Diseño de la cadena de suministro inversa para la generación de valor a partir de llantas usadas. Un caso urbano: Ibagué

Maestrante:

Robinson Johan Beltrán Varón

Facultad de Ingeniería
Maestría en Gestión Industrial
Ibagué, julio de 2020

Diseño de la cadena de suministro inversa para la generación de valor a partir de llantas usadas. Un caso urbano: Ibagué

Maestrante:

Robinson Johan Beltrán Varón

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de

MAGISTER EN GESTIÓN INDUSTRIAL

Director:

Dr. Ing. Andrés Alberto García León

Co-director:

Ph.D. Yasel Costa Salas

Facultad de Ingeniería
Maestría en Gestión Industrial
Ibagué, julio de 2020

Agradecimientos

El desarrollo del presente trabajo no habría tenido lugar sin el apoyo y guía del Dr Andrés García quien orientó y fue participe activo en todo el desarrollo del proyecto y contribuyó a mi formación profesional.

Así mismo guardo un enorme agradecimiento con la Universidad de Ibagué, en especial con su planta docente quienes con su enseñanza me han formado.

Todos mis logros se los debo a mis padres. Siempre han estado a mi lado apoyando mis decisiones, acompañando mis éxitos y aliviando esos malos momentos que llegué a llamar derrotas. Así mismo agradezco a mis familiares y amigos por estar siempre presentes.

A mi novia quien en los días difíciles me ha motivado a superarme, me ha ofrecido su consejo y siempre encuentra lo positivo de las situaciones.

Agradezco a Dios por rodearme de personas maravillosas que me hacen mejor cada día.

Contenido

Capítulo 1. Formulación del problema 1

1.1 Planteamiento del problema 1

1.2 Objetivos 4

1.2.1 Objetivo general 4

1.2.2 Objetivos específicos 4

Capítulo 2. Marco de Referencia 5

2.1 Marco teórico 5

2.1.1 Cadenas de suministro 5

2.1.2 Cadenas de suministro inversas 6

2.1.3 Criterios de evaluación 9

2.1.3.1 Pilar económico 10

2.1.3.2 Pilar ambiental 10

2.1.3.3 Pilar social 14

2.2 Estado del arte 14

2.2.1 Consideraciones metodológicas para la construcción del estado del arte 15

2.2.2 Generalidades 17

2.2.3 Diseño de red 17

2.2.4 Fuentes de incertidumbre en la cadena de abastecimiento 18

2.2.5 Eslabones de la cadena de abastecimiento 18

2.2.6 Utilización de las LFU 18

2.2.7 Decisiones de ubicación dentro de la cadena de abastecimiento 19

2.2.8 Función objetivo y metodología de solución 19

2.2.9 Casos de estudio 20

2.2.10 Vacío científico 22

Capítulo 3. Metodología 24

3.1 Objeto de estudio 24

3.2 Estrategia metodológica 24

Capítulo 4. Sistemas de gestión de residuos de llantas usadas 28

4.1 Un modelo de gestión de llantas usadas exitoso: La Unión Europea 28

4.1.1 Sistemas implementados para la gestión de llantas usadas 28

4.1.2 Actores y funcionamiento de la cadena de recuperación 30

4.1.3 Resultados de la implementación 32

4.2 La gestión de llantas usadas en Colombia 33
4.2.1 Sistema implementado para la gestión de llantas usadas 33
4.2.2 Actores y funcionamiento de la cadena de recuperación 35
4.2.3 Resultados de la implementación 39
4.3 La gestión de llantas usadas en Ibagué 41
Capítulo 5. Diseño de la cadena de suministro inversa 43
5.1 Estructura de la cadena de suministro inversa 43
5.2 Presentación del caso de estudio Ibagué 45
5.2.1 Generación teórica de llantas usadas en Ibagué 45
5.2.2 Generadores de llantas usadas y cantidades 47
5.2.3 Alternativas de ubicación para un centro de acopio multipropósito 49
5.2.4 Alternativas tecnológicas a implementar en el centro de acopio multipropósito 50
5.2.5 Ubicación de plantas de recuperación para subproductos de la cadena 51
5.2.6 Criterios para evaluar el desempeño de la cadena de suministro 52
5.2.6.1 Desempeño económico 53
5.2.6.2 Desempeño ambiental 53
5.2.6.3 Desempeño social 53
5.3 Formulación matemática 58
5.3.1 Supuestos del modelo 59
5.3.2 Definición de variables y parámetro del modelo. 59
5.3.3 Formulación de funciones objetivo 61
5.3.4 Definición de restricciones del modelo 64
Capítulo 6. Resultados computacionales 67
6.1 Una visión mono – objetivo 67
6.2 Optimización multi – objetivo 71
6.3 Evaluación de escenarios 74
6.3.1 Exclusión del costo de apertura del centro de acopio 74
6.3.2 Variación de la capacidad del centro de acopio. 75
Capítulo 7. Conclusiones y limitaciones 77
7.1 Conclusiones 77
7.2 Limitaciones 78
7.3 Resultados académicos 79
Bibliografía…. 80
Anexos…… 88

Lista de Tablas

Tabla 3-1 Matriz para el registro de información 24
Tabla 3-2 Codificación de los elementos de la matriz para el registro de información 25
Tabla 4-1 Empresas sin ánimo de lucro en países con REP en la UE 29
Tabla 4-2 Normatividad de programas de posconsumo en Colombia 34
Tabla 4-3 Umbrales de aplicación de la Resolución 1326 de 2017 34
Tabla 4-4 Metas de recolección propuestas en la Resolución 1326 de 2017 35
Tabla 4-5 Sistemas de recolección selectiva de llantas usadas en Colombia 39
Tabla 4-6 Recuperación de llantas usadas en campañas realizadas por Cortolima 41
Tabla 5-1 Parque automotor de la ciudad de Ibagué entre los años 2010 y 2017 45
Tabla 5-2 Proyección del Parque automotor de la ciudad de Ibagué 46
Tabla 5-3 Tasa de reposición por tipo de vehículo en Ibagué 47
Tabla 5-4 Estimación y proyección de llantas usadas generadas en Ibagué 47
Tabla 5-5 Generadores de llantas usadas Ibagué 48
Tabla 5-6 Alternativas tecnológicas a implementar en el centro de acopio multipropósito 51
Tabla 5-7 Perfil de los expertos consultados 55
Tabla 5-8 Escala utilizada para la comparación de pares en el método AHP 56
Tabla 5-9 Parámetros utilizados en el modelo de optimización matemática 60
Tabla 5-10 Sub-índices utilizados en el modelo de optimización matemática 61
Tabla 5-11 Variables utilizadas en el modelo de optimización matemática 61
Tabla 6-1 Descripción general del modelo objeto de estudio 67
Tabla 6-2 Resultados de la optimización bajo la visión mono-objetivo 67
Tabla 6-3 Resultados de la optimización bajo la visión multi-objetivo 71

Lista de Figuras

Figura 1-1 Progresión del parque automotor en Ibagué 3

Figura 2-1 Procesos involucrados en una cadena de suministro 6

Figura 2-2 Opciones de disposición de productos en procesos de CLCS 8

Figura 2-3 Metodología para la revisión de literatura 15

Figura 2-4 Jerarquización de las Palabras Clave 16

Figura 2-5 Características evaluadas en cada artículo científico 17

Figura 2-6 Actores clave de la cadena de abastecimiento 18

Figura 2-7 Alternativas evaluadas para la disposición final de las LFU 19

Figura 4-1 Distribución del Ecovalor en Francia 29

Figura 4-2 Cadena de recuperación de llantas usadas en la Unión Europea. 30

Figura 4-3 Destino de las llantas usadas en la UE en el año 2017 33

Figura 4-4 Cadena de recuperación de llantas usadas en Colombia 36

Figura 5-1 Cadena de abastecimiento inversa propuesta para la recuperación de LFU 43

Figura 5-2 Propuesta de funcionamiento del centro de acopio multipropósito 44

Figura 5-3 Alternativas de ubicación para el centro de acopio multipropósito 49

Figura 5-4 Destinos para los subproductos de llantas usadas 52

Figura 5-5 Evaluación de la cadena de suministro inversa de llantas usadas 55

Figura 5-6 Pesos de las medidas de desempeño según los expertos 57

Figura 5-7 Pesos de subcriterios del pilar social según los expertos 57

Figura 5-8 Pesos de las alternativas de ubicación considerando el subcriterio desarrollo local 58

Figura 5-9 Pesos de las alternativas tecnológicas subcriterio seguridad laboral 58

Figura 6-1 Progresión en el tiempo de la utilidad generada en el centro de acopio. 68

Figura 6-2 Contribución al Eco-indicador por proceso en la cadena de suministro 69

Figura 6-3 Componentes del pilar social 70

Figura 6-4 Tasa de recuperación de LFU de la cadena de suministro 70

Figura 6-5 Progresión del componente económico en el tiempo para la optimización multi-objetivo 72

Figura 6-6 Distribución del costo 72

Figura 6-7 Progresión del eco-indicador en el tiempo optimización multi-objetivo 73

Figura 6-8 Composición del pilar social en la optimización multi-objetivo 73

Figura 6-9 Tasa de recuperación de LFU Vs Utilización de capacidad 74

Figura 6-10 Tasa de recuperación de LFU Vs Utilización de capacidad diésel sintético 75

Figura 6-11 Medidas de desempeño en función del aumento de la capacidad 76

Resumen

La creciente preocupación mundial por el cuidado del medio ambiente ha promovido el estudio de cadenas de suministro inversas volcadas a la recuperación de residuos. Los residuos derivados de llantas son cada vez mayores debido al crecimiento continuo del parque automotor mundial. La mala gestión de este residuo tiene afectaciones directas sobre el medio ambiente y sobre la salud pública. Por otra parte, la ciudad de Ibagué presenta las mayores tasas de desempleo del país y la industria manufacturera cada vez es más débil y su aporte al PIB departamental es bajo, por lo cual la economía de la ciudad es apalancada en gran parte por el comercio. Considerando estas situaciones el presente estudio se propone el diseño de una cadena de suministro inversa para la recuperación de llantas usadas en la ciudad de Ibagué. Se formula un problema de Programación Lineal Entera Mixta con múltiples objetivos (ambiental, social y económico), múltiples periodos de tiempo y se propone una doble toma decisión en cuanto a la localización y la implementación tecnológica en un centro de acopio multipropósito.

Este documento consta de siete capítulos. En el primero se detalla la problemática que incentiva la presente investigación. Las premisas teóricas y estudios que han aportado al estado de la materia son abordados en el segundo capítulo. En el tercer capítulo se presentan las consideraciones metodologías que guiaron la presente investigación en cada una de sus etapas. El cuarto capítulo presenta el funcionamiento y resultados que han alcanzado los sistemas de gestión de residuos en Europa, Colombia y el contexto de Ibagué.

En el quinto capítulo se realiza el diseño de la cadena de suministro inversa, se presentan detalladamente los actores que participan en la cadena (generadores de llantas usadas, centro de acopio multipropósito y plantas de recuperación) y sus interacciones. Así mismo se presenta la modelación matemática y se declaran los supuestos que rigen el modelo. El sexto capitulo presenta los resultados computaciones de la optimización del modelo propuesto desde dos perspectivas (mono-objetivo y multi-objetivo), de igual forma se realizan variaciones sobre algunos parámetros para analizar el comportamiento del sistema. Finalmente, en el séptimo capitulo se consolidan las conclusiones, se discuten perspectivas para futuras investigaciones y se presentan las limitaciones que afrontó este estudio.

Capítulo 1. Formulación del problema

En el presente capitulo se presenta: la problemática objeto de investigación, las preguntas que orientaron la investigación y los objetivos propuestos que contribuyen a dar respuestas a los interrogantes planteados. Adicionalmente se presenta la justificación del estudio.

1.1 Planteamiento del problema

En los últimos años ha aumentado el estudio de problemas relacionados con la gestión de productos al final de su vida útil en un intento por mitigar el impacto sobre el medio ambiente y reducir los costos de fabricación al devolver componentes al proceso productivo (Braz et al., 2018). Las llantas usadas no son ajenas a esta problemática con el agravante de que su composición química: aproximadamente 41% de caucho tanto sintético como natural, entre 29 y 31% de carbón y el restante es una mezcla de textiles, antioxidantes y otras sustancias orgánicas e inorgánicas los hacen resistentes a la biodegradación y a la descomposición bioquímica, en tanto, se ha convertido en un tema de interés mundial porque el aumento de los vehículos motorizados conlleva a un mayor consumo de llantas, lo cual es explicado por que actualmente se generan en el mundo cerca de 17 millones de toneladas de llantas fuera de uso "LFU" (Chen et al., 2018).

Ante el creciente número de LFU muchos países y en especial los de la Unión Europea, han optado por la implementación de la responsabilidad extendida al productor como estrategia para incentivar el rediseño del producto y la economía circular (Sebola et al., 2018). Mediante procesos de investigación se han logrado incorporar tecnologías para la fabricación de nuevos productos y encontrar nuevos usos para generar valor a partir de este desecho. Las nuevas alternativas para aprovechar los residuos de LFU han generado oportunidades de negocios que están siendo aprovechadas en múltiples sectores. Por ejemplo, en obras de ingeniería civil se usa el caucho de LFU en la mezcla asfáltica para vías lo cual mejora las propiedades y rendimiento del pavimento (Shu & Huang, 2014); también se ha incursionado en el uso de esté residuo en mezclas de concreto (Thomas & Gupta, 2016). Sin embargo, en la actualidad el mercado que mayor cantidad de este residuo dispone es la generación de energía, el cual es utilizado principalmente en hornos para la fabricación de cemento debido al alto valor calorífico, lo que lo convierte en sustituto del carbón y otros combustibles (Machin et al., 2017). Otros usos para los desechos de LFU es el reencauche, producción de césped sintético, fabricación de losetas para construcción, gránulo de caucho, plantillas de zapatos, artesanías, entre otros (Sienkiewicz et al., 2012).

Para el año 2016, 22 países de la Unión Europea (UE) contaban con legislación de responsabilidad extendida al productor para LFU, para este mismo año la UE logró recuperar, reciclar o reutilizar 3,35 millones de toneladas de LFU que representa el 95% de los residuos de este tipo, siendo el 29% destinado a la generación de energía, el 51% fue reciclado, tan solo el 3% fue utilizado en obras de ingeniería civil, mientras que el 17% fue reutilizado para la fabricación de llantas nuevas (ETRMA, 2018b). Estados Unidos está un paso atrás de la UE en materia de disposición final de las LFU. En el año 2017 generó 4,19 millones de toneladas de este residuo logrando reutilizar, reciclar o recuperar el 81,4%, mientras que el 15,5% fue dispuesto en rellenos sanitarios o incinerado bajo condiciones contraladas. Al analizar el uso que Estados Unidos dio a las LFU se evidencia un comportamiento similar al de la UE, el mercado de la generación de energía y la producción de gránulo de caucho utilizaron el 65% de las LFU generadas por los Estados Unidos (USTMA, 2018).

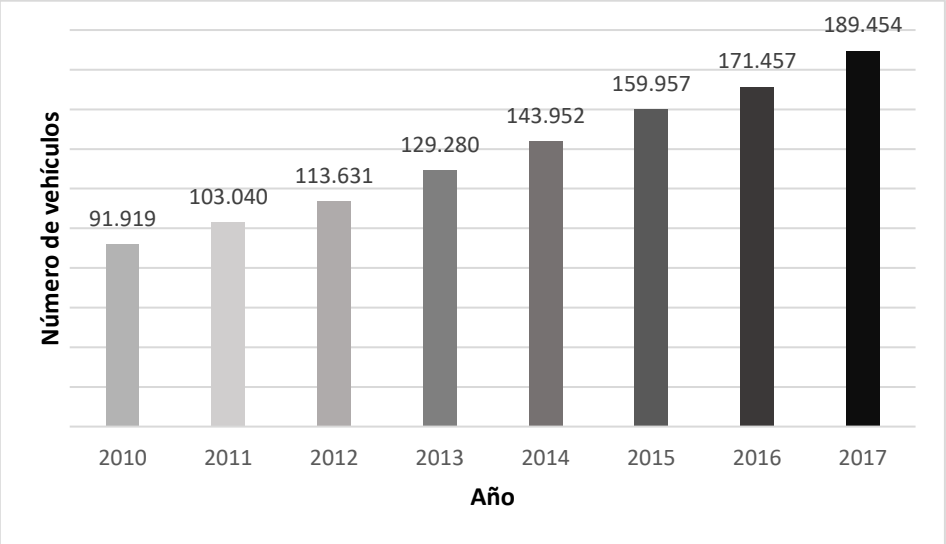
En Colombia anualmente se generan más de 5 millones de LFU, lo que equivale a 100 mil toneladas de residuos de este tipo, logrando recuperar, reciclar o reutilizar el 35% (MADS, 2017). Si bien en los últimos años la cantidad de LFU recuperadas han ido en aumento aún se está muy lejos de UE o los Estados Unidos. En el país existen aproximadamente 22 empresas dedicadas al procesamiento y gestión de residuos de LFU y 87 reencauchadoras (Park et al., 2018), las cuales presentan falencias en el desarrollo de investigaciones científicas que apalanque el sector y promueva el desarrollo de nuevos productos y aplicaciones para el desecho de LFU. Otro obstáculo a superar por las empresas colombianas dedicadas a la recuperación de LFU es la comercialización de los productos generados a partir de este residuo, dado que sólo se logra comercializar entre el 50 y 60% de su producción (El Tiempo, 2016). Esto indica que la producción no vendida debe permanecer almacenada en las plantas de procesamiento lo cual genera costos de inventario y presión financiera (Park et al., 2018).

Un riesgo de la inadecuada gestión de los residuos de LFU es que su forma e impermeabilidad facilita la proliferación de roedores, serpientes o mosquitos que son vectores de enfermedades graves, adicionalmente las LFU representan una amenaza de incendio, el cual es difícil de extinguir y altamente contaminante para suelos, agua y aire (Ramarad et al., 2015). Ejemplo de ello es el incendio que se presentó en la localidad de Fontibón (Bogotá) en el año 2014 en una bodega que almacenaba cerca 600.000 llantas usadas. Las autoridades tardaron cerca de 3 días para extinguir el incendio, pero el daño al medio ambiente fue evidente y afectó la calidad del aire en cuatro localidades cercanas. Las autoridades estimaron que la contaminación era equivalente a la generada por un millón de carros transitando por la zona (El Tiempo, 2014). Finalmente, los rellenos sanitarios han sido uno de los destinos finales para las LFU, sin embargo, es un destino no deseado ya que tiene un impacto negativo sobre el medio ambiente y sobre las propiedades del suelo (Ramarad et al., 2015).

El gobierno colombiano ha optado por la implementación de la responsabilidad ampliada al productor para el caso de las LFU, lo cual está descrito en la resolución 1326 del 2017 que establece los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental para las LFU. Según esta resolución los productores e importadores de llantas que superen unos umbrales de venta de llantas tienen la obligación de formular, presentar e implementar los sistemas de gestión selectiva y gestión ambiental; adicionalmente se establece la responsabilidad de que los productores e importadores deberán recolectar y gestionar una cantidad de LFU en función del promedio de las llantas puestas en el mercado en los dos últimos años. El porcentaje de recolección de LFU establecido para el año 2018 fue del 45%, y se espera incremente anualmente hasta alcanzar el 80% en el año 2025.

En Ibagué, no existe una estadística que indique la cantidad de llantas comercializadas ni tampoco se ha estimado la cantidad de LFU generadas. Sin embargo, el parque automotor de la ciudad representa una referencia en relación con la problemática, ya que las llantas son un producto de consumo intermedio de los vehículos, es decir, a mayor cantidad de vehículos, mayor consumo de llantas lo cual repercute en mayor número de LFU. De acuerdo con la Figura 1-1 se pasó de tener un parque automotor en el 2010 de 91.919 vehículos a uno de 189.454 en el 2017, lo cual representa un aumento del 106% en 7 años, dicho en otras palabras el consumo de llantas en la ciudad ha tenido un incremento significativo en los últimos 7 años. Al aumento en la generación de desechos de LFU hay que sumarle que la ciudad no cuenta con un lugar de recolección de este tipo de residuos. En el caso de las llantas solo se hacen de manera esporádica liderada por instituciones gubernamentales y por programas de índole nacional.

Figura 1-1 Progresión del parque automotor en Ibagué



Fuente: Elaboración propia con base (CIMPP, 2018)

Rueda Verde fue el primer programa posconsumo de llantas en el país, en la actualidad cuenta con 237 puntos de recolección residencial o doméstico, 1.382 usuarios empresariales o institucionales y presenta cobertura en 20 departamentos del país, pero aún no hace presencia en el departamento del Tolima. Se estima que Rueda Verde ha recogido y gestionado más de 6’500.000 LFU en los últimos cuatro años (Rueda Verde, 2019).

El acelerado aumento del parque automotor en la ciudad de Ibagué lleva consigo a un aumento en los volúmenes de LFU, si a esto se le suma la ausencia de un punto de recolección o un sistema de gestión de residuos para LFU, hace que la problemática se agudice con el paso del tiempo. De no realizar acciones efectivas para la disposición de las LFU en Ibagué existe un alto riesgo para el medio ambiente y la salud humana.

La ciudad de Ibagué en los últimos años ha presentado las mayores tasas de desempleo del país. La economía de la ciudad depende, en gran medida, del sector comercial, que es el que mayor número de personas emplea (22,5%). Por otra parte, las empresas dedicadas a la transformación son pocas y con el paso del tiempo el aporte de este sector al PIB departamental ha disminuido progresivamente hasta llegar al 9,4% en el año 2018 (DANE, 2019).

Considerando la situación de la ciudad de Ibagué es necesario el diseño de una cadena de suministro que contribuya a la recuperación de LFU en la ciudad de Ibagué. Permitiendo generar alternativas que añadan valor a un recurso que es considerado un desecho, contribuir a la generación de empleo en una ciudad donde las cifras son alarmantes y aportar al cumplimiento de uno de los objetivos de desarrollo sostenible como lo es la producción y consumo responsable potenciado por la entrada en rigor de la resolución 1326 del 2017.

¿Cómo diseñar y modelar una cadena de abastecimiento inversa para la recuperación de llantas usadas considerando el impacto ambiental, social y los rendimientos económicos en un contexto urbano (Ibagué)?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Diseñar una cadena de abastecimiento inversa para la recuperación de llantas usadas para la ciudad de Ibagué, considerando el impacto de las variables sobre el desempeño de la red en función del beneficio económico, social y ambiental.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Definir bases teóricas mediante el estudio de investigaciones relacionadas, identificando los elementos comúnmente estudiados en el diseño de cadenas inversas de llantas usadas.
2. Caracterizar los actores claves involucrados en la cadena inversa de suministro de las llantas usadas en la ciudad de Ibagué, definiendo: variables, restricciones y medidas de desempeño que regirán la cadena de suministro de llantas usadas considerando criterios económicos, sociales y ambientales.
3. Formular a través de modelos de optimización matemática, alternativas de configuración de la cadena de suministro de llantas usadas para la ciudad de Ibagué.
4. Realizar un análisis de sensibilidad sobre los parámetros con el fin de comprobar la validez del modelo y de la metodología de solución.

Capítulo 2. Marco de Referencia

El presente marco de referencia comprende dos grandes componentes: Marco teórico y Estado del arte. En el Marco teórico se presentan conceptos relacionados con cadenas de suministro, logística inversa, gestión de residuos, entre otros conceptos que son transversales a la investigación como por ejemplo logística urbana. Por otra parte, en el Estado del arte se presenta una revisión de literatura de investigaciones que estudiaron específicamente cadenas de suministro inversas para LFU, detallando: diseños de red, criterios de evaluación utilizados (económicos, ambientales, sociales o desempeño), naturaleza de los parámetros utilizados, fuentes de incertidumbre, decisiones de ubicación, inventario y transporte.

2.1 Marco teórico

El diseño de cadenas de suministro en la actualidad requiere de un enfoque integral o en otros términos una "visión holística". En donde la cadena debe ser analizada como un todo y no ser descrita únicamente por los actores que la componen. Este enfoque requiere evaluar una cadena de suministro más allá del factor económico e integrar implicaciones ambientales, sociales, relacionamiento con clientes, encadenamiento de valor, por enunciar algunas.

En este apartado se analizarán los componentes teóricos de relevancia a considerar en el diseño de una cadena de suministro inversa.

2.1.1 Cadenas de suministro

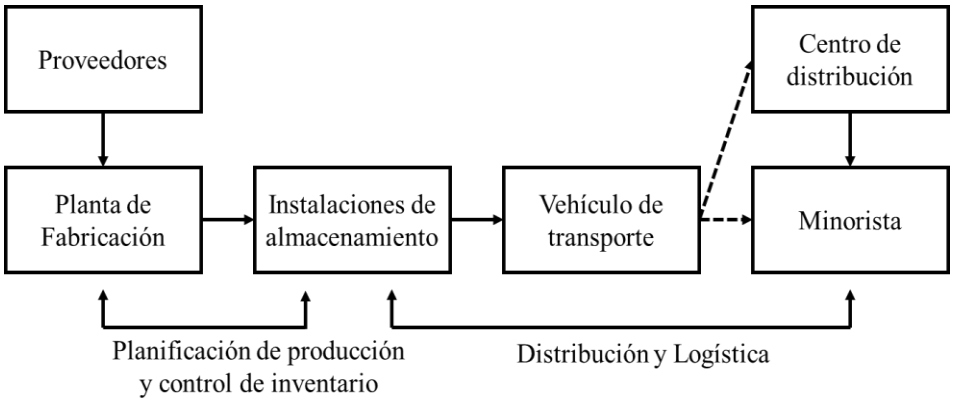
Antes de conceptualizar una cadena de suministro inversa (CSI), es necesario comprender los conceptos básicos relacionados con cadena de suministro (CS). Chopra & Meindl (2008) conciben la CS como la interacción de varios actores que trabajan directa o indirectamente para satisfacer las necesidades y deseos del cliente; los actores además del fabricante y proveedores incluye comercializadores, transportistas, almacenistas, prestadores de servicios y por supuesto al cliente o consumidor. Ballou (2004), quien es considerado pionero de la concepción moderna de CS, ofrece un concepto en el mismo sentido, argumentando que una CS es el "conjunto de actividades funcionales (transporte, control de inventarios, etc.) que se repiten muchas veces a lo largo del canal de flujo, mediante las cuales la materia prima se convierte en productos terminados y se añade valor para el consumidor".

Un concepto más simple indica que una CS no es más que la relación establecida entre actores, uno de ellos el proveedor inicial que entrega un producto (sea materia prima, producto procesado o producto terminado) a un cliente. Cliente que al mismo tiempo es proveedor de otro cliente, este juego de roles se repite hasta que se llega a un cliente final que consume ese "artículo" que fue transformado y entregado sucesivamente (Caddy & Helou, 2007).

Considerando los conceptos previos, se entiende que la CS es el conjunto de distintos actores que se relacionan entre ellos, con el objetivo de cumplir los requerimientos y necesidades de un cliente (que no siempre es el consumidor final). Estas interacciones posibilitan la creación de un bien o la prestación de un servicio que en el mejor de los casos genera valor para cada uno de los actores involucrados. En la Figura 2-1 Beamon (1998) propone una CS con seis elementos. Inicia con los proveedores que aprovisionan la planta de fabricación con materias primas para la elaboración de los productos; una vez fabricados los productos, se envían a las instalaciones de almacenamiento para

luego transportarlos a los centros de distribución o a los minoristas a través de vehículos de transporte. Adicional a esto se puede evidenciar que la interacción entre la planta de fabricación y el almacenamiento son parte de la planificación de producción y el control de inventario, y que a partir del almacenamiento hasta el centro de distribución o los minoristas, se realiza la distribución y logística.

Figura 2-1 Procesos involucrados en una cadena de suministro



Fuente: (Beamon, 1998)

Un concepto estrechamente ligado a las CS es el de logística. Hasta antes de la década de los 80 el termino logística estaba limitado al ámbito militar. En esta década se fortalece el concepto y se empieza a aplicar fuertemente dentro y fuera de las empresas, para describir el flujo de productos, servicios y toda la información que contribuya a la toma de decisiones informadas (Georgia Tech, 2017). De acuerdo con el *Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP)* la logística comprende el proceso de planear, implementar y controlar el flujo y el almacenamiento eficiente, buscando las mejores oportunidades en la adquisición de materias primas, gestión de inventarios y gestión de la información, con el propósito de satisfacer los requerimientos/necesidades de los clientes (CSCMP, 2018).

Las actividades logísticas con frecuencia abarcan la gestión del transporte (entradas y salidas), el almacenamiento, el cumplimiento de órdenes, el manejo de materiales, el diseño de la red logística, la gestión de inventario, la planificación de la oferta y de la demanda, así como la gestión de proveedores de servicios logísticos externos. En diversos grados, la función logística también incluye el abastecimiento y la adquisición, la planificación y programación de la producción, el embalaje y el montaje, y el servicio al cliente (CSCMP, 2018). Las actividades relacionadas con la función logística se proponen crear valor de tiempo y de lugar para el cliente, en la medida en que se encuentren orientados a los procesos de aprovisionamiento, almacenamiento y transporte (Caddy & Helou, 2007).

2.1.2 Cadenas de suministro inversas

La logística inversa es descrita como una práctica operativa que recupera materiales desechos para reingresarlos en la cadena de suministro para la fabricación de productos nuevos o usados mediante prácticas de reutilización, remanufactura y/o reciclaje (Siew & Mohamed, 2013). Así mismo, Islam and Huda (2018) definen la logística inversa como la eliminación de desechos y la gestión de materiales peligrosos mediante estrategias de reducción en la fuente, reciclaje, sustitución,

reutilización y disposición final en pro de la conservación de los recursos naturales y el medio ambiente. Para la *European Tyre & Rubber Manufacturers Association (ETRMA)* el proceso de recuperación hace referencia a la extracción de energía a partir de residuos en este caso específico de las LFU, el reciclaje consiste en someter a las LFU a un proceso previo para que ingresen como materia prima a una nueva cadena de valor. Algunos ejemplos son: el granulado de caucho, el caucho o el metal extraído de las LFU, mientras que la reutilización tiene lugar cuando las LFU son ingresadas a la misma cadena de valor, por ejemplo, llantas recauchutadas o reprocesadas (ETRMA, 2015).

Entendida desde el punto de vista industrial una CSI se define como el "proceso mediante el cual un fabricante acepta sistemáticamente productos o piezas enviados previamente desde el punto de consumo para su posible reutilización, refabricación, reciclado o eliminación" (Rahman & Subramanian, 2012, p. 239).

Una aproximación similar a la anterior es la propuesta por Prahinski & Kocabasoglu (2006), que define a la CSI como el conjunto de actividades necesarias para recuperar un producto después del uso de un cliente, con el fin de desecharlo o recuperar el valor restante. Por lo tanto, se puede afirmar que un producto conserva su valor aun después de haber pasado por las manos de un cliente, haciendo a un lado la idea sobre la única disposición que pueda tener sea el cesto de la basura.

Teniendo en cuenta las operaciones sobre algunos factores esenciales en una CSI, se entiende como "el proceso de planificación, implementación y control del flujo eficiente y rentable de materias primas, inventario en proceso, productos terminados e información relacionada desde el punto de consumo hasta el punto de origen con el fin de recuperar el valor o realizar una eliminación adecuada" (Roger & Tibben-Lembke, 1998, p. 268), lo que quiere decir que es el mismo proceso solo que en dirección opuesta a la CS de flujo directo; es decir, esta comprende todas las actividades que recuperan un producto usado para luego desecharlo o reutilizarlo (Guide, Jr & Van Wassenhove, 2002).

Formalmente, la logística inversa es definida como "un segmento especializado de logística que se centra en el movimiento y la gestión de productos y recursos después de la venta y después de la entrega al cliente. Incluye devoluciones de productos para reparación y/o crédito" (Vitasek, 2013, p. 168).

Por consiguiente, una CSI cumple la función de continuar el ciclo, en sentido inverso de una CS con el fin de agregar valor a los "desechos", y evitar generar un impacto negativo al medio ambiente. Otros autores la definen como "la serie de actividades que se requieren para recuperar un producto usado de un cliente y, o bien disponer de él o reutilizarlo"(Arroyo López et al., 2015). En el entorno empresarial, se entiende como "una estrategia comercial que actúa como la fuerza motriz de poner en práctica las actividades de recuperación de manera efectiva con el fin de aumentar la sostenibilidad" (Ayvaz et al., 2015, p. 391). De ese modo, se puede ver que la Logística Inversa (LI) ha llegado a contribuir con las buenas prácticas de manufactura. Por lo tanto, las empresas han visto la necesidad de adoptarlas "esto se debe a que los residuos pueden transformarse en recursos que pueden ser utilizados de nuevo a través de actividades sostenibles, como la reutilización y el reciclaje" (Shaharudin et al., 2017, p. 1145).

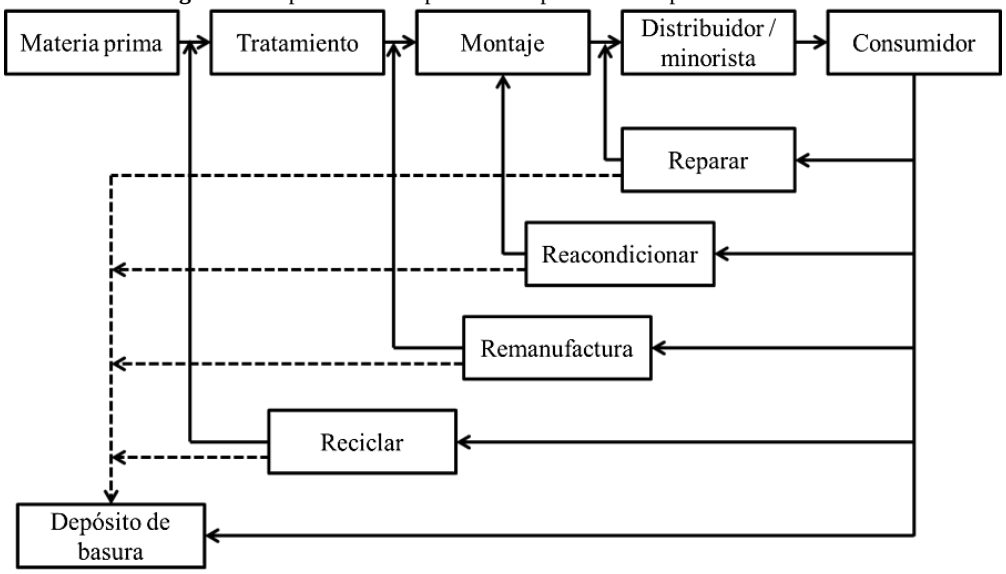
La idea de LI surge de la necesidad de las empresas de desarrollar productos sostenibles y amigables con el medio ambiente, para satisfacer la nueva demanda de productos de este tipo. Además como se

mencionaba anteriormente, las reglamentaciones ambientales rigurosas, y la disminución de las materias primas empleadas en la fabricación de los productos han incrementado la importancia de las cadenas de suministro inversas (Battaïa & Gupta, 2015). Esta disminución del uso de recursos se logra a partir de los tres procesos más importantes según Ayvaz et al. (2015), la reutilización, refabricación y el reciclaje, todo esto con el fin de competir de forma organizacional, de cumplir con las regulaciones ambientales y de incentivar la compra de productos recuperables (Shaharudin et al., 2017).

Por ejemplo en el caso de los neumáticos, desde el año 2003 la Unión Europea exige a los fabricantes de llantas que desarrollan sus actividades en Europa, que implementen el reciclaje de cada neumático usado cada vez que vendan uno (Guide, Jr & Van Wassenhove, 2002). Esto quiere decir que a partir de este año por cada neumático vendido se reciclará uno usado, obteniendo como resultado la buena gestión inversa de la CS de LFU. En este mismo continente existen tres modelos de gestión de las LFU que se encargan desde distintas perspectivas del manejo de estos artículos al final de su vida útil (Uruburu et al., 2013).

La Cadena de Suministro de Ciclo Cerrado "*Closed-Loop Supply Chain CLSC"* da una visión global del flujo durante el ciclo de vida de un producto (ver ***Figura 2-2***), porque presta atención al flujo directo del producto (logística hacia adelante) y al flujo inverso (logística hacia atrás). La adecuada gestión de la CLSC comprende el diseño, control y operación para maximizar la generación de valor en todo el ciclo de vida de un producto con la recuperación constante y dinámica de valor de diferentes maneras y volúmenes a lo largo del tiempo, desde tres perspectivas fundamentales: social, económica y ambiental (Islam & Huda, 2018)

Figura 2-2 Opciones de disposición de productos en procesos de CLCS



Fuente: (Siew & Mohamed, 2013)

La Figura 2-2 es la representación gráfica de la estructura de una cadena de suministro bajo el enfoque de logística integral. Este enfoque toma en consideración los dos flujos del producto: directo e inverso para tener una visión y perspectiva global. Es común que la recuperación de un producto desecho se realice en diferentes momentos de la logística directa. Según la etapa en la que es incorporado el autor le da un nombre. Por ejemplo, cuando un producto que ha llegado al final de su vida útil se incorpora

como materia prima es considerado como reciclaje. También, en la Figura 2-2 se observa que no todos los residuos no logran ser recuperados, los cuales son puestos en depósitos de basura o rellenos sanitarios (Siew & Mohamed, 2013). La logística integral considera fundamentalmente objetivos ambientales y económicos. Sin embargo, recientemente se ha incorporado el componente social, esto lleva a la incorporación de concepto como Logística Verde "*Green Logistics GL*", Logística Urbana – " *City Logistics* o *Urban Logistics UL*" y Logística Inversa que previamente ha sido abordada y explicada (Costa-Salas et al., 2017; Kazancoglu et al., 2018).

El abastecimiento sostenible de recursos naturales, las limitaciones ambientales, las políticas sostenibles implementadas desde los gobiernos y los problemas ambientales han llevado a las empresas a experimentar un cambio de la economía lineal a la economía circular, ya que las empresas deben ser consideradas sostenibles y cerrar el ciclo. La economía circular promueve el mínimo consumo de recursos y la protección ambiental. De allí nace el concepto de GL que se enfoca en mitigar los impactos sobre el medio ambiente, la conservación de los recursos mediante la integración de información, logística y seguimiento al flujo de energía en toda la cadena de suministro. Esto le ha permitido a las compañías aumentar sus ganancias, participación de mercado, generando una ventaja competitiva reduciendo los riesgos ambientales y optimizando el consumo energético y de materiales (Kazancoglu et al., 2018; Mumtaz et al., 2018).

Las urbes han crecido a pasos acelerados en la última década. Por ejemplo, en Europa se estima que el 80% de la población habitará en zonas urbanas, mientras que en el mundo más de cincuenta ciudades han superado el umbral de cinco millones de habitantes (TRANSGESA, 2016), esta condición ha contribuido a la creciente cantidad de vehículos lo cual ha generado congestión, atascos, lentitud en los desplazamientos y restricciones de circulación en ámbitos urbanos (Logistec, 2015). Para contribuir a la mitigación de esta problemática nace la logística urbana que es definida por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) como *"los movimientos relacionados con la actividad comercial y el suministro y distribución de bienes en las ciudades, por lo que es fundamental para su desarrollo económico."* También ha sido definida por Costa-Salas et al. (2017) como: *"el campo pluridisciplinario que tiene como objetivo comprender, estudiar y analizar las diferentes organizaciones, esquemas logísticos, partes interesadas y acciones de planificación relacionadas con la mejora de los diferentes sistemas de transporte de mercancías en una zona urbana y vincularlos de manera sinérgica para disminuir las principales molestias relacionadas"*. En otras palabras, la logística urbana tiene por objetivo mejorar la calidad de vida de las personas residentes en zonas urbanas mediante la disminución de tiempos de transporte, sobrecostos, accidentes, atascamientos y el mejoramiento del flujo vehicular, productividad y condiciones ambientales en las grandes urbes.

2.1.3 Criterios de evaluación

En el diseño de la cadena de abastecimiento la toma de decisiones recae sobre tres tipos: decisiones de transporte, instalaciones e inventarios (Costa-Salas et al., 2017). En los casos revisados en el Estado del arte se evidenció que las decisiones relacionadas con las instalaciones se denota en la asignación de la ubicación de los centros de recolección y en algunos casos la ubicación de las fábricas de procesamiento, además decisiones de capacidad deben ser tomadas (Yadollahinia et al., 2018). Las decisiones de transporte involucran: el medio, la capacidad, el número de vehículos dispuestos para satisfacer la red, las rutas de distribución y abastecimiento. Las decisiones de inventario requieren

cuantificar las cantidades a mover por toda la red para establecer las cantidades a almacenar en cada uno de los nodos.

Diversos son los métodos de solución aplicados al diseño de las cadenas de suministro, siendo mayormente aplicados los modelos matemáticos y de optimización, dentro de los cuales se destacan métodos de programación lineal entera mixta (MILP), métodos heurísticos y metaheurísticos. Sin embargo, otros métodos también han sido explorados para contribuir a la solución de la problemática como lo es la simulación de eventos discretos y los árboles de decisión.

Los modelos de optimización tales como la programación lineal, MILP, programación multinivel, entre otras variaciones se destacan por la búsqueda exhaustiva de la mejor solución dentro del área de factibilidad. Esto implica grandes costos computacionales en la búsqueda de la mejor solución, lo cual puede conllevar largos periodos de espera para obtener la respuesta al problema. Este tipo de modelos se caracterizan por la definición de los siguientes elementos: función o funciones objetivo que representan el criterio de decisión del modelo y se formulan en términos de maximizar o minimizar. En este caso de aplicación las funciones objetivo están dadas por maximización de beneficios económicos y/o la minimización de impactos sobre el medio ambiente. Las restricciones son las limitaciones que presenta el problema y que generalmente se deben a la disponibilidad de recursos o cumplimiento de parámetros y también se definen las variables para la decisiones que soluciona el problema (Bonilla-petriciolet, 2014) .

Una alternativa muy utilizada en los modelos de optimización son las Heurísticas y Metaheurísticas. Una Heurística es un procedimiento sistemático usado para la búsqueda de soluciones de alta calidad con un coste computacional inferior al de la optimización. Su desventaja radica en que la respuesta encontrada por el modelo no puede ser garantizada como óptima. La Heurística tiene la particularidad que sólo es aplicada para un tipo particular de problemas. Cuando una Heurística es generalizada a varios tipos de problemas se le conoce como Metaheurística. Las Metaheurísticas más reconocidas y aplicadas son: la Búsqueda Tabú, Algoritmos Genéticos, Recocido Simulado, Enjambre de Partículas, Colonia de Hormigas y Algoritmo Luciérnaga. (Suárez, 2012)

Según estudios realizados sobre el diseño de cadenas de abastecimiento sostenible, se logran destacar características principales de los tres pilares fundamentales, el económico, el ambiental y el social, los cuales son expuestos a continuación:

2.1.3.1 Pilar económico

Se han utilizado diferentes indicadores económicos para evaluar el pilar económico, la principal función objetivo ha sido el costo, seguido por el beneficio y por último el valor presente neto (VPN). Anteriormente se dijo que el diseño de red es el tema más relevante a nivel estratégico, en donde el transporte y la ubicación son los aspectos principales, cuando en una CS solo se toman decisiones de transporte, el costo es el indicador más apropiado, pero cuando se tratan temas de ubicación el VPN es el conveniente ya que interpreta mejor las inversiones y otros costos asociados con los ingresos. A nivel económico se pueden observar riesgos por la inversión, sin embargo son muy pocos estudios los que modelan riesgos asociados a parámetros económicos (Barbosa-Póvoa et al., 2018).

2.1.3.2 Pilar ambiental

La mayor parte de los estudios asocian el componente ambiental con las emisiones de carbono (CO_2) valiéndose de diversos indicadores. Algunos de ellos son: la evaluación de la huella de carbono,

cuantificación de los gases de efecto invernadero, evaluación de las emisiones de CO_2 que puede ser desarrollada por medio de dos categorías: potencial de calentamiento global o cambio climático. Todas las medidas indicadas evalúan el calentamiento global, lo que diferencia a una de otra es la manera en que es medido el impacto, las mediciones comúnmente estudiadas son: emisiones directas de CO_2, relación causa efecto, flujo del inventario del ciclo de vida y/o mediante el cálculo de los valores de las categorías de impacto.

El análisis del inventario de ciclo de vida se define como una fase de la evaluación del ciclo de vida que implica la compilación y cuantificación de entradas y salidas para un sistema de producto dado a lo largo de su ciclo de vida, consiste en un seguimiento detallado de todos los flujos que entran y salen del sistema del producto, incluidos los recursos o materiales en bruto, la energía, el agua y las emisiones al aire, al agua y la tierra de una sustancia específica. El *Global Warming Potential (GWP)* reúne las emisiones de Dióxido de Carbono (CO_2), Metano (CH_4) y el Óxido de Nitrógeno (N_2O), en un único indicador (Fourth Assessment Report, 2007; ISO 14040, 2006).

Por otro lado, los aspectos ambientales también son relacionados comúnmente con la reducción de desechos y la implementación de procesos de reciclaje. Ambas tienen el objetivo de reducir los desperdicios. Sin embargo, los residuos no hacen parte de una categoría de impacto ambiental, sino de un flujo. Dicho flujo de desechos no representa en su totalidad los elementos y compuestos utilizados en el proceso de fabricación, por lo que esta evaluación es parcial. Una reducida cantidad de estudios han utilizado como indicador ambiental el uso de energías renovables (Lee et al., 2015).

En síntesis, el componente ambiental en los estudios relacionados con el diseño de cadenas de suministro bajo condiciones de sostenibilidad considera en su mayoría las emisiones de carbono y la reducción de desechos y/o reciclaje en su modelación matemática. Sin embargo, se dejan de lado otros tipos de contaminantes como lo es la contaminación acústica, visual. Además, es reducida la información relacionada con indicadores como la huella hídrica.

El pilar ambiental puede ser modelado de múltiples formas, se ha encontrado que los comúnmente aplicados en estudios relacionados con el diseño de cadenas de suministro son: Evaluación del ciclo de vida (*Life Cycle Assessment - LCA*), mapas de razonamiento, proceso de jerarquía analítica (*Analytic Hierarchy Process - AHP*), proceso de red analítica (*Analytic Network Process - ANP*), análisis envolvente de datos (*Data Envelopment Analysis - DEA*), modelos de equilibrio, simulación, entre otros (Brandenburg & Seuring, 2014; Seuring, 2013). Sin embargo, LCA es la técnica más utilizada, además es un marco general para una evaluación holística de una cadena de suministro, desde la extracción de la materia prima hasta la eliminación de los productos finales o el reciclaje de este (Azapagic, 1999; Eskandarpour et al., 2015; ISO 14040, 2006; Pieragostini et al., 2012).

Según las normas ISO 14040 Y 14044, son cuatro los pasos a seguir para la implementación del LCA. Estos se definen a continuación (ISO 14040, 2006):

1. La definición de objetivo y el alcance establece los principales objetivos del estudio, define las unidades funcionales consideradas y los límites del sistema.

2. El análisis de inventario, estudia todos los flujos desde y hacia la naturaleza involucrado en la producción de un bien. Las emisiones (en el aire, el agua y el suelo), extracciones y el uso del suelo son enumerados y cuantificados.

3. La evaluación de impacto se propone cuantificar la afectación ambiental de todas las emisiones enumeradas en el paso anterior.

4. La interpretación de los resultados consiste en discutir los hallazgos de las fases anteriores y formular conclusiones y recomendaciones para el caso objeto de estudio.

De acuerdo con Eskandarpour et al. (2015), determinar los límites de la cadena de suministro es la primera decisión crítica en evaluación del ciclo de vida de un producto, algunos de los alcances más utilizados son:

- El alcance de "*cradle-to-grave"* supone una evaluación integral del impacto ambiental a través de toda la cadena de suministro, desde la materia prima hasta el procesamiento, la fabricación, la distribución, el uso, la reparación y el mantenimiento, la eliminación y el reciclaje de los materiales.

  En el contexto de las cadenas de suministro de combustible, se conoce comúnmente como "*well-to-wheel*" En el contexto de las cadenas de suministro de biomasa, se le llama "*field-to-wheel*".

- El alcance de "*cradle-to-gate*" se refiere a todos los pasos desde la extracción hasta la puerta de fábrica. Este alcance es frecuente para las empresas B2B (Business to business) que tienen múltiples clientes. En las cadenas de suministro de combustible, este alcance se denomina "*well-to-tank*" para distinguir los gases de efecto invernadero, emitidos durante la producción de combustible debido a las operaciones vehiculares.

- *"Gate-to-gate"* generalmente se refiere a empresas en niveles intermedios de una cadena de suministro, que fabrican o transforman y entregan productos a sus clientes sin extraer materias primas ni desempeñar ningún papel en la eliminación de productos al final de su vida útil. Este alcance también se utiliza en la transformación de productos al final de su vida útil que se reutilizan en la misma u otra cadena de suministro.

- *"Gate-to-Grave"* se centra en los eslabones de una cadena de suministro, desde la puerta de fábrica hasta la eliminación del producto. Este alcance es conveniente en el estudio de las cadenas de suministro de residuos o actividades de logística inversa.

Por otro lado, a la hora de evaluar el impacto del ciclo de vida, se encuentran cuatro métodos, los cuales son los más utilizados y se presentan a continuación:

- El eco-indicador 99 puede agregar resultados de LCA en unidades fáciles de comprender y fáciles de usar, llamadas Eco- indicadores (Eco-indicators en inglés). Los eco-indicadores son números que expresan la carga ambiental total de un proceso o producto. Con la ayuda de Eco-indicadores estándar, los diseñadores pueden comparar las alternativas de diseño de acuerdo con el impacto ambiental total. Este método incluye tres categorías de daños: (1) salud humana, (2) calidad del ecosistema y (3) recursos (Goedkoop & Spriensma, 2001).

  IMPACT 2002+ tiene 14 indicadores de punto medio y 4 categorías de daños: salud humana, calidad de los ecosistemas, cambio climático y agotamiento de los recursos, en la mayoría de los casos con un alcance de "*cradle-to-grave*" y con un objetivo ambiental general, el cual es la suma de todos los daños en el punto final para cada instalación en la cadena de suministro (Jolliet et al., 2003).

- *CML92* Las emisiones se clasifican en diferentes categorías de impacto, se dividen en tres grupos. El grupo A incluye las categorías básicas de impacto tales como el agotamiento de los recursos abióticos, los impactos del uso de la tierra (pérdida de reservas de petróleo), el cambio climático, el agotamiento del ozono estratosférico, la toxicidad humana, la ecotoxicidad (ecotoxicidad acuática, agua dulce y marina, ecotoxicidad terrestre), la formación de foto oxidantes y acidificación y eutrofización. El Grupo B, incluye categorías de impacto más específicas como los impactos del uso de la tierra en la biodiversidad, ecotoxicidad de los sedimentos (agua dulce y marina), efectos de la radiación ionizante, olores desagradables en el aire, ruido, calor residual y accidentes. El grupo C enumera otras categorías de impacto, como la reducción de los recursos bióticos, la desecación del suelo y otros olores desagradables (Por ejemplo agua con mal olor) tiene siete categorías de impacto (Bloemhof-Ruwaard et al., 1996; Eskandarpour et al., 2015).

- *ReCiPe* tiene 18 categorías de punto medio (enfoque orientado a problemas) los cuales se refieren a los impactos en temas ambientales como el cambio climático, la acidificación, toxicidad, entre otros, combinadas en 3 categorías de daño de punto final (enfoque orientado al daño), referente al impacto ambiental en cuestiones como la salud humana, ecosistemas y recursos naturales. Este método también da como resultado una sola puntuación (Goedkoop et al., 2009).

La forma más fácil de evaluar los factores ambientales ha sido enriqueciendo los modelos de los diseños de cadenas de suministros tradicionales con uno o varios objetivos, limitaciones y/o parámetros ambientales, manteniendo el enfoque en las operaciones de logística de la cadena de suministro, mientras se integran nuevos aspectos en el proceso de decisión. Algunos componentes de la cadena de suministro que son incorporados frecuentemente para la evaluación medio ambiental son: las instalaciones, transporte y criterios relacionados con el producto (Eskandarpour et al., 2015).

Instalaciones: Dado que la ubicación de las instalaciones es una decisión central en los modelos de los diseños de las cadenas de suministro, es muy común integrar el impacto de las instalaciones en modelos matemáticos. La medida más clásica para evaluar el impacto ambiental de las instalaciones es el consumo de energía, que puede depender de decisiones de tamaño y opciones tecnológicas.

Transporte: Una de las formas más fáciles de incorporar criterios ambientales en modelos económicos puros es calculando las emisiones de Gas de Efecto Invernadero y partículas debido al transporte. Algunos modelos integran la selección de modos de transporte en decisiones de diseño de redes estratégicas. En estos modelos, los modos de transporte generalmente compiten en costo, impacto ambiental y capacidad. La elección entre los modos de transporte también puede determinarse por las condiciones de carga / descarga, la frecuencia, el tamaño mínimo del lote, etc.

En los modelos del diseño de cadenas de suministro generalmente las características operacionales tales como la velocidad del vehículo y las variaciones diarias son ignoradas.

Proceso y diseño del producto: Las decisiones sobre los flujos y el diseño del producto también se pueden integrar completamente en el diseño de las cadenas de suministro sostenibles. La estructura de la red logística tiene un mayor impacto en los costos, mientras que el diseño del producto tiene un mayor impacto en la energía y el desperdicio (Krikke et al., 2003). Por otro lado el precio de la materia prima aumenta a medida que el producto se vuelve más ecológico (Abdallah et al., 2013). Por

lo tanto, la selección de proveedores tiene un impacto contradictorio en el costo y la dimensión ambiental (Kumar et al., 2014).

2.1.3.3 Pilar social

De acuerdo con Barbosa-Póvoa et al., (2018) en la mayoría de estudios con respecto al pilar social, el indicador más utilizado ha sido la creación de empleo (Miret et al., 2016; Mota et al., 2015), modelando como una función objetivo, seguido por la seguridad (tasa de lesiones) (Bouchery et al., 2012; Kim et al., 2011), la salud (Santibañez-Aguilar et al., 2013), número de horas de trabajo (Ramos et al.,2014) y por último los aspectos relacionados con la satisfacción y la pobreza, al hablar de pobreza los estudios se han relacionado con la creación de empleo en zonas donde la tasa de pobreza es alta, con el fin de mejorar su economía (Mota et al. ,2015). Existen de igual forma trabajos que consideran más de una función objetivo social, donde además de considerar los aspectos anteriormente nombrados, se tiene en cuenta la proximidad de los empleados a los sitios de producción y/o la estabilidad laboral, minimizando despidos (Boukherroub, and Fondrevelle, 2015). También se han monetizado los aspectos sociales, por lo que la función objetivo es minimizar estos costos, sin embargo estos aspectos están ligados a las decisiones gerenciales, ya que si se busca aumentar el número de empleados contratados (Fijos / Variables) la función objetivo sería la maximización de este aspecto (Barbosa-Póvoa et al., 2018) .

Algunas funciones objetivo multi-criterios incluyen la creación de empleo, el valor creado en las comunidades locales, el riesgo del consumidor y el daño a la salud que el proceso crea (Pishvaee, Razmi, and Torabi ,2014), por otro lado, se han considerado la creación de empleo y bienestar, la salud y la seguridad y el apoyo a comunidades locales (Ziolkowska ,2014).

En la mayoría de modelos se agrupan los aspectos sociales en los siguientes campos:

- *Condiciones de trabajo* : El empleo es el principal indicador social utilizado en la literatura, en donde se contemplan aspectos como la maximización de la cantidad de instalaciones, promoviendo la generación de trabajos fijos (Dehghanian & Mansour, 2009), y también se tratan aspectos como el daño que generan ciertas sustancias al trabajador en la realización de las labores y las medidas de seguridad (Devika et al., 2014).

- *Compromiso social*: Este campo agrupa las decisiones que contribuyen a mejorar la salud, la educación y la cultura de una población (Datta, 2012). Incluyendo políticas de desarrollo local (Dehghanian & Mansour, 2009) , equidad en el acceso a la asistencia sanitaria (Beheshtifar & Alimoahmmadi, 2015) ,entre otras.

- *Problemas del cliente: Este campo* reagrupa los impactos que afectan individualmente a cada cliente. En algunos trabajos se entiende este campo como el riesgo de usar material reciclado (Dehghanian & Mansour, 2009).

2.2 Estado del arte

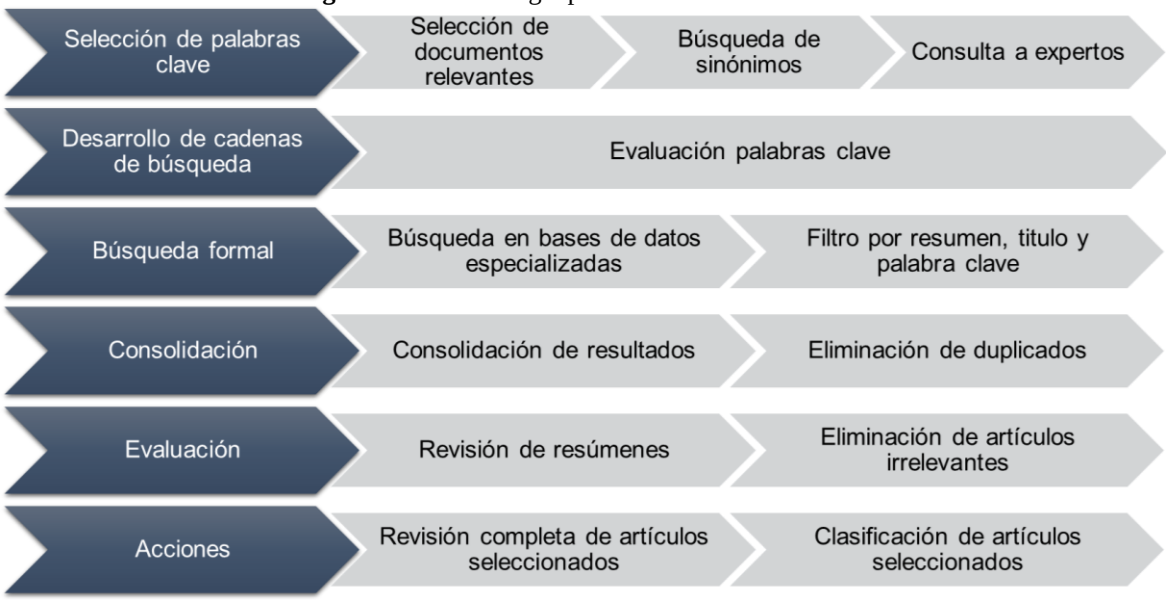
El diseño de una cadena de suministro de flujo directo implica decisiones relacionadas con movimientos de materias primas, inventario, localización, flujos de producto de productores al consumidor final, mientras que las cadenas inversas consideran el flujo del producto cuando este llega al final de su vida útil, a través de la reutilización, recuperación o reciclaje. Cuando la cadena de

suministro directo e inversa se consideran simultáneamente constituyen una cadena de suministro de ciclo cerrado o en inglés *Closed-Loop Supply Chain (CLSC)*. Una CLSC incorpora como primer eslabón al proveedor quien proporciona materias primas, insumos y materiales, que luego son transformados para obtener un producto terminado que es transportado hasta el consumidor final, quien lo utiliza hasta que el articulo llegue al final de su vida útil, en ese momento inicia un proceso de recolección y clasificación del residuo para determinar qué proceso de recuperación es el más apropiado para las características y el estado de desgaste del residuo. Para finalmente llevar al mercado un producto nuevo fabricado a partir de uno usado. (Braz et al., 2018).

2.2.1 Consideraciones metodológicas para la construcción del estado del arte

La metodología implementada para la elaboración de la revisión bibliográfica fue la propuesta por Newbert (2007) la cual comprende seis etapas como se evidencia en la Figura 2-3. En la primera fase (selección de palabras claves) se realizó una exploración inicial en *ScienceDirect* en busca de artículos científicos relevantes y relacionados con el diseño de cadenas de abastecimiento para LFU. Producto de esta búsqueda se encontraron dos textos científicos con mucha relación a la actual investigación (Pedram et al., 2017; Subulan et al., 2015). De ellos se extrajo las palabras más repetidas y las palabras claves comunes entre los artículos. Con base en estas palabras se procedió a buscar sinónimos o palabras afines al proyecto de investigación. Para finalizar la consolidación de las palabras claves se consultó con el PhD Yasel Costas, quien realizó la modelación de una cadena inversa para la recuperación de LFU en Manizales - Colombia, acerca de la pertinencia de las palabras claves propuestas.

Figura 2-3 Metodología para la revisión de literatura

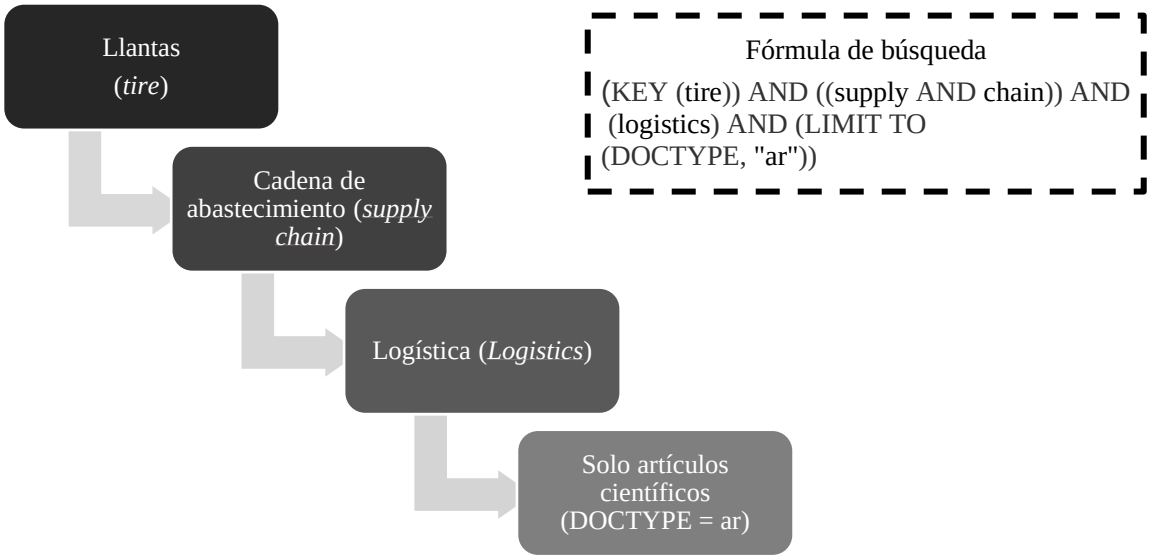


Fuente: Elaboración propia con base (Newbert, 2007)

La segunda etapa comprendió la jerarquización de las palabras claves. La palabra de mayor importancia en la búsqueda fue llantas (*tire* en inglés). En este sentido hubo una discusión acerca de qué palabra describía en mayor medida la problemática “llantas” o la cadena de búsqueda “llantas usadas”. Finalmente se decidió utilizar solamente llantas por dos implicaciones, la primera en los artículos de exploración se evidenció que cada autor utilizaba un término diferente para la palabra

"usadas" algunos ejemplos son llantas al final de su vida útil (*end of life*) o en desuso (*discarded*). La segunda implicación fue que algunos artículos modelaban todo el ciclo de vida de las llantas y no solo cuando estás terminan su vida útil; por lo tanto, al buscar "llantas usadas" estos artículos no aparecerían en la búsqueda, por lo cual se estaría sesgando los resultados. Las palabras utilizadas para configurar el algoritmo de búsqueda fueron: design, supply chain, logistics, reverse logistics, sustainable, entre otras. Finalmente, las palabras implementadas y su jerarquización se presentan en la Figura 2-4.

Figura 2-4 Jerarquización de las Palabras Clave

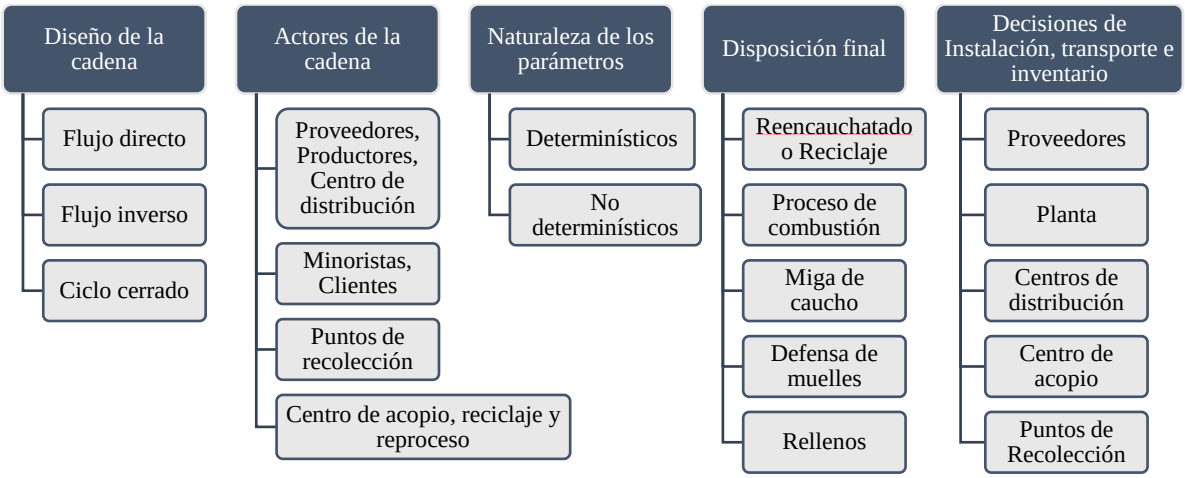


Fuente: Elaboración propia

Establecidas las palabras claves y su jerarquía se procedió a realizar la búsqueda formal de los documentos científicos. Para este fin se utilizan dos bases de datos especializadas *Scopus* y *Web of Science (WoS)*. La búsqueda en Scopus arrojó 35 resultados mientras que la búsqueda en WoS 25. Con los resultados de esta búsqueda se procede a la fase 4 que es la consolidación de la base de datos. Se encontraron 16 coincidencias en los resultados de cada búsqueda. Estos artículos duplicados son eliminados. La fase de evaluación inicia con la lectura de resúmenes y conclusiones de los documentos encontrados para determinar si tienen relación con la investigación en curso. Al realizar este proceso se determina que veintitrés (23) artículos científicos son pertinentes. El criterio para descartar un artículo fue que no se relacionara con el diseño de cadenas de suministro inversa para LFU. Un gran número de los artículos abordaba la caracterización de la gestión logística de LFU, analizando normatividad, actores, situación actual y promoviendo una discusión sobre aspectos de mejora en la gestión del residuo. Sin embargo, el diseño de la cadena de suministro no era un tema estudio.

Posteriormente los documentos considerados pertinentes fueron leídos en su totalidad y se identificaron las características relevantes de cada uno haciendo uso de una tabla donde se adjuntó la información mostrada en la Figura 2-5. Adicionalmente, se registró de cada artículo información relevante como: Nombre de la revista que publicó el artículo, *Quartile* al cual pertenece, país donde se desarrolló la investigación, (ver Anexo 1. Inventario Bibliográfico).

Figura 2-5 Características evaluadas en cada artículo científico



Fuente: Elaboración propia

2.2.2 Generalidades

El 91% de los artículos fueron publicados en revistas *Q1* y el restante en *Q2*. Se evidencia que el país con mayor producción de artículos es Irán con el 35% del total de publicaciones (8) seguido de India que cuenta con cuatro publicaciones de artículos científicos. Dando una mirada al contexto suramericano se han publicado 4 artículos que corresponden al 17,39%, Brasil con dos publicaciones (de Figueiredo & Mayerle, 2008; Duarte et al., 2013), mientras que Colombia (Costa-Salas et al., 2017) y Chile (Banguera et al., 2018) una publicación cada país. Al realizar un análisis cronológico del número de publicaciones se evidencia que los últimos dos años han sido los de mayor producción con 5 publicaciones en el 2017 y 9 en el 2018 lo cual representa el 60% del total de publicaciones, lo cual hace evidente un creciente interés por la investigación de la problemática, la cual abarca temas como: gestión de residuos, economía circular, logística inversa, modelamiento matemático y entre otros.

Véase Anexo 1. Inventario Bibliográfico para ver al detalle cada una de las investigaciones tomadas en consideración.

2.2.3 Diseño de red

En relación con el diseño de la red, el 61% de las investigaciones presentan un modelamiento del flujo inverso, tan solo algo menos del 4% optó por el flujo directo, mientas que las restantes investigaciones optaron por diseñar una cadena de suministro de ciclo cerrado. Al filtrar por países se evidencia que todos los estudios desarrollados en Suramérica fueron con un diseño de red de flujo inverso mientras que en Irán país con mayor índice de publicación en el tema de estudio se optó por el diseño de CLSC en el 75% de las investigaciones y tan solo el 25% por diseños de flujo inverso únicamente (Cheraghalipour et al., 2017; Dehghanian & Mansour, 2009). Esta comparación entre los diseños de red deja entrever la brecha existente en la producción científica en el contexto latinoamericano frente al iraní.

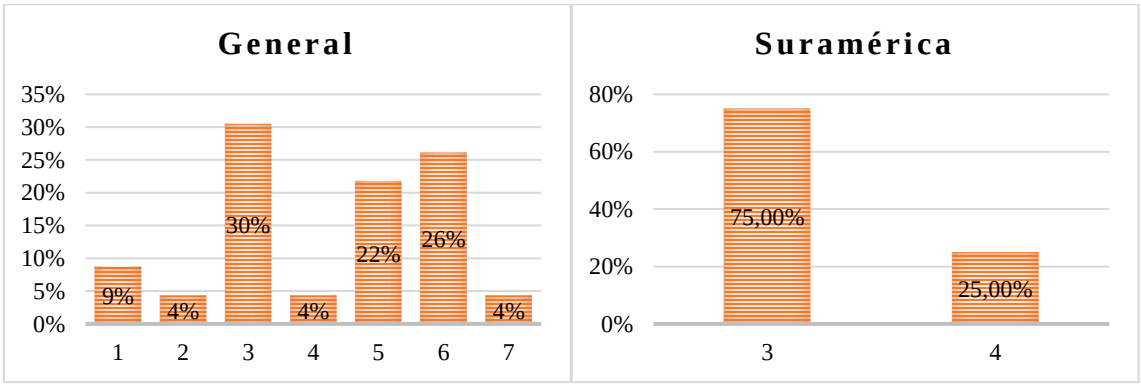
2.2.4 Fuentes de incertidumbre en la cadena de abastecimiento

En la formulación de la metodología de solución juega un papel importante definir la naturaleza de los parámetros de entrada. En este sentido, los parámetros comúnmente utilizados en las investigaciones documentadas son: Tasas de recolección, precios de compra y venta, demanda de productos y proporciones de productos destinados a cada tipo de actividad (por ejemplo: reciclaje, reutilización, refabrición, etc). El 43% de los estudios utilizó demanda no determinística, mientras que el mismo porcentaje optó por tasas de retorno no determinísticas. En el plano latinoamericano la utilización de demandas no determinísticas es nula mientras que tan solo el 25% utilizó tasas de retorno de tipo estocásticas. Lo anterior, evidencia que en mayor medida los estudios relacionados con cadenas de suministro inversas para LFU optan por modelos con parámetros de tipo determinístico.

2.2.5 Eslabones de la cadena de abastecimiento

Para el diseño de una cadena de abastecimiento es indispensable determinar los actores claves y definir la interacción entre cada uno de ellos. La Figura 2-6 evidencia que el 57% de los autores optaron por la implementación de cadenas con cuatro o más eslabones, sin embargo, en el contexto suramericano, el 75% de los autores diseñaron cadenas de máximo tres eslabones: puntos de recolección, centro de acopio y disposición final, lo cual indica que gran parte de la producción científica se volcó a cadenas de pocos eslabones que contribuyen a la comprensión de la problemática, pero que no corresponden al modelamiento real de la cadena de abastecimiento. Una tendencia evidenciada es la evolución que ha sufrido el tema de estudio, el primer estudio fue desarrollado por Tuma en el año 2006. En su estudio considera únicamente un actor en la cadena y el alcance de su investigación se limitaba a decisiones de niveles de producción que optimicen la utilidad de una empresa dedicada al recauchutado de neumáticos en Alemania. Luego progresivamente se abordan problemas con diseños de red más complejos.

Figura 2-6 Actores clave de la cadena de abastecimiento



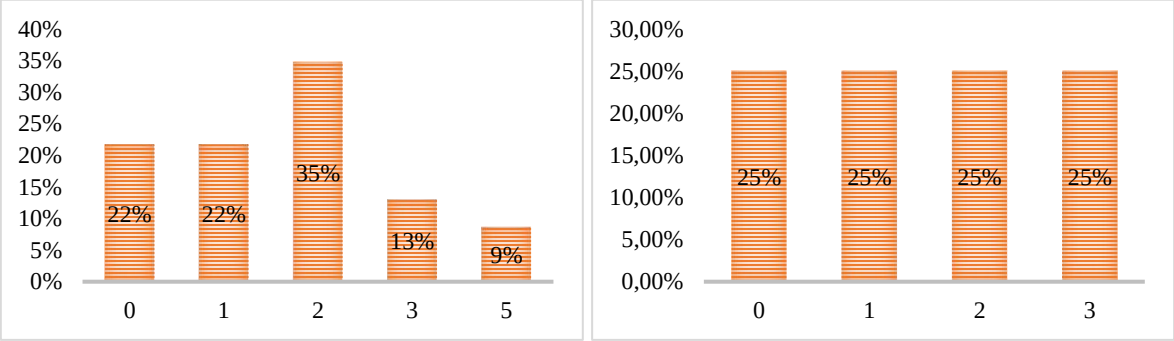
Fuente: Elaboración propia

2.2.6 Utilización de las LFU

La utilización dada a las LFU en los artículos científicos es: recauchutado, combustión, producción de miga de caucho, defensas para muelles, barrera contra erosión, estabilizadores de terraplan, extracción de acero y reciclaje. El proceso de recauchutado fue el más estudiado y tenido en cuenta, el 61% de los autores lo tomaron en consideración, mientras que el 43% tuvo en cuenta el reciclaje y

no especificaban qué proceso que utilizaría, qué producto se obtendría del reciclaje o a qué cadena de valor se incorporaría. Los investigadores se limitaban a establecer en su modelo la existencia de una planta de reciclaje dispuesta a comprar las LFU. Al evaluar el número de alternativas de utilización de las LFU en la Figura 2-7 se evidencia que el 78% de los autores como máximo tuvieron en cuenta dos tipos de disposición final para las LFU lo cual resulta escaso en relación a las alternativas de utilización existentes hoy en día para este tipo de desechos. En este sentido las investigaciones con más alternativas de utilización para las Llatas usadas fueron desarrolladas por los mismo autores Simic & Dabic-Ostojic la primera en el año 2016 y la segunda en el 2017. En el contexto suramericano la investigación que mayor disposiciones tuvo en consideración fue la realizada por Banguera et al. (2018), sin embargo, es importante aclarar que en dicha investigación se contempla como una disposición final el uso de rellenos sanitarios en donde las LFU son enterradas, lo cual no representa una alternativa amigable con el medio ambiente.

Figura 2-7 Alternativas evaluadas para la disposición final de las LFU



2.2.7 Decisiones de ubicación dentro de la cadena de abastecimiento

Las decisiones de ubicación de los diferentes actores es una implicación a tener en cuenta los diseños de cadenas de abastecimiento independientemente de su diseño de red (Flujo directo, flujo inverso o CLSC). En este sentido la revisión bibliográfica indica que el 26% de los autores tuvo en cuenta a lo sumo una decisión de ubicación en su diseño de red, mientras que el 60,87% consideró como decisión ubicar dos o menos actores de la cadena. En el ámbito latinoamericano ningún estudio superó la ubicación de dos actores de la cadena, el 75% tomó en consideración una única decisión de este tipo y el 25% restante determinó la ubicación de dos actores de la cadena de abastecimiento. Los estudios que contemplaban mayor número de decisiones de ubicación de actores de la cadena fueron los desarrollados por Subulan, Taşan, & Baykasoğlu (2015) y por Hajiaghaei-keshteli, Abdallah, & Fathollahi-fard (2018) determinando la ubicación de cinco actores. En el caso de Subulan ubicaba proveedores, planta de producción, minoristas, puntos de recolección de LFU y plantas para el procesamiento de las LFU. La única variación con respecto Hajiaghaei es la decisión de ubicar centros de distribución en lugar de proveedores.

2.2.8 Función objetivo y metodología de solución

Otro aspecto fundamental para tener en consideración al momento de diseñar una cadena de abastecimiento es la definición de los criterios de decisión. En términos de modelación matemática estos criterios de decisión se les conoce como función objetivo, en relación con ello el 61% de los autores se inclinó por modelos mono - objetivo, el 13% utilizo modelos bi-objetivo, el 21,74% tri-

objetivo (Cheraghalipour et al., 2017; Dehghanian & Mansour, 2009; Ebrahimi, 2018; Sahebjamnia et al., 2018; Yadollahinia et al., 2018) y tan solo el 4% tomo en consideración 4 criterios de decisión (Saxena et al., 2018). Todas las investigaciones sin excepción tuvieron en cuenta el criterio económico. Algo llamativo es que solamente el 30% tomaron como criterio de decisión el factor ambiental en sus modelos.

La metodología utilizada por los autores para dar solución a los diseños de recuperación de LFU son diversos, lo más común fue la utilización de modelos de optimización o sus variantes, siendo la más utilizada la Programación Lineal de Enteros Mixtos "*Mixed Integer Linear Programming –MILP-*". El 61% optó por la formulación de modelos de este tipo. Sin embargo, otra metodología de solución frecuente fue la aplicación de Heurísticas o Metaheurísticas. El 26% de los autores optó por ellas; en algunos artículos la mayor contribución al estado de la materia fue la aplicación y validación de diferentes Metaheurísticas, este es el caso de Fathollahi-Fard, Hajiaghaei-Keshteli, & Mirjalili (2018) quienes formularon Heurísticas hibridas utilizando el caso de las LFU para validar el rendimiento de sus Metaheurísticas combinadas.

2.2.9 Casos de estudio

Dentro del inventario de investigaciones es llamativo que la única investigación que utiliza la simulación para el modelamiento de la red es la realizada por Costa-Salas, Sarache & Überwimmer (2017), estos autores diseñaron una cadena inversa de tres eslabones, aguas arriba recolectores de LFU, aguas abajo la "zona clientes" que estaba compuesta por una fábrica de recauchado y un proceso de combustión, mientras que en el eslabón central se encontraba ubicado un centro de acopio donde se realizaba el proceso de inspección y clasificación de LFU, y adicionalmente incorporaron al diseño de la red el concepto de logística urbana (en inglés "*City Logistic CL*"). La metodología utilizada para dar solución al problema constó de dos fases, en la primera fase se simuló la red y se verificó que fuera consistente con la realidad de la problemática, en la segunda fase se definieron las variables que utilizarían para optimizar la red simulada. Finalmente, el resultado de la investigación fue determinar la cantidad de vehículos requeridos aguas arriba y aguas abajo que garantizará el mejor desempeño de la red en función de criterios económicos, ambientales y tasas de utilización de los vehículos (Costa-Salas et al., 2017).

Otra investigación de una cadena de abastecimiento para la recuperación de LFU realizada en un contexto urbano fue desarrollada en Santiago de Chile y para el diseño de la red de logística inversa se incorporó la responsabilidad extendida al productor en un modelo de programación entera mixta (MILP) que buscaba calcular los flujos óptimos, las necesidades monetarias para implementar la red, la configuración y localización de las instalaciones de recolección, reprocesamiento y reciclaje para cada uno de los cuarenta y dos escenarios propuestos. La configuración de la red logística inversa constó de cuatro niveles: proveedores locales, centros de recolección de LFU, plantas de reprocesamiento y el último eslabón se dividió en dos según el destino final de las LFU el mercado o disposición final. Una debilidad percibida en esta investigación fue no considerar en la función objetivo criterios ambientales, limitándose exclusivamente en criterios monetarios. El modelo plantea una función bi-objetivo donde la primera pretende maximizar el beneficio económico y la segunda minimizar la inversión para la implementación de una red que permitiera dar cumplimiento a la normatividad chilena vigente en materia de residuos sólidos (Banguera et al., 2018).

Otra particularidad encontrada en el inventario bibliográfico (Anexo 1) fue la metodología de solución utilizada por Amin, Zhang, & Akhtar (2017) en una CLSC para LFU en Toronto (Canadá). Esta utilizó el árbol de decisión para calcular el beneficio total de un modelo de optimización de múltiples periodos, con varios parámetros de naturaleza estocástica (demanda y rendimiento financiero). Otro aporte de la investigación fue la utilización de herramientas tecnológicas para proporcionar al modelo la ubicación y distancias reales de cada uno de los actores de la red. Las decisiones del modelo fueron selección de proveedores, ubicación de las plantas de reprocesamiento, selección de puntos de venta minoristas, cantidades a comprar a cada proveedor y productos a comercializar. Una de las falencias de esta investigación es la utilización de una función objetivo que sólo tiene en consideración factores económicos y omite el factor ambiental, adicionalmente se recomienda explorar la utilización de algoritmos meta-heurísticos como el enjambre de partículas para soportar problemas de mayor tamaño. Así mismo sugiere investigar el efecto de la canibalización en la configuración y optimización de la CLSC cuando se alcanza altos volúmenes de ventas de llantas remanufacturadas (Amin et al., 2017).

Cadenas de abastecimiento para la recuperación de LFU más complejas han sido diseñadas. Un ejemplo es la CLSC realizada por Yadollahinia, Teimoury, & Paydar (2018) que comprende seis niveles que incluyen plantas de fabricación, centros de distribución, recolección y centros híbridos que cumplen con ambas funciones (distribución y recolección de LFU), clientes clasificados en tres tipos y plantas de reciclaje, mientras que las variables de decisión evaluadas por el modelo son: cantidades a transportar entre cada nodo de la red, niveles de inventario, ubicaciones de centros de recolección, distribución e híbridos, LFU dispuestas para recuperación, reciclaje y reutilización. Su factor novedoso fue la implementación de la Gestión de Relación con los Clientes (GRCC) siendo modelado mediante la formulación de escenarios. La GRCC busca relacionar el mercadeo y los clientes. Dicho en otras palabras, busca ofrecer el producto adecuado al cliente correcto en el mejor momento y mediante el canal correcto con el objetivo de satisfacer la demanda del cliente (Yadollahinia et al., 2018).

Ebrahimi (2018) tras realizar una revisión bibliográfica encontró que el 80% de los estudios de cadenas de recuperación de desechos no consideraban la elección de proveedores. También, ningún estudio ha considerado en la modelación matemática los descuentos por cantidad. Además, el 74% de los estudios considera modelos mono-objetivo y 54% utilizaron parámetros de naturaleza determinística. Al identificar estos vacíos en la literatura diseña una red CLSC para la recuperación de LFU de seis eslabones: proveedores, fabricantes, centros de distribución, clientes, depósitos y recicladores, con un modelo estocástico de tres funciones objetivas. La primera minimiza los costos totales, la segunda minimiza los efectos ambientales y la tercera maximiza la capacidad de respuesta de la red. El factor diferencial de esta investigación fue la inclusión de descuentos por cantidad realizados por los proveedores. Finalmente, el modelo es verificado mediante la aplicación a un caso de estudio (industria iraní) solucionado mediante optimización estocástica multiobjetivo basada en la teoría de la utilidad esperada, obteniendo como resultado la satisfacción de las dos primeras funciones objetivas, mientras que la tercera no logra ser cumplida plenamente. El autor recomienda para futuras investigaciones la aplicación de nuevos métodos para solucionar el problema como programación meta, desarrollo de heurísticas o aplicación de Metaheurísticas.

Fathollahi-Fard, Hajiaghaei-Keshteli, & Mirjalili, (2018) diseñaron una red CLSC para la recuperación de LFU conformada por proveedores, productores, distribuidores, clientes, centros de

recolección y recicladores. Su factor novedoso fue la utilización de programación multinivel para determinar la ubicación y asignación de productos de cada uno de los tres niveles de decisión definidos de tal manera que los costos totales de implementación de la red CLSC sean mínimos, el primer nivel fueron las empresas manufactureras, el segundo los distribuidores y el tercer nivel los centros de recolección de LFU. Adicionalmente para la solución del modelo implementó cinco metaheurísticas hibridas, siendo la heurística híbrida de mejor de rendimiento el algoritmo de Keshtel y el recocido simulado, el cual se denominó HKASA.

Al realizar una búsqueda de la aplicación de modelos de simulación en cadenas para la recuperación de desechos diferentes a las LFU se evidencia que su utilización ha sido limitada cuando se opta mayormente por la formulación matemática y modelos de optimización (Islam & Huda, 2018), Gamberini et al. (2010) diseñaron una red de transporte para la recolección de desechos de equipos eléctricos y electrónicos, creando diferentes configuraciones de red (escenarios) que posteriormente fueron evaluados mediante modelos de simulación. Así mismo L Guerra, T Murino & E Romano (2009) utilizan un modelo de simulación modular para la logística inversa para equipos eléctricos y electrónicos fuera de uso, Shokohyar, Mansour & Karimi (2013) utilizaron un modelo de optimización basado en la simulación del leasing aplicando concepto de responsabilidad extendida al productor y optimizando el impacto ambiental y económico. Schultmann, Engels, and Rentz (2003) diseñaron una CLSC para baterías usadas combinando un modelo de optimización para la configuración de la red inversa y adaptaron un modelo de simulación a posibles opciones de reciclaje de las baterías en la fabricación de acero.

Xu et al. (2017) diseñaron una cadena de suministro inversa global para el reciclaje de residuos sólidos, siendo los primeros en incorporar al diseño la incertidumbre en la tasa de recolección, emisiones de carbono e incertidumbre en el cambio monetario, valor del transporte marítimo y en la recolección de residuos. Utilizaron Programación Lineal Entera Mixta con posterior optimización robusta validada por medio de un caso de estudio de gestión de residuos electrónicos entre Grecia y China. La limitación de esta investigación radicó en el desconocimiento de algunos parámetros. Esto lleva a los investigadores a asumir que estos parámetros se distribuían uniformemente (Xu et al., 2017).

2.2.10 Vacío científico

En virtud de lo expuesto en las secciones previas del **Estado del arte** se encuentran los siguientes vacíos en el campo de estudio:

- ✓ **Diseño de red:** En el plano Latinoamérica ninguna investigación de las encontradas para la consolidación del estado del arte consideró los flujos directos e inversos para conformar un ciclo cerrado (CLSC), en todas las investigaciones se abordó únicamente el flujo inverso para la recuperación de las LFU.
- ✓ **Fuentes de incertidumbre en la cadena de abastecimiento:** Las investigaciones latinoamericanas optan por parámetros de tipo determinísticas (75%) y están muy poco exploradas las investigaciones con parámetros estocásticos (25%).
- ✓ **Eslabones de la cadena de abastecimiento:** Los estudios latinoamericanos optan por cadenas simples de no más de 4 actores o eslabones ayudando a entender la problemática, lo

cual evidencia un rezago frente a estudios como los desarrollados por los iranís que llegan a tener en cuenta hasta 7 actores.

- ✓ **Utilización de las LFU:** En general la disposición final de LFU pasa a segundo plano en muchas investigaciones, esto representa una gran oportunidad para incluir dentro del diseño de la cadena múltiples destinos para las llantas al final de su vida útil, especialmente aplicaciones apalancadas por el desarrollo de nuevas tecnologías.
- ✓ **Función Objetivo:** El 75% de los estudios suramericanos han propuesto problemas mono-objetivo siendo el criterio económico estudiado en todos los casos, tan solo en el 25% se adoptó función bi-objetivo y en ninguno de los estudios sudamericanos revisados se utilizó una función objetivo ambiental. De igual manera se evidencia que los estudios que evalúan el factor social son escasos.
- ✓ **Metodología de solución:** Las Metaheurísticas han sido la elección recurrente por los autores que desean que su factor diferencial sea la metodología de solución, evaluando en todos los casos: calidad de respuesta Vs tiempo de respuesta. Los modelos heurísticos tienen el beneficio sobre los métodos de optimización en que sus tiempos de respuesta son muchos más cortos, pero no aseguran el hallazgo del óptimo global. En este orden de ideas los autores desarrollan Metaheurísticas Híbridas y validan su rendimiento al solucionar un problema real como lo es la cadena de abastecimiento para LFU.

Una tendencia evidenciada es el diseño de redes complejas en países con mayor número de publicaciones científicas. En este sentido, los iraníes son quienes están a la vanguardia, proponiendo redes en dos vías (flujo directo e inverso) con múltiples actores en la cadena, decisiones de ubicación en cada uno de los eslabones de la cadena, demandas y tasas de retorno no determinísticas lo cual hace que sus modelos sean más robustos y se ajusten a la realidad, implementando en sus modelos planeación estratégica lo cual demanda que sus modelos adopten decisiones en múltiples periodos de tiempo y con funciones objetivo multicriterio.

Capítulo 3. Metodología

La actual investigación representa un diseño descriptivo, cuasi experimental de naturaleza cuantitativa. Es descriptivo porque el objetivo número 3 pretende caracterizar a los actores claves que conforman la cadena de suministro de LFU en el contexto urbano (Ibagué), es de naturaleza cuantitativa, ya que se utilizan métodos y procedimientos para la estimación de parámetros de entrada y variables presentes en el modelo de optimización. Es cuasi experimental, ya que el estudio de los actores y partes interesadas se hace en el contexto donde operan. Por consiguiente, el control de la investigación sobre las variables es reducido.

3.1 Objeto de estudio

En la presente investigación se estudiaron los procesos que comprenden el diseño de una cadena de abastecimiento inversa para la recuperación de LFU, caracterizando los actores claves vinculados a cada etapa del proceso, considerando los costos, el impacto social y ambiental. Posibilitando la formulación de un modelo de programación lineal entera mixta a partir del cual se identificó la mejor alternativa de configuración de la cadena de recuperación de LFU.

3.2 Estrategia metodológica

En esta sección del documento se describe claramente las actividades investigativas necesarias para el logro de los objetivos planteados. La metodología propuesta consta de cuatro etapas, las cuales se detallan a continuación:

Etapa 1 Construcción del estado del arte.

Esta etapa pretende la revisión de literatura con vistas a encontrar vacíos o brechas científicas. Para este fin se optó por la metodología propuesta por Newbert (2007) que consta de seis etapas (ver Figura 2-3). Para encontrar investigaciones a fines al objeto del presente estudio se utilizaron las bases de datos de ***Scopus, ScienceDirect*** y ***Web of Science***, utilizando fórmulas de búsquedas que describan acertadamente el objeto de investigación. Para el registrar los aspectos más relevantes de cada documento encontrado se empleó se diseñó una matriz para la sistematización (ver Tabla 3-1). Adicionalmente, se codificaron los términos más comunes en cada una de las investigaciones para no saturar la matriz con texto (ver Tabla 3-2).

Tabla 3-1 Matriz para el registro de información

Autores	Año	Titulo Publicación	Revista	Clasificación	País	Diseño de la cadena	Actores de la cadena										
							1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total

Demanda		Tasa de retorno		Utilización de LLU										Periodo	
Determinística	No Determinística	Determinística	No Determinística	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Total	Único	Múltiple

Decisiones de ubicación								Función Objetivo					Metodología de solución	Caso de estudio
21	22	23	24	25	26	27	Total	Ambiental	Económico	Social	Desempeño	Total		

Tabla 3-2 Codificación de los elementos de la matriz para el registro de información

1	Proveedores	8	Centro de acopio	15	Barrera contra erosión	22	Planta
2	Productores	9	Centro de reciclaje	16	Acero	23	Centros de distribución
3	Centro de distribución	10	Planta de reproceso	17	Estabilizadores de terraplan	24	Centro de acopio
4	Mayorista	11	Recauchutado	18	Reciclaje	25	Minoristas
5	Minoristas	12	Proceso de combustión	19	Rellenos	26	Puntos de Recolección
6	Clientes	13	Miga de caucho	20	No definido	27	Reciclaje, recuperación o reutilización
7	Puntos de recolección	14	Defensa de muelles	21	Proveedores		

Etapa 2 Caracterización de componentes clave

Terminada la etapa de conceptualización y luego de establecer los vacíos existentes en las investigaciones referentes al diseño de cadenas de abastecimiento inversas para la recuperación de LFU, se procedió a identificar los actores clave que hacen parte de la logística inversa lo cual involucra decisiones de transporte, localización, gestión de inventarios, igualmente importante fue identificar los tipos de llantas que se generan en la ciudad, localización de generadores o recolectores de LFU, los sistemas de recolección existentes en la ciudad, los procesos y operaciones demandas por la logística inversa. Además, se consideró el marco normativo vigente en Colombia.

En general, los modelos de optimización asociados al diseño de cadenas de suministro requieren una cantidad considerable de datos de entrada. La estimación de estas entradas se obtuvo a partir de trabajo de campo y consulta de registros existentes en fuentes secundarias como: instituciones gubernamentales, entrevistas y visitas a los distintos centros generadores de LFU. Los siguientes aspectos explican lo anterior y fueron utilizados para el registro de la información y la posterior estimación de parámetros:

- El empleo de *Google maps* para determinar rutas, tiempos, distancias y localización de los diferentes agentes presentes en los eslabones de la cadena.
- Consulta de literatura especializada para la estimación de parámetros sociales, ambientales y económicos. Adicionalmente, permite identificar los procesos vinculados a la transformación de LFU o sus derivados
- Búsqueda de información a partir de informes o publicaciones realizadas por el Ministerio de Transporte sobre datos y estadísticas pertinente al sector, por ejemplo: Tasas de consumo de combustible cuando el vehículo tiene carga, desgaste de las ruedas, costo de fletes, y demás.

- Determinación de los parámetros ambientales que se encuentren en el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), así como la metodología de medición de los criterios ambientales a considerar dentro del modelo.
- Implementación de instrumentos que faciliten la recolección de información y caracterización de los actores de la cadena, por ejemplo, formulación de encuestas para aplicar a los generadores de LFU en la ciudad de Ibagué.

Etapa 3 Diseño y formulación matemática

Un adecuado diseño y formulación matemática de un caso de estudio demandan un conocimiento y entendimiento detallado de la situación problemática. Los autores enunciados en el estado del arte optaron por ilustrar la problemática de forma gráfica, así lograron resumir las características e interacciones de los actores tomados en consideración dentro de su diseño de red. Algunas de esas consideraciones aplicadas en la presente investigación fueron:

- ✓ Localización de los generadores o recolectores de llantas usadas.
- ✓ Establecer los eslabones de la cadena definiendo claramente los actores aguas arriba y aguas abajo. En caso de que algunos actores no existan se plantea la decisión de establecer la mejor ubicación para este actor, algunos ejemplos son: Centros de acopio de llantas usadas, recolectores o plantas de producción y reprocesado.
- ✓ Definición de los tipos de llantas que serán objeto de estudio.
- ✓ Evaluación de los medios de transporte a utilizar en cada eslabón de la cadena, considerando aspectos técnicos como: capacidad, consumo energético, costo de adquisición, generación de CO2, tiempos de inactividad por mantenimiento, entre otros.

Diseño

Utilizando como insumos las etapas previas, se procedió a diseñar la configuración de red que más se ajustaba a la realidad del contexto urbano de la ciudad de Ibagué. Considerando las limitaciones y particularidades del objeto de estudio. En este punto fue vital definir los eslabones que componen la cadena de recuperación, los actores que la integran, las interacciones entre ellos, las operaciones y los procesos logísticos que demandan cada tipo de llanta o la utilización para las LFU. A pesar de los esfuerzos realizados en el desarrollo de la investigación, es importante aclarar que la realidad de una cadena de suministro por lo general resulta más compleja que el diseño teórico planteado y esta investigación no es la excepción, por lo cual, se declararon los supuestos y las limitaciones asumidas en el estudio para simplificar el caso de estudio y facilitar la modelación matemática de la problemática.

Modelación.

En la presente investigación se optó por la formulación matemática de un problema de Programación Entera Mixta. En este proceso fueron múltiples los referentes teóricos que se tomaron en consideración, cada uno evidentemente con sus particularidades producto del contexto, factor diferencial impregnado por el autor o limitaciones practicas del estudio. A pesar de esos factores de diferenciación, existen puntos de convergencia en la formulación de una cadena de suministro inversa. En el presente estudio se consideraron tres procesos en concreto: Abastecimiento (recogida)

de LFU, procesamiento de las LFU recolectadas y distribución de aquellas LFU procesadas en el punto de acopio objeto de estudio. Adicionalmente, considerando los vacíos científicos ilustrados previamente se propuso un modelo de múltiples objetivos (económico, social y ambiental), de múltiples periodos de tiempos.

Evidentemente los estudios volcados al diseño de cadenas de suministro se plantean decisiones de localización. En esta investigación se proponen 4 alternativas de localización y se incorpora como decisión la implementación de tecnología al interior del centro de acopio. De igual manera decisiones asociadas al flujo de material a lo largo de la cadena son considerados dentro de la modelación.

Etapa 4 Estrategia de solución y evaluación de escenarios

Una vez formulado y modelado el caso de estudio, con la ayuda del software GAMS se procedió a dar solución al modelo matemático. Se utilizaron los métodos exactos, en específico la optimización matemática, que ofrece la ventaja de entregar la mejor solución al problema, mientras que su desventaja radica en el alto costo computacional dada la revisión exhaustiva del espacio de solución factible. Sin embargo, el actual proyecto de investigación involucra decisiones de tipo estratégico, razón por la cual es imperativo obtener la mejor solución y los tiempos de espera para solucionar el modelo pasan a segundo plano.

Finalmente se realizaron variaciones sobre algunos de los parámetros de entrada para analizar el comportamiento de la cadena de recuperación de LFU ante posibles variaciones del entorno. Esto ofrece un mayor conocimiento del caso de estudio y comparar escenarios posibles en función de criterios económicos, ambientales y sociales.

Capítulo 4. Sistemas de gestión de residuos de llantas usadas

Con el aumento del uso de vehículos alrededor del mundo, debido en gran parte, al aumento de la población y al aumento de la capacidad adquisitiva en países en desarrollo, la gestión de las LFU se está convirtiendo en un problema alarmante en todo el mundo. Las LFU son consideradas hoy en día como una fuente de materiales que pueden ser usados o incorporados en otros procesos productivos. Los avances tecnológicos y la innovación han contribuido a que mejoren las tasas de recuperación de LFU en el mundo. Sin embargo, el reciclaje de LFU no es un éxito a nivel mundial. Un ejemplo de ello es que países de la Unión Europea lograron recuperar el 92% de sus LFU en el año 2017 y Colombia solo logró recuperar cerca del 35% de sus LFU para el mismo año (ETRMA, 2019; MADS, 2017).

Durante el presente capitulo se presenta el funcionamiento de la cadena de suministro inversa para LFU en diferentes partes del mundo. De esta manera se ofrece una visión global de la problemática.

4.1 Un modelo de gestión de llantas usadas exitoso: La Unión Europea

4.1.1 Sistemas implementados para la gestión de llantas usadas

En la Unión Europea la gestión de las llantas usadas es una actividad central de la industria de las llantas, con igual importancia que otros procesos como: diseño o producción. En general la gestión de este residuo en la Unión Europea (UE) se realiza por tres sistemas diferentes:

Responsabilidad extendida al productor (REP): En este sistema el fabricante de un artículo tiene el deber de garantizar que los desechos de los productos que ha fabricado sean eliminados responsablemente y con la menor afectación sobre el medio ambiente. Este es el sistema mayormente adoptado en la UE. Actualmente 23 países de la UE han optado este sistema (ETRMA, 2018a).

Sistema de Libre Mercado (SLM): En este sistema a diferencia del anterior, la ley no designa un responsable para la gestión de un residuo determinado. La ley únicamente plantea objetivos a cumplir por sistema de gestión de residuos. Los operadores de la cadena de suministro inversa emprenden negociaciones en condiciones de libre mercado, siempre y cuando cumplan los lineamientos normativos. Este tipo de sistema ha sido implementado en países como Austria, Suiza o Alemania para la gestión de las llantas usadas. Una variante a este sistema fue implementada por el Reino Unido. El sistema funciona bajo la misma premisa, pero los diferentes actores de la cadena de recuperación deben informar a las autoridades nacionales las cifras y estadísticas de sus actividades. A este sistema se le llama “Libre mercado administrado”.

Sistema Fiscal: Este sistema plantea que la gestión de los residuos es una responsabilidad del Estado. La financiación del sistema de gestión de residuos se realiza mediante un impuesto que es gravado al productor y posteriormente transferido al consumidos. Este modelo es aplicado para la gestión de llantas usadas en países como Croacia o Dinamarca.

La aplicación de la responsabilidad extendida al productor en la mayoría de los países de la UE ha llevado a la creación de diferentes empresas sin ánimo de lucro. La función de estas empresas es gestionar la recolección y recuperación de las llantas al final de su vida útil en su país, promoviendo alternativas económicas y amigables con el medio ambiente. Estas empresas están obligadas a informar a las autoridades de cada país el desempeño que ha presentado la cadena de recuperación.

Esto ofrece trazabilidad y confianza en los procesos realizados. En la ***Tabla 4-1*** se presentan las empresas sin ánimo de lucro presentes en los diferentes países de la Unión Europea (ETRMA, 2019).

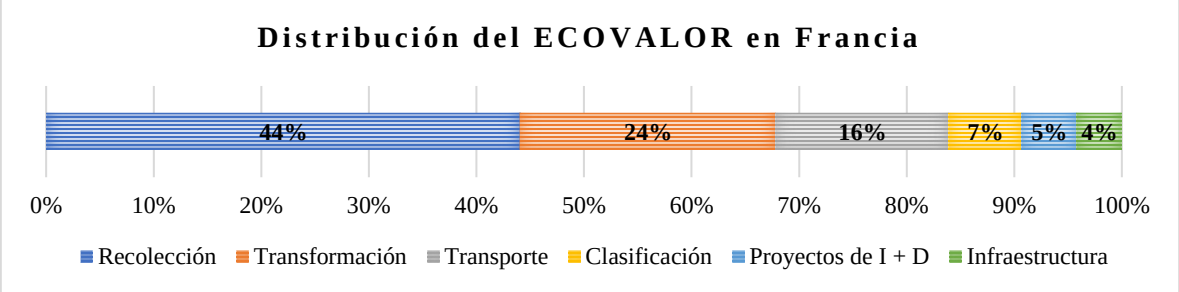
Tabla 4-1 Empresas sin ánimo de lucro en países con REP en la UE

País	Empresa sin ánimo de lucro	País	Empresa sin ánimo de lucro
Bélgica	RECYTYRE	Países Bajos	RecyBEM Band & Milieu
España	SIGNUS	Polonia	CUO
Finlandia	SUOMEN RENGASKIERRÄTYS	Portugal	valorpneu
Francia	ALIAPUR	Republica Checa	eltma
Grecia	eco elastika	Eslovaquia	
Irlanda	REPAK ELT	Rumania	eco envelope
Italia	ecopneus	Suecia	SDAB
Noruega	Dekkretur	Turquía	LASDER

Fuente: Elaboración propia con base en ETRMA, 2019

Para cumplir con su función las Empresas sin ánimo de lucro han diseñado, estructurado y coordinado una red compuesta por diferentes empresas calificadas para desarrollar las diferentes operaciones: desde la recolección de las llantas fuera de uso hasta las actividades de recuperación. Este sistema es financiado mediante una contribución ambiental que en países como España o Portugal se denomina Ecovalor. Este valor es pagado por el productor a la empresa sin ánimo de lucro (Valorpneu, 2019). El Ecovalor es diferente para cada tipo de neumático en función de su peso, en España, por ejemplo, la tarifa Ecovalor para automóviles es de 1,18 € (SIGNUS, 2019). La mayor parte de este recaudo se destina al proceso de recolección de llantas usadas. De igual manera, las diferentes entidades sin ánimo de lucro financian: empresas dedicadas a la transformación del residuo, proyectos de investigación y desarrollo que se alinean con los objetivos de la entidad, operaciones de transporte a lo largo de la cadena, procesos de clasificación e infraestructura (ver **Figura 4-1**).

Figura 4-1 Distribución del Ecovalor en Francia

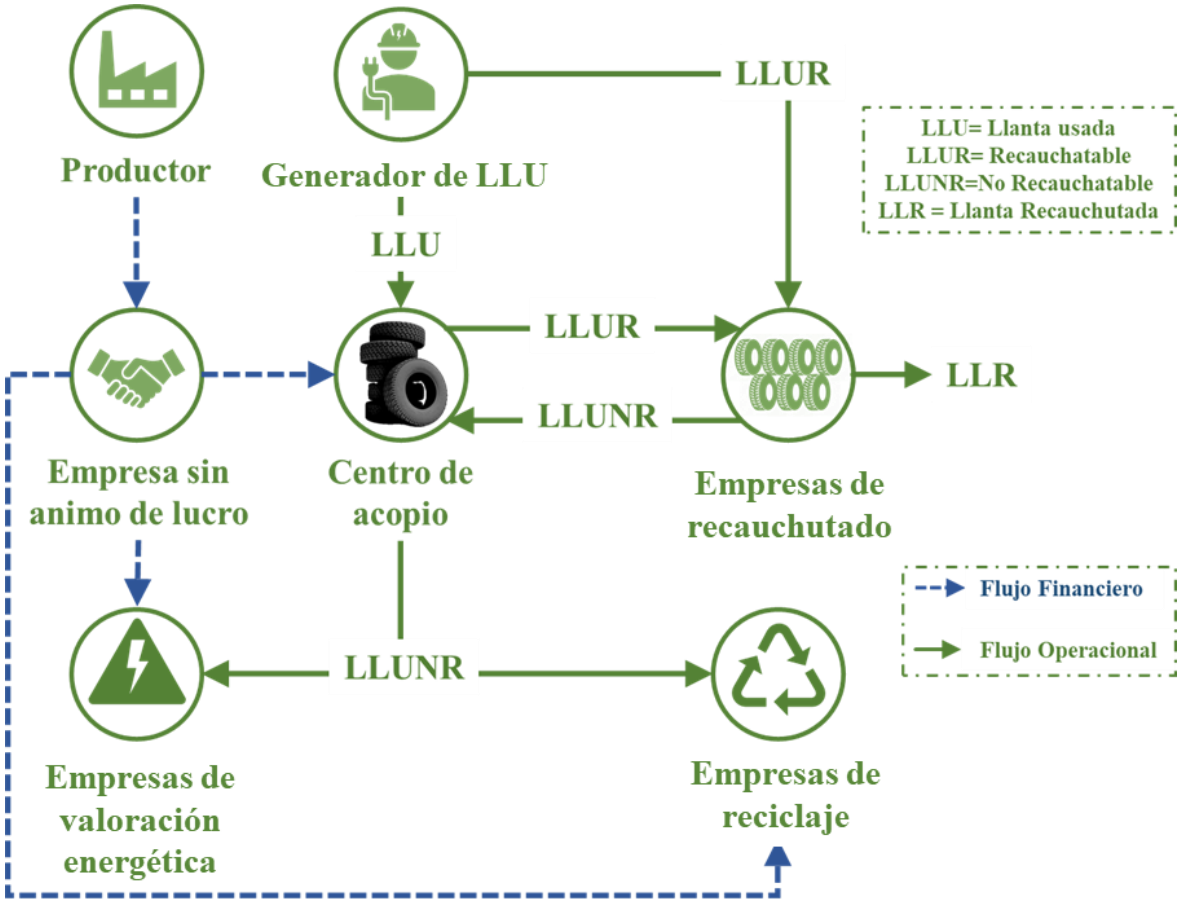


Fuente: Elaboración propia con base en Aliapur, 2019

4.1.2 Actores y funcionamiento de la cadena de recuperación

Es evidente que en este sistema la entidad sin ánimo de lucro es el eje de la cadena de recuperación de llantas usadas. En tanto, coordina los esfuerzos de cada uno de los actores que compone la cadena. Cada una de estas entidades tiene claramente definido la función y la ubicación de los actores de la cadena. Por ejemplo, Ecopneus en Italia, dispone de una red externa y especializada, a la cual le confían los procesos de: recolección, transporte y recuperación de llantas usadas. Permitiendo trazabilidad en la gestión del residuo y procurando la selección de la mejor alternativa de recuperación del residuo considerando su estado, favoreciendo el reciclaje sobre la recuperación de energía. En la Figura 4-2 se ilustra la cadena de recuperación de llantas usadas en países de la Unión Europea que aplican el sistema de Responsabilidad Extendida al Productor (Valorpneu, 2018).

Figura 4-2 Cadena de recuperación de llantas usadas en la Unión Europea.



Fuente: Elaboración propia con base en Valorpneu, 2018

Flujo operacional o de materiales. En este sistema cualquier persona o empresa puede entregar sus llantas usadas a los "Generadores de LLU", esta actividad no tiene costo para quien entrega las llantas (solamente asume el costo de desplazamiento al punto de recolección). Posteriormente, estas llantas son enviadas a centros de acopio, donde se realiza un proceso de inspección y clasificación. Para luego dependiendo de su estado ser redirigidas a puntos de destino (Recauchutadoras. Proceso de reciclaje o valoración energética). Estos puntos destinos son los encargados de dar disposición final a las LFU, por ejemplo, las empresas de reciclaje utilizan las LFU para incorporar sus componentes

como materias a una nueva cadena de valor u ofrecer un nuevo producto. La empresa sin ánimo de lucro no tiene dominio o manejo alguno sobre las LFU.

Flujo financiero. En el sistema presentado la empresa sin ánimo de lucro es financiada en gran medida por un impuesto ambiental que dependiendo del país cambia su nombre. Este impuesto es girado por el productor y es administrado y redistribuido por la empresa sin ánimo de lucro a los diferentes actores de cadena de recuperación. La descripción de la repartición del impuesto ambiental fue ilustrada en la **Figura 4-1**.

En esta estructura cada uno de los actores tienen funciones y responsabilidades definidas.

Productores, persona física o jurídica que introduce llantas en el mercado de la Unión Europea, ya sea porque los fabrique, los compre en el exterior o procedan de un vehículo al final de su vida útil.

Los generadores, son establecimientos que, en el desarrollo de su actividad productiva, genera llantas usadas como resultado de su cambio o sustitución. Así mismo, son quienes suministran las llantas al final de su vida útil a los centros de acopio, esta actividad se realiza de forma gratuita. Los generadores tienen la posibilidad de enviar directamente las llantas usadas a empresas de recauchutado. Los generadores están obligados a recibir las llantas fuera de uso de sus clientes siempre y cuando se mantenga la proporción de cantidad y referencia.

Centros de Acopio, son lugares de almacenamiento temporal para las llantas usadas. Los centros de acopio reciben cualquier tipo de llantas a costo cero. Este actor cumple con dos objetivos fundamentales: controlar el flujo de las llantas usadas (origen y destino) y realizar el proceso de clasificación. Para este último se realizan una serie de pruebas. Dependiendo de su estado, una llanta puede ser clasificada como: Recauchutable o como no Recauchutable. En España, existe una tercera clasificación que es “mercado de ocasión”. Este mercado pretende aprovechar las llantas que están en buen estado y siguen teniendo vida útil.

Las empresas de Valoración energética y de procesos de reciclaje, son quienes contribuyen a cerrar el ciclo la cadena de recuperación. Estas empresas reciben de los centros de acopio las llantas usadas que no presentan condiciones ideales para el recauchutado. Por lo general, las llantas son procesadas en gránulos de caucho que luego son utilizados para reciclaje o generación de energía. Estas empresas reciben apoyo financiero de la empresa sin ánimo de lucro de su país si cumple con las normas legales.

El transporte de las llantas usadas desde los centros de recepción a los diferentes destinos es realizado por empresas de transporte asociadas a la empresa sin ánimo de lucro. Así mismo es controlado y financiado por la empresa captadora de la tarifa ECOVALOR.

El consumidor, este actor es clave en cualquier cadena de suministro y con frecuencia es omitido del sistema. En la cadena de recuperación de llantas usadas en la UE el consumidor (comprador de llantas nuevas por reposición) tiene el deber de exigir que en su factura de compra se refleje la tarifa del ECOVALOR, de esta manera el usuario contribuye al buen destino del futuro residuo del producto que ha adquirido.

Finalmente, el **flujo de información** de la cadena ilustrada se concentra en la empresa sin ánimo de lucro. Dicha empresa consolida una base de datos que es de acceso público con información de todos los actores de la cadena de recuperación. Adicionalmente, esta base de datos es alimentada periódicamente por los diferentes actores. Por ejemplo, en Italia las empresas que comercializan

llantas nuevas reportan mensualmente sus ventas a la empresa sin ánimo de lucro. Este flujo de información permite: anidar esfuerzos, ofrece un lugar de convergencia para todos los actores de la cadena de recuperación, dar trazabilidad a las LFU recuperadas por el sistema, formular objetivos para la gestión de las LFU y evaluar fácilmente los indicadores de gestión que rigen el sistema (tasas de recolección, actores caracterizados, disposición final, generación de LFU, etc)

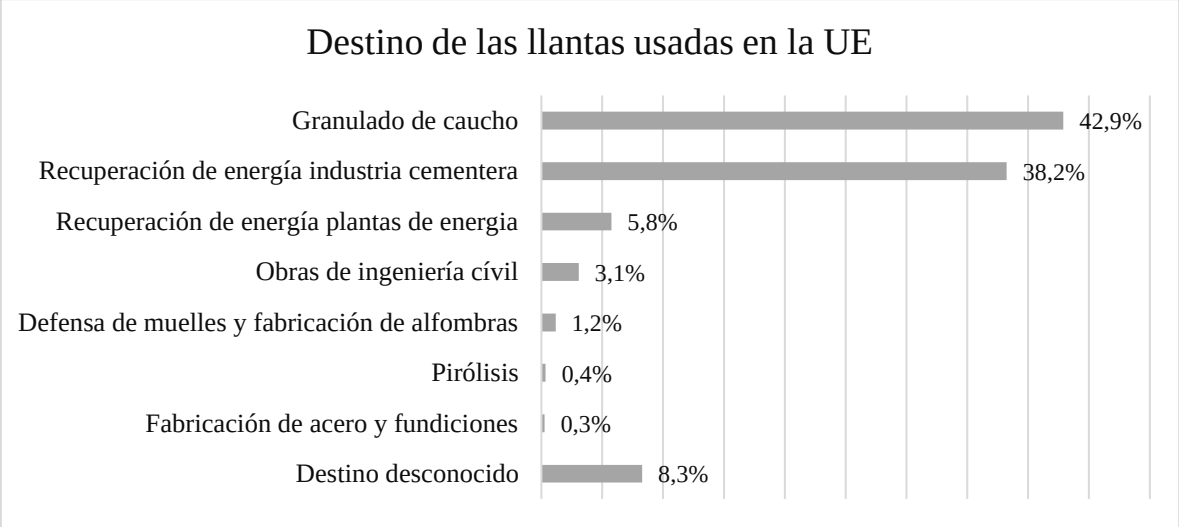
4.1.3 Resultados de la implementación

Gran parte del éxito de la UE en la gestión de las LFU radica en la correcta comunicación entre cada uno de los actores de la cadena. La gestión de la información de estos sistemas complejos está soportada en la mayoría de los casos por sistemas de información en línea, que garantiza la interacción de los diversos operadores involucrados en la cadena de recuperación de manera rápida y efectiva. A pesar de que la información es centralizada por una única entidad (Empresa sin ánimo de lucro) la información está disponible para cualquier actor de la cadena y para la comunidad en general, por lo cual el flujo se da en doble vía. Estas acciones siempre están enfocadas a: aumentar el volumen de LFU recuperadas y promover prácticas de recuperación cada vez más amigables con el medio ambiente (REPAK ELT, 2019).

La normatividad europea propone la recuperación del 80% de los materiales que compone una llanta nueva, el restante porcentaje consideran es consumido durante la vida útil de la llanta. La *European Tyre & Rubber Manufacturers Association (ETRMA)* anualmente reporta el comportamiento de la gestión de las LFU en la UE. En su más reciente entrega establecen que en el año 2017 llegaron al final de su vida útil 3.424.500 toneladas de llantas, de las cuales lograron ser recuperadas 3.142.513 toneladas. Para el cálculo de generación de LFU únicamente se consideran las llantas que fueron colocadas en mercado legalmente, es decir, que la cantidad reportada por ETRMA no corresponde a la cifra real de generación de LFU. Por ejemplo, se estima que en Italia se colocan ilegalmente entre 30 y 40 mil toneladas de llantas anualmente, la comercialización de estás llantas no paga el ECOVALOR lo cual dificulta el proceso de trazabilidad y representa 12 millones de euros al año que dejan de ser percibidos por el sistema de gestión. Lo anterior también justifica que ocasionalmente se presenten tasas de recuperación superiores al 100%, estos casos se presentan cuando el sistema de gestión de llantas usadas logra financiar la recuperación de todas las llantas que fueron puestas en mercado legalmente y una fracción de las que fueron puestas en mercado de manera ilegal, se estima que en Italia han logrado recuperar 120 mil toneladas de llantas colocadas ilegalmente en mercado desde el 2011 (Ecopneus, 2020). En la **Figura 4-3** se presentan los destinos para las LFU descritos por la ETRMA y su respectiva participación en la gestión del residuo, se evidencia que tan solo el 8,3% de las LFU presentan una disposición final desconocida.

Para el año 2017 las practicas más frecuentes para la recuperación de LFU en la UE fueron: La recuperación de energía que dispuso de 1.506.291 toneladas y la fabricación de granulado de caucho que recuperó 1.469.000 toneladas. La utilización de LFU en obras de ingeniería civil fue de 105.000 toneladas. En la **Figura 4-3** se detalla la participación de los diferentes destinos de las LFU en la UE, es importante aclarar que la ETRMA considera que una llanta recauchutada aún no ha llegado al final de su vida útil por lo cual esta práctica no es considerada como un destino para las LFU (ETRMA, 2019).

Figura 4-3 Destino de las llantas usadas en la UE en el año 2017



Fuente: Elaboración propia con base en ETRMA, 2019

El país de la UE que implemento REP más recientemente fue La República de Irlanda en el año 2017. Para ese año Irlanda lograba recuperar 4.656 toneladas de LFU, luego de un año de operación de REPAK ELT empresa sin ánimo de lucro fundada para gestionar la cadena de recuperación de LFU en Irlanda se reportaba la recolección y recuperación de 31.000 toneladas de LFU, lo que representa el 97% del total de residuos generados de este tipo. Para el año 2019 se mantuvo la tasa de recuperación en 97% (REPAK ELT, 2020), sin embargo, la cantidad tuvo un incremento del 7% con respecto al año 2018. Este representa un caso exitoso de la aplicación de REP, el éxito detrás de estas cifras radicó en la integración de los diferentes actores de la cadena de suministro. La primera acción emprendida por REPAK ELT fue caracterizar y hacer miembros a minoristas, productores e importadores de llantas ofreciendo herramientas tecnológicas que facilitaban el flujo de información. Un segundo paso fue la identificación de los actores relacionados con la logística inversa para posteriormente ser un puente entre ambos actores (REPAK ELT, 2019).

4.2 La gestión de llantas usadas en Colombia

4.2.1 Sistema implementado para la gestión de llantas usadas

La implementación de programas Posconsumo en Colombia son relativamente recientes (ver Tabla 4-2). Para el caso de las LFU, en el año 2017 el Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible expidió la Resolución 1326 de 2017 “por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas”, que deroga a la resolución 1457 de 2010. La Resolución 1326, la cual amplia y fortalece los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de las llantas usadas, al incluir además a las llantas de motocicletas y bicicletas. Dicha normatividad está basada en conceptos de *Responsabilidad Extendida al Productor (REP)*. Siendo esta una estrategia para la protección del medio ambiente, estableciendo que el fabricante de llantas es responsable de todo el ciclo de vida del producto, en especial de las etapas de recuperación, reciclaje y eliminación del residuo.

Tabla 4-2 Normatividad de programas de posconsumo en Colombia

Residuo	Año	Normatividad
Gestión de residuos peligrosos	2005	Decreto 4741
Medicamentos vencidos	2009	Resolución 0371
Baterías Plomo Ácido	2009	Resolución 0372
Pilas	2010	Resolución 1296
Computadores y periféricos	2010	Resolución 1512
Aparatos eléctricos y electrónicos (AEE)	2013	Ley 1672
Envases de plaguicidas	2013	Resolución 1675
Llantas usadas	**2017**	**Resolución 1326**
Aceite de cocina	2018	Resolución 0316
Envases y empaques de papel, cartón, plástico, vidrio y metal	2018	Resolución 1407

Fuente: Elaboración propia con base en ANLA, 2020

Alrededor de 280 empresas reportaron importaciones de llantas entre 2012 y 2016 en Colombia. Se desconoce la producción nacional de llantas, sin embargo, es de conocimiento público que la única empresa que fabrica y comercializa llantas en el país es Goodyear de Colombia S.A, en tanto, su único competidor Icollantas (Filial de Michelin en Colombia) dejó de operar en el año 2013 (Portafolio, 2013). Lo anterior, deja en evidencia que el mercado de llantas en Colombia es apalancado en gran medida por las importaciones, por lo cual el valor agregado generado para el país es mínimo. Mediante la Resolución 1326 de 2017 se crearon en Colombia los "Sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de LFU". Esta normatividad aplica a: 1) productores de llantas y 2) fabricantes, importadores o ensambladores de vehículos que superen unos umbrales mínimos (Ver ***Tabla 4-3***). Estos dos actores son los responsables de la formulación, presentación e implementación de los sistemas de recolección selectiva. Los productores pueden responder a este requerimiento mediante la formulación de sistemas individuales o en su defecto optar por sistemas colaborativos que involucren a más de un productor. La presentación de los sistemas de recolección selectiva para su aprobación debe realizarse ante Autoridad Naci*onal de Licencias Ambientales (ANLA)*. Posterior a la aprobación deben presentarse informes anuales de actualización y avance del sistema que deben contener: cantidad de LFU recolectadas (peso y cantidad), cobertura geográfica, porcentaje de avance en las metas, puntos de recolección y mecanismos de recolección, mecanismos de comunicación y actualización de metas para el siguiente periodo.

Tabla 4-3 Umbrales de aplicación de la Resolución 1326 de 2017

Tipo	Umbral de llantas	Umbral de vehículos
Bicicletas	200	100
Motocicletas, motociclos, ciclomotores o Moped	200	100
Automóviles	150	40
Camionetas y microbuses	100	20
Busetas, buses y camiones	50	10
Tractomulas, buses de transporte masivo	50	5
Llantas de vehículos fuera de carretera	5	3

Fuente: Elaboración propia con base en Resolución 1326 de 2017

Los costos asociados al funcionamiento de los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de LFU son asumidos por los productores. A diferencia del caso de la UE en Colombia no existen impuestos o tarifas ambientales al momento de la venta que financien todo el sistema. En la resolución

1326 de 2017 se proponen metas de recolección de LFU para cada una de las vigencias (ver ***Tabla 4-4***). En este sentido, la cantidad de llantas a recolectar y gestionar se calculan con base al promedio de las llantas puestas en mercado en los dos años previos al año de recolección. Para el año 2017 la meta de recolección de llantas para automóviles, camionetas, microbuses, busetas, buses camiones y tractomulas fue de 45% y sube gradualmente hasta alcanzar el 80% en el año 2024.

Tabla 4-4 Metas de recolección propuestas en la Resolución 1326 de 2017

Periodo de recolección	Meta de recolección llantas de automóviles, camiones, camionetas	Meta de recolección llantas de bicicleta y motocicletas
2017	45%	-
2018	50%	-
2019	55%	20%
2020	60%	25%
2021	65%	30%
2022	70%	35%
2023	75%	40%
2024	80%	45%
2025	80%	50%
2026	80%	55%
2027	80%	60%
2028	80%	65%

4.2.2 Actores y funcionamiento de la cadena de recuperación

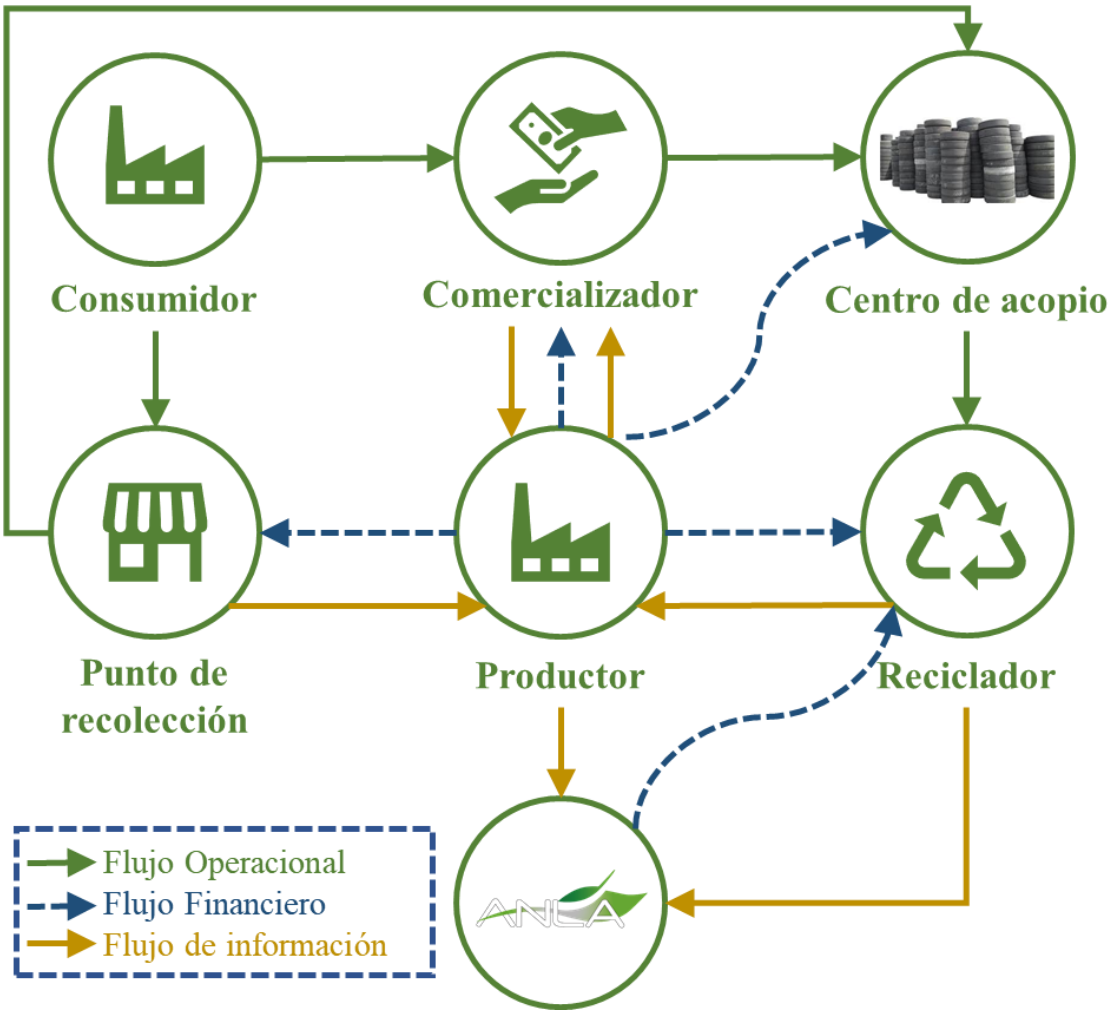
En la gestión de llantas usadas en Colombia el flujo de información y la interacción entre los actores que la componen es limitado. Es evidente la ausencia de una entidad que anide los esfuerzos de cada uno de los actores y que sirva de puente de comunicación entre ellos. Emprender acciones de encadenamiento productivo por medio de la vinculación de actores, coordinación de esfuerzos, fortalecimiento comercial mejorará el desempeño económico, ambiental y social de la cadena de recuperación de LFU en Colombia. En la ***Figura 4-4*** se ilustran los actores que participan en la cadena de recuperación, sus interacciones en términos de flujo de producto, información y financiero.

Flujo de operacional. De acuerdo con la Resolución 1326 de 2017 un consumidor que dispone de llantas que han llegado al final de su vida útil las puede dejar en los puntos de recolección autorizados por la ANLA o devolverlas a su comercializador. Ambas opciones no tienen cargo alguno para el consumidor. Todos los actores de la cadena de recuperación tienen prohibido realizar las siguientes acciones con las LFU: abandonarlas en espacio público, quemarlas, acumularlas a cielo abierto, enterrarlas, disponerlas en rellenos sanitarios o utilizarlas como combustible sin la autorización de la entidad ambiental. Una vez las LFU llegan al centro de acopio son dirigidas a los procesos de reciclaje, lo ideal es que dependiendo del estado de la LFU se realice un proceso especifico. Sin embargo, en Colombia ese no es el caso. El proceso mayormente implementado para dar disposición a las LFU es la recuperación energética en la industria cementera.

La Resolución 1326 de 2017 establece que la **financiación del sistema** debe ser asumida por los "productores de llantas" (más adelante se describe este actor). El estado por su parte ofrece alivios tributarios y financiación a proyectos que apoyen la gestión de residuos. El productor debe financiar el funcionamiento de los puntos de recolección de LFU, así como debe asumir el costo de transporte

asociado a la recolección de LFU (tanto a los puntos de recolección como a los comercializadores). De igual manera es responsabilidad del productor dar una correcta disposición final a las LFU. Por lo cual, deben acudir a empresas debidamente certificadas por la ANLA ("reciclador") que den disposición final al residuo y asumir un costo financiero por la gestión final del residuo.

Figura 4-4 Cadena de recuperación de llantas usadas en Colombia



Fuente: Elaboración propia con base en Resolución 1326 de 2017

El flujo de información se concentra en el productor, quien debe presentar anualmente un informe a la ANLA detallando el funcionamiento del sistema de recolección selectivo. La evaluación del cumplimiento de la normatividad por parte de los importadores es apoyada por la Ventanilla Única de Comercio Exterior (VUCE) quienes otorgan licencias de importación detallando cantidades, referencias, origen, entre otras consideraciones.

A continuación, se detalla cada uno de los actores:

Productor de llantas: Persona natural o jurídica que realiza alguna de las siguientes acciones:

- Fabricación de llantas que son puestas en el mercado colombiano con marca propia
- Comercialización de llantas con marca propia, fabricadas por terceros.

- Importación de llantas para comercialización en el mercado colombiano.
- Importación de vehículos (siempre que supere los umbrales relacionados en la ***Tabla 4-3***).
- Fabricación o ensamble de vehículos para comercialización en el mercado colombiano.

En la ***Figura 4-4*** el termino Productor engloba todos los actores mencionados previamente, en tanto, de acuerdo con la Resolución 1326 de 2017 sus funciones y obligaciones son las mismas.

Consumidor: Persona natural o jurídica que adquiere llantas como destinatario final de las mismas. Su obligación es retornar las LFU a los puntos de recolección establecidos por los productores, comercializadores o importadores y acudir al proceso de recauchutado únicamente cuando sea viable técnicamente.

Punto de recolección: Lugar que cumple los criterios ambientales establecidos por la ANLA para recibir LFU devueltas por los consumidores para su posterior disposición final.

Centro de acopio: Lugar de depósito temporal de LFU. Su almacenamiento debe minimizar los impactos paisajísticos y los riesgos (proliferación de mosquitos, incendios, entre otros). La Resolución 1326 plantea las siguientes alternativas de almacenamiento: Almacenamiento en contenedores, almacenamiento en bodegas cubiertas y almacenamiento a cielo abierto.

Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA): La evaluación general, el seguimiento y la supervisión de los sistemas de recolección de LFU están bajo la responsabilidad de la ANLA. Esta entidad pública es la encargada de evaluar, supervisar y controlar las actividades que requieran de licencias, permisos o que presente reglamentación ambiental en el ámbito nacional. La ANLA desarrolla una revisión y evaluación de los planes de recolección selectivos presentados por los productores, importadores y comercializadores de llantas (sean individuales o colectivos) y supervisa el cumplimiento de la normatividad mediante la revisión de informes anuales y realización de auditorías de las partes involucradas en el sistema (Productores/importadores/comercializadores, empresas de reciclaje, puntos de recolección y centros de acopio/áreas de almacenamiento).

Gestor de llantas usadas (Reciclaje): Persona natural o jurídica que realiza actividades de reutilización, almacenamiento o aprovechamiento de LFU. Algunas de las empresas que desempeñan este rol en el país son:

> ***Mundo Limpio,*** constituida en el año 2007, ubicada en el municipio de Carmen de Viboral en Antioquia, comprometida con el medio ambiente, consciente del daño ambiental generado por la mala disposición de las LFU y especialista en el aprovechamiento responsable de las mismas, generando subproductos como el caucho, acero y fibra.
>
> Esta empresa procesa alrededor de 1.000 toneladas de gránulo de caucho al mes que luego sirve de materia prima para obras de ingeniería civil, canchas sintéticas, pisos de seguridad para parques infantiles, fabricación de tapetes o procesos de combustión para generación de energía (El Colombiano, 2010).
>
> ***Ecology Rubber,*** Empresa ubicada en la ciudad de Medellín, creada en el año 2009, enfocada en el sector de caucho. Desarrollan superficies amortiguadoras de impactos y restauración de superficies a base de granulo de caucho proveniente de LFU. Su aplicación se extiende a parques infantiles, gimnasios o canchas multipropósito, con la promesa de fácil instalación y mantenimiento (Ecology Rubber, 2020).

Rueda Verde, Empresa del Grupo Retorna sin ánimo de lucro que está a favor de la gestión ambiental, su principal objetivo es prevenir y controlar la degradación del ambiente en especial del daño causado por las LFU que han sido desechadas. Es catalogado como el primer programa de posconsumo del Gobierno Nacional, actualmente participan en el mercado de LFU en casi el 80% en 70 empresas asociadas.

Tiene presencia en 20 departamentos, cuenta con 237 puntos de recolección y tiene una red de 1.382 usuarios institucionales o empresariales. En los últimos cuatro años han logrado recoger y gestionar más de 6.500.000 de LFU.

Esta empresa periódicamente ejecuta jornadas de recolección de LFU en puntos estratégicos a lo largo del territorio nacional. A estos esfuerzos también se suman Autoridades ambientales regionales. Durante estas jornadas las personas o empresas entregan sus LFU bajo la modalidad de donación y estas entidades le entregan una certificación ambiental (Rueda Verde, 2019).

Grupo Renova, Compañía ubicada en la ciudad de Bogotá, dedicada a la trituración, destrucción y correcto manejo ambiental de las LFU. Producen y comercializan caucho, como materia prima para la fabricación de: losas en caucho, caucho granulado para canchas sintéticas, caucho pulverizado para aplicaciones asfálticas y caucho granulado para alcorques.

Huella Urbana, Empresa ubicada en el departamento de Cundinamarca. Dedicada al diseño, producción y comercialización de productos a partir del reciclaje de residuos, actualmente su mercado se desarrolla en la producción de pisos y baldosas fabricados con caucho de LFU desde tráfico liviano hasta tráfico pesado, así mismo, fabrican topes para parqueaderos (Huella Urbana, 2020).

Eko Group Colombia S.A.S, ubicada en la localidad de Copacabana, en el departamento de Antioquia. Recuperan LFU de rines que oscilan entre las 13 a 22,5 pulgadas, realizan un proceso de trituración mecánica para separar los elementos que componen la llanta. Han trabajado en proyectos de relleno para canchas sintéticas, pisos para animales, camas para vacuno, aplicación en pavimento y fabricación de productos de caucho permitiéndoles recuperar 12.000 LFU y contribuir a la pavimentación de 3.472km de carreteras con asfalto modificado (Group, 2020).

ENVÉS, empresa ubicada en Bogotá, su oferta de mercado se basa en productos realizados con material reciclado de: carpas de camión, llantas, neumático, textiles post industriales, banner, residuos agrícolas, botellas y papel. Los productos comercializados a base de LFU son: individuales, morrales y cartucheras. Han logrado dar disposición final a 42.000kg de llantas y neumáticos usados (Envés, 2020).

CYCLUS, fundada en el año 2014 en Bogotá. Su oferta comercial son morrales, mochilas y bolsos fabricados con canvas, cuero natural y neumático usado. Su proceso de comercialización se realiza mediante un portal web (https://www.cyclus.com.co/) y desarrollan un modelo de negocio B2B, tiene presencia en Japón, España, Francia y Chile (Cyclus, 2019).

4.2.3 Resultados de la implementación

En los más de 15 años de operación de los programas posconsumo en Colombia, son limitados los estudios que se han propuesto medir o examinar la operación y el impacto de los sistemas REP relacionados en la ***Tabla 4-2*** (Campbell-Johnston et al., 2020). Por su parte las entidades públicas del orden nacional no ofrecen una metodología clara para dar seguimiento a las metas propuestas en las normativas (en especial la Resolución 1326 de 2017). La ANLA manifiesta la recuperación de 2’479.647 unidades de LFU en Colombia (ANLA, 2020), sin embargo no ofrece información del funcionamiento de los sistemas de recolección selectiva de LFU y del avance en el cumplimiento de los objetivos propuestos.

Los programas posconsumo han incentivado la apertura de puntos de recogida de LFU. Se estima que en la actualidad se cuenta con más de 249 punto de recolección en el país. Otra estrategia adoptada es la recolección a domicilio de las LFU. En este sentido, 16 programas han sido acreditados para el desarrollo de sistemas de recolección selectiva de llantas usadas (ver ***Tabla 4-5***). Así mismo, en Colombia hay cerca de 22 empresas de gestión de residuos que ofrecen servicios de procesamiento y gestión de LFU (Park et al., 2018). En Colombia se estima que existen alrededor de 87 empresas dedicadas al recauchutado de los cuales 25 están afiliados a la Asociación Colombiana de Reencauchadores de Llantas y Afines (ANRE).

Tabla 4-5 Sistemas de recolección selectiva de llantas usadas en Colombia

Nombre del programa	Tipo de sistema
Corporación Posconsumo de Llantas Rueda Verde	Colectivo
Importadora de Llantas Especiales SA	Individual
Kenworth de La Montaña S.A.S	Individual
Caribe Limpio	Colectivo
Distribuidora De Rines Y Llantas - RINANDES	Colectivo
Bus Center S.A.S	Individual
Regigantes S.A.	Individual
Green World Recycling S.A.S.	Colectivo
Sistema Verde S.A.S.	Colectivo
Comercializadora Distrillantas	Individual
RJC Ecogestiones S.A.S	Colectivo
Llantas E Importaciones SAGU S.A.S.	Individual
Cooperativa Multictiva Wallancoop	Individual
Interaseo Ambiental	Colectivo
Iexport S.A.S	Individual
Comercializadora De Insumos Para El Transporte Ltda	Individual

Fuente: Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA (Información actualizada a enero de 2019)

Si bien la Resolución 1326 de 2017 ha contribuido a mejorar la disposición final de las LFU aún quedan aspectos por mejorar en relación con la eficiencia ambiental, incentivos y rol de las entidades gubernamentales. A continuación, se analiza cada uno de estos aspectos:

Eficiencia ambiental, el objetivo principal de un sistema de recolección selectiva de residuos es garantizar la gestión eficaz de un objeto al final de su vida útil con el mínimo impacto sobre el medio ambiente.

Una estrategia para cumplir con este objetivo es aumentar la vida útil del producto y/o reducir los recursos necesarios para su fabricación (Campbell-Johnston et al., 2020). Esto se logra mediante modificaciones en el diseño de producto o aplicando nuevas técnicas de producción, sin embargo, en el contexto colombiano esta estrategia es de difícil aplicación, porque el mercado es dinamizado principalmente por las importaciones, por lo cual modificaciones en el diseño no representa un gran incentivo para el productor.

El reciclaje de materiales es una de las prácticas más amigables con el medio ambiente porque permite reincorporar un "residuo" al sistema productivo. En Colombia el reciclaje de materiales derivados de las LFU está limitado a la producción de gránulo de caucho mediante procesos de trituración mecánica. El gránulo de caucho en el ámbito nacional presenta baja demanda y con frecuencia las empresas dedicadas a esta actividad productiva presentan problemas de comercialización y algunas han tenido que cerrar su operación como fue el caso del Parque Ambiental de la empresa Mundo Limpio S.A (Park et al., 2018). Por lo anterior, es crucial el desarrollo de procesos de investigación que contribuyan al desarrollo e implementación de nuevas tecnologías que diversifiquen la disposición final de las LFU y que aumenten la generación de valor para las empresas del sector. Como se presentó en la **Figura 4-1** en la UE se destina parte del presupuesto del sistema de gestión de LFU para el desarrollo de proyectos de investigación enfocados al estudio y desarrollo de productos y prácticas innovadores que minimicen la afectación sobre el medio ambiente.

Incentivos, la Resolución 1326 de 2017 impone responsabilidades operativas y financieras a los productores, importadores y comercializadores de LFU, sin embargo, los estímulos financieros que ofrece a los demás actores de la cadena son nulos. Por ejemplo, al consumidor final fueron pocas las obligaciones que le atribuyeron en la normatividad. Sin ningún estímulo económico o impositivo el nivel de conciencia o compromiso del consumidor es bajo. Es frecuente que al momento de realizar la renovación de las LFU el consumidor las conserve ante algún problema con los nuevas. La implementación de programas que incentiven al consumidor mejorará el desempeño del sistema. En países como Noruega los consumidores que contribuyen al proceso de reciclaje son recompensados económicamente (El Espectador, 2017).

Las empresas dedicadas a la recuperación de residuos en países subdesarrolladas suelen no ser rentables debido al bajo desarrollo tecnológico, pobre infraestructura, altos costos de transporte y recolección y poca cultura de reciclaje (Ottoni et al., 2020). Por lo cual, otorgar a estos actores de la cadena incentivos financieros o alivios tributarios para inversión en desarrollo tecnológico supone un espacio ideal para la generación de prácticas más amigables con el medio ambiente y económicamente rentables.

Rol de las entidades gubernamentales, para desarrollar un sistema de gestión de residuos exitoso no basta con sancionar una Resolución que establezca responsabilidades y ofrezca lineamientos. Es necesario dar seguimiento, supervisión y cumplimiento al marco jurídico establecido. La evaluación de un sistema de gestión de residuos demanda de consolidar información sobre los flujos financieros y de material entre cada uno de los actores de la cadena. Para este fin un sistema eficiente de gestión de información es imperativo para recoger, verificar, analizar, transmitir información y evaluar el cumplimiento de los indicadores establecidos por la normatividad. El sistema de gestión de información en Colombia en ineficiente, en tanto:

Se desconoce el destino final de las LFU. No se sabe con exactitud qué proporción de LFU son reciclados, utilizados para aprovechamiento energético, recauchutados o no recuperados. Sin mencionar, que se desconocen los costos asociados al funcionamiento del sistema.

Hermetismo en la información. La información general del sistema no está disponible para el público en general. Por ejemplo, no son publicadas cifras de: importación de llantas, producción nacional de llantas, llantas puestas en mercado, etc.

4.3 La gestión de llantas usadas en Ibagué

En la ciudad de Ibagué, al igual que en el ámbito nacional los estudios enfocados a la evaluación del desempeño de los sistemas de recolección selectiva son escasos. Hasta hace unos meses la ciudad no contaba con un punto de recolección de LFU, el primer punto habilitado para tal fin hace parte del programa de recolección selectiva de Rueda Verde que inició operaciones a principios del 2020 (ANLA, 2020).

Las estrategias emprendidas por la Autoridad ambiental regional (Cortolima) se limita a la realización de campañas anuales de recolección de residuos. En estas campañas las empresas y la comunidad en general son motivados a entregar los productos que han llegado al final de su vida útil para darles una correcta disposición final y mitigar la afectación sobre el medio ambiente. Para el caso de las LFU esta estrategia ha permitido recolectar las cantidades relacionadas en la ***Tabla 4-6*** cifras que son relativamente bajas si consideramos que a estas campañas se adhieren otras entidades públicas como: Gobernación del Tolima o Alcaldía de Ibagué (Cortolima, 2016, 2017, 2019a).

Tabla 4-6 Recuperación de llantas usadas en campañas realizadas por Cortolima

Año	2016	2017	2018	2019
Llantas usadas (Unidades)	201	150	200	135

Fuente: Elaboración propia con base en Cortolima, (2019)

En la actualidad dos empresas con cobertura en la ciudad de Ibagué cuentan con programas de recolección selectiva autorizados por la ANLA. Estas empresas son Interaseo S.A con su programa Interaseo Ambiental y Rueda Verde (ANLA, 2019). Interaseo S.A es una empresa privada que presta el servicio público de aseo en múltiples ciudades de Colombia entre ellas Ibagué. Si bien cuentan con licencia ambiental para la gestión de las LFU, la implementación de un sistema recolección selectivo en Ibagué para este residuo se desconoce. La problemática es crítica si se consideran las siguientes tres perspectivas:

El consumidor que dispone LFU desconoce los programas existentes para la correcta disposición final de este residuo y también desconoce la normatividad vigente y sus obligaciones como consumidor. Lo anterior, se da en gran medida por la ausencia de estrategias asertivas para la difusión y promoción de cultura ambiental.

Los entes gubernamentales que deben dar seguimiento y cumplimiento a la normatividad vigente no disponen de los recursos técnicos, humanos, informáticos y de infraestructura para cumplir a cabalidad con su función. Ejemplo de ello, es que en los años recientes Cortolima únicamente ha proferido dos medidas en contra de la inadecuada gestión de LFU. El primer caso ocurrió en el año 2015 en el Municipio de Guamo -Tolima donde se detuvo la operación de una bodega en construcción que daba disposición final ilegalmente a diferentes tipos de

residuos, en esta operación fueron encontradas 500 LFU en inadecuadas condiciones de almacenaje (Cortolima, 2015). El segundo caso se presentó en el 2019 en el Municipio de Mariquita – Tolima, donde se quemaron accidentalmente 150 LFU de camión, lo cual generó afectación sobre el aire y suelo de habitantes de zonas aledañas, la actuación de Cortolima fue la imposición de una compensación ambiental que comprendía en la reforestación de 300 árboles (Cortolima, 2019b).

Ausencia de empresas dedicadas a la transformación y aprovechamiento de este tipo de residuos. La presencia de Rueda Verde se limita a un punto de recolección de LFU. Posterior a su recolección son enviados a otras ciudades de Colombia para realizar procesos de transformación, es decir, que el potencial de este residuo para la generación de valor y potencializar la economía no es aprovechado. Por otra parte, se desconoce la disposición final dada por Interaseo a estos residuos. En el desarrollo de esta investigación se realizaron acercamientos a la institución sin respuesta alguna. La transformación de LFU en la ciudad se limitan a proyectos artesanales, que si bien contribuyen a la generación de valor son de bajo impacto, disponen pequeños volúmenes del residuo y la implementación tecnológica es baja. Durante el desarrollo de la investigación se conoció que el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) promueve la utilización artesanal de LFU.

Durante el trabajo de campo realizado en la presente investigación se evidenció que gran parte de servitecas y montallantas de la ciudad no realiza una adecuada gestión de los LFU y existe desconocimiento de la normatividad que las regula. En especial los montallantas presentan malas prácticas en el almacenaje de este residuo, en tanto, son apiladas y almacenadas a cielo abierto en contraindicación a lo establecido en la normatividad. Durante las entrevistas también se conoció que los agentes de policía han interpuesto multas a montallantas por invasión del espacio al apilar LFU. los montallantas por evadir esta reprimenda entregan sus LFU a cualquier persona que se ofrezca a hacerse cargo de ellos sin considerar la disposición final que le puedan dar al residuo. Esta práctica contraviene lo establecido en la Resolución 1326 de 2017 y no contribuye a la correcta gestión de la cadena de suministro.

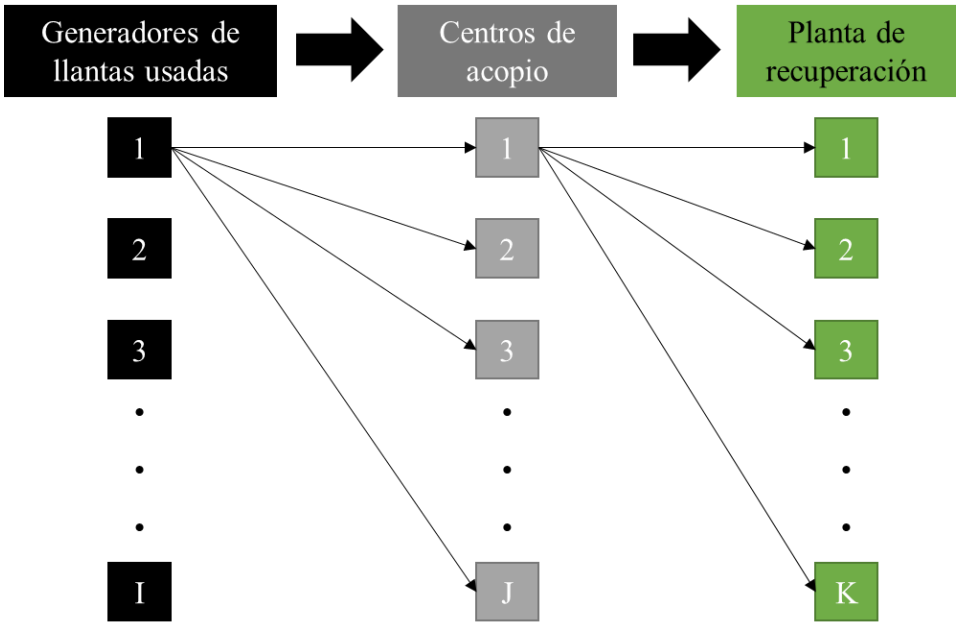
Para Ibagué no existe información oficial de fuentes gubernamentales acerca de la colocación en mercado de llantas o la generación de LFU. Uno de los primeros propósitos de esta investigación era establecer la generación teórica de LFU en la ciudad, establecer los puntos de generación de llantas usadas y otras consideraciones necesarias para el diseño de la cadena de suministro inversa para llantas usadas estas consideraciones se explicaran a fondo en apartado 5.2: Presentación del caso de estudio Ibagué (página 45).

Capítulo 5. Diseño de la cadena de suministro inversa

5.1 Estructura de la cadena de suministro inversa

La estructura comúnmente aplicada a cadenas de abastecimiento comprende los eslabones de abastecimiento (*Upstream*), producción (*Midstream*) y distribución (*Downstream*). La estructura para la cadena de recuperación propuesta presenta una disposición con similares características contemplando tres eslabones así: Aguas arriba se encuentran los generadores de llantas usadas, aguas abajo las plantas de recolección y en el eslabón central se ubican los centros acopio. Tal como se muestra en la Figura 5-1. La ubicación de los generadores de LFU y de las plantas de recuperación es conocida, mientras que la ubicación y tecnología de los centros de acopio debe ser decidida.

Figura 5-1 Cadena de abastecimiento inversa propuesta para la recuperación de LFU



Fuente: Elaboración propia

El rol de los actores presentados en la **Figura 5-1** se presenta a continuación:

Los Generadores de llantas usadas, Establecimientos encargados de la recepción de las LFU a los consumidores, algunos ejemplos son: concesionarios de automóviles, comercializadores de llantas, montallantas, talleres de reparación de vehículos o "servitecas".

Centros de acopio multipropósito. Considerando que uno de los propósitos del actual documento está enfocado a la generación de valor a partir del aprovechamiento del residuo se concibe un centro de acopio cuya función no sea únicamente ser un lugar de paso para LFU porque esto no contribuye a la generación de valor agregado. Por el contrario, se propone un centro de acopio que realice actividades de transformación.

En el centro de acopio tendrán lugar las actividades de recepción, inspección y clasificación. En la clasificación se separan las LFU susceptibles de recauchutado o en condiciones óptimas para el mercado de oportunidad de las que presentan un alto nivel de degaste. Luego a las llantas que no son

susceptibles de recauchutado se les realiza un proceso de trituración, donde se obtienen dos productos, el acero que será comercializado como sub-producto, y el gránulo de caucho. En la presente investigación se proponen dos alternativas: 1) realizar en el centro de acopio únicamente el proceso de trituración bien sea mecánica o criogénica y 2) Adicional al proceso de trituración implementar un segundo proceso en el centro de acopio para transformar el gránulo de caucho en un producto terminado (mayor detalle de los procesos de recuperación se ofrece en el apartado 5.2.4). Considerando la última alternativa el gránulo de caucho tiene dos flujos: ser vendido como materia prima para otros procesos productivos o ser utilizado para la transformación de un producto terminado al interior del centro de acopio. Considerando lo anterior, una de las decisiones a tomar en el diseño de la actual cadena de suministro está relacionada con la elección de la transformación a realizarse sobre el gránulo de caucho. El proceso aquí descrito es ilustrado en la Figura 5-2.

Figura 5-2 Propuesta de funcionamiento del centro de acopio multipropósito



Fuente: Elaboración propia

La decisión de proponer el gránulo de caucho como un subproducto y no directamente como un producto terminado se realiza con base en los siguientes fundamentos:

- Difícil comercialización de productos derivados de LFU. Se estima que en Colombia se logra comercializar tan solo el 50% de los productos derivados de LFU (El Tiempo, 2016).
- Baja demanda y precios cambiantes en el ámbito nacional (Park et al., 2018).
- Producto de baja diferenciación lo cual dificulta la generación de valor.
- El proceso productivo necesario para la producción de granulo de caucho es de fácil implementación.
- La producción de gránulo de caucho es el uso comúnmente realizado con las LFU, por lo cual su oferta es alta (ETRMA, 2018b).

Planta de recuperación, Finalmente, los diferentes subproductos obtenidos en el centro de acopio multipropósito son enviados a empresas que dispondrán de ellos como materia para sus procesos productivos. Por ejemplo, el gránulo de caucho puede ser comercializado a empresas de la industria

cementera para que sea utilizado en sus hornos como sustituto al carbón, el acero puede ser comercializado a empresas dedicadas a la fabricación de aleaciones y las LFU susceptible de recauchutado especialmente las utilizadas en vehículos de gran tamaño tienen un mercado establecido y fuerte en el ámbito nacional (ANRE, 2020).

5.2 Presentación del caso de estudio Ibagué

5.2.1 Generación teórica de llantas usadas en Ibagué

Ante la ausencia de información oficial que indique la generación de LFU en Ibagué se calculó la generación a partir del parque automotor de la ciudad (ver ***Tabla 5-1***). Se evidencia que entre los años 2010 y 2017 el parque automotor tuvo un incremento significativo (se duplicó), siendo las motocicletas las de mayor participación sobre el total (representan el 57% del parque automotor). Los automóviles representan algo más del 26%, mientras que las busetas presentaron un aumento significativo en el año 2017 en gran medida por la reposición del parque automotor realizada por las empresas de transporte público en la ciudad para cumplir con la normatividad ambiental vigente y por la entrada de nuevas asociaciones (El Nuevo Día, 2018).

Tabla 5-1 Parque automotor de la ciudad de Ibagué entre los años 2010 y 2017

Tipo de vehículo	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Automóviles	26.670	29.938	32.660	35.634	38.964	42.277	44.637	50.601
Buses	617	631	638	643	671	716	730	847
Busetas	1.384	1.386	1.389	1.393	1.395	1.396	1.396	1.751
Camiones	1.770	1.971	2.157	2.278	2.422	2.565	2.638	3.017
Camionetas	5.614	6.457	7.428	8.858	10.538	12.193	13.381	15.800
Camperos	4.296	4.569	4.860	5.132	5.453	5.743	5.954	6.509
Cuatrimotos	51	65	79	103	108	114	114	123
Microbuses	765	806	848	889	1.079	1.093	1.097	1.098
Motocarros	73	97	97	216	310	385	415	466
Motocicletas	50.236	56.617	62.938	73.575	82.590	93.036	100.649	108.525
Tractocamiones	290	323	341	343	343	345	345	419
Volquetas	153	180	196	216	243	259	266	298
Total	91.919	103.040	113.631	129.280	143.952	159.957	171.457	189.454

Fuente: Centro de Información Municipal para la Planeación Participativa (CIMPP), 2018

Los datos consolidados en la ***Tabla 5-1*** para cada tipo de vehículo fueron considerados como series de tiempo para proyectar el tamaño automotor de la ciudad para los siguientes 10 años. Al analizar el comportamiento de los datos se denota que en su mayoría las categorías presentan un componente fuerte de tendencia. Para estos casos se evaluaron los métodos de pronóstico: Suavización Exponencial Doble con ajuste a tendencia (SED), Promedio Móvil Doble (PMD), y Regresión Lineal (RL). Para evaluar el desempeño de los métodos de predicción se utilizaron los errores de pronóstico: Desviación Media Absoluta (DAM), Error Medio Cuadrado (EMC) y Porcentaje de Error Medio Absoluto (PEMA). En general, el método de pronóstico que presentó mejor ajuste y menores errores fue la Regresión Lineal.

La categoría Automóviles se dividió en dos subcategorías: Automóviles del servicio público (taxis) y Automóviles común. Para que un vehículo pueda prestar el servicio público en la ciudad de Ibagué requiere de un permiso otorgado por la administración municipal, comúnmente conocido como "cupo". Desde el año 2017 la autoridad municipal no ha expedido nuevos "cupos" para la prestación

de este servicio. Un nuevo taxi únicamente puede ser registrado por reposición de otro que presente antigüedad superior a 5 años. Por lo anterior, el número de Automóviles del servicio público (taxis) se establece en 3.065 taxis para los próximos años (El Nuevo Día, 2017). Por otra parte, la proyección del número de Automóviles común se realizó mediante Regresión Lineal, presentando un coeficiente de determinación (R^2) de 0,99. La proyección del parque automotor para los siguientes 5 años se resume en la Tabla 5-2. La información completa acerca del parque automotor de la ciudad y sus proyecciones se presenta en el Anexo 2.

Tabla 5-2 Proyección del Parque automotor de la ciudad de Ibagué

Tipo de vehículo	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Automóviles servicio público	3.065	3.065	3.065	3.065	3.065	3.065
Automóviles Común	55.747	59.000	62.252	65.504	68.757	72.009
Buses	870	898	926	954	983	1.011
Busetas	1.641	1.672	1.704	1.735	1.766	1.798
Camiones	3.392	3.552	3.711	3.871	4.031	4.191
Camionetas	19.467	20.918	22.369	23.820	25.271	26.723
Camperos	7.279	7.581	7.883	8.185	8.488	8.790
Cuatrimotos	161	171	182	192	202	212
Microbuses	1.324	1.380	1.436	1.492	1.548	1.604
Motocarros	667	730	794	857	920	983
Motocicletas	134.815	143.475	152.136	160.796	169.457	178.118
Tractocamiones	423	435	447	460	472	484
Volquetas	355	375	394	414	434	454
Total	229.206	243.252	257.299	271.345	285.394	299.442

Fuente: Elaboración propia a partir de (Basto Murillo & Pérez Gutiérrez, 2019)

Para calcular la cantidad generada de LFU en la ciudad de Ibagué era necesario establecer la frecuencia de reposición para cada uno de los tipos de vehículo. Con el apoyo de estudiantes de pregrado que desarrollaban su trabajo de grado se diseñó, evaluó y ejecutó un instrumento de recolección de información para este fin (ver Anexo 3). Se realizó un muestreo no probabilístico por conveniencia porque realizar un muestreo probabilístico requería aplicar 8.592 encuestas, una cantidad muy elevada que excede el alcance del actual proyecto. Durante la ejecución de la encuesta piloto los encuestados manifestaban que la frecuencia de cambio variaba entre las llantas delanteras y las traseras, con esto en mente se ajustó el instrumento de recolección de información para que respondiera a la realidad observada. Basto Murillo & Pérez Gutiérrez, (2019) aplicaron alrededor de 200 entrevistas durante un mes a propietarios de vehículos en la ciudad de Ibagué. Los estudiantes se ubicaron en zonas estratégicas de la ciudad, es especial en zonas cercanas a servicios técnicos para vehículos. La selección de los encuestados fue por conveniencia dadas las dificultadas previamente expuestas de realizar procesos de muestreo probabilísticos.

Para cada una de las categorías se calculó la tasa de reposición (ver Ec. 5-1), esta medida indica la cantidad de llantas que consume un vehículo automotor al año. A y B indican el periodo de cambio de las llantas traseras y delanteras respectivamente y está expresado en meses, mientras que los términos C y D hacen referencia al número de llantas traseras y delanteras que posee el vehículo.

$$Tasa\ de\ reposición = \frac{12\ C}{A} + \frac{12D}{B} \qquad \text{Ec. 5-1}$$

Los tractocamiones son los vehículos que mayor tasa de reposición presentan con 11,23 llantas/año, esto se debe a que utilizan mayor número de llantas simultáneamente. Los automóviles de servicio públicos (taxis) presentan la segunda mayor tasa de reposición con un consumo promedio de 7,47 llantas al año (ver Tabla 5-3).

Tabla 5-3 Tasa de reposición por tipo de vehículo en Ibagué

Tipo de vehículo	Tasa de reposición	Tipo de vehículo	Tasa de reposición	Tipo de vehículo	Tasa de reposición
Automóviles de servicio público	7,47	Camiones	5,83	Motocarros	2,80
Automóviles de uso común	2,12	Camionetas	1,96	Motocicletas	1,26
Buses	4,51	Camperos	4,51	Tractocamiones	11,23
Busetas	4,11	Microbuses	3,71	Volquetas	9,85

Fuente: Elaboración propia a partir de (Basto Murillo & Pérez Gutiérrez, 2019)

Multiplicando la tasa de reposición por el tamaño del parque automotor de cada categoría se obtiene la generación de LFU de cada segmento, bajo esta estimación se calcula que para el año 2020 motocicletas generaran 170.293 LFU, los automóviles de uso común 118.355 y los automóviles de servicio público 22.885. Finalmente se suma la generación de LFU de cada categoría para estimar la generación total de LFU en la ciudad de Ibagué (ver Tabla 5-4). Todos los cálculos realizados y los resultados detallados se presentan en el Anexo 2.

Tabla 5-4 Estimación y proyección de llantas usadas generadas en Ibagué

Año	Tamaño del parque automotor	Generación de llantas usadas
2020	229.206	428.018
2021	243.252	451.972
2022	257.299	475.917
2023	271.345	499.879
2024	285.394	523.845
2025	299.442	547.805

Fuente: Elaboración propia a partir de (Basto Murillo & Pérez Gutiérrez, 2019)

5.2.2 Generadores de llantas usadas y cantidades

Para identificar los puntos de generación de LFU en la ciudad por medio de la Cámara de Comercio de Ibagué se solicitó información de las empresas que comercializan llantas, ofrecen servicios técnicos a vehículos o realizan reposición de llantas. El reporte de dicha entidad indicó que en la ciudad de Ibagué se encontraban registradas 525 empresas entre personas naturales y jurídicas que desarrollan actividades económicas bajo el código de Clasificación de Actividades Económicas (CIIU) 4520. A partir de este reporte se identificó que algunas empresas del reporte han dejado de operar en la ciudad o el desarrollo de su actividad económica no involucra el manejo de LFU (Sanmiguel León & Anacona Muñoz, 2019).

Luego de la depuración de la base de datos, estudiantes de pregrado en el desarrollo de su trabajo de grado realizaron visitas a establecimiento de venta de llantas por reposición. Durante las visitas se desarrollaron entrevistas a administradores o dueños para conocer el manejo que se le da a las LFU y más concretamente establecer el número de llantas que logra recolectar cada uno de los establecimientos (Basto Murillo & Pérez Gutiérrez, 2019). Una de las limitaciones durante este proceso de recolección de información es el hermetismo y confidencialidad de algunas de las

empresas del sector, que en muchos casos se mostraron reacios a participar en la presente investigación principalmente por dos motivos: privacidad de la información y no cumplimiento de normatividad vigente en relación con la gestión de LFU.

Luego de realizar el trabajo de campo se logró caracterizar 21 establecimientos de comercio o de servicio técnico (servitecas o montallantas) que generan LFU en la ciudad de Ibagué. Los tres establecimientos de mayor generación de LFU son grandes superficies (Makro, Homecenter y Metro) con una colocación promedio de 14.400 unidades en el año 2018. Otros actores importantes en la colocación son las servitecas, por ejemplo, Energiteca MAC y Centro de lubricación Integral Shell generan 12.000 y 9.600 unidades de LFU respectivamente. Actores como montallantas disponen individualmente de un pequeño número de LFU, sin embargo, si son considerados de manera agregada colocan un importante número de LFU y este actor es el que presenta las prácticas más deficientes en la gestión del residuo. Todos los generadores considerados en el presente estudio recolectaron en el año 2018 alrededor de 85.272 LFU. En la Tabla 5-5 se presenta la dirección y generación (en unidades) de los establecimientos que participaron en el presente estudio.

Tabla 5-5 Generadores de llantas usadas Ibagué

Nombre del Establecimiento	Dirección	Unidades/año
Makro	Calle 83 #4-72 sur	14.400
Homecenter	Cra 5a #48a100	14.400
Metro - Multicentro	Cra. 5 N° 60-123	13.200
Energiteca – MAC	Cra. 5 #23-45	12.000
Centro de Lubricación Integral Shell	Cra. 5 #77-145 a 77-15	9.600
Bodegas de Gradinsa	Cra. 16 sur N° 67	8.400
Michelin Sede 1	Avenida 5 calle 27 #1	2.760
Michelin Sede 2	Avenida 5 calle 27 #2	2.400
Serviteca Los Pinos	Avenida Ambala No. 30A-81, Viveros	1.500
Serviteca Multicentro Su Campo Su Llanta	Cra. 5 N° 60-123	1.440
Parqueadero La 100	Cra 5ta calle 100	960
Serviteca la Estación	Cl. 60 #12-224	672
Nuevo Milenio Lubricentro Alvarado	Cra 8 #134-284	552
Monta llantas 128	Cra 8va Calle 128	480
Auto Centro del Tolima	Cra 5ta calle 89	408
Inverlima	Cra. 5 #83 frente a Homecenter	408
Centro de Servicio la 77	Cra. 5 #77-10	360
Servicio Al Instante	Avenida Ambala No. 32 Viveros	336
Monta llantas El Rey	Cra 5a # 83-100	300
Monta llantas 139	Cra 8va calle 139A-26	240
Monta llantas Chaleco	Cra 5 calle 89	240
Serviteca Ambala 24/h	Avenida Ambala No. 30, San Simón bajo	216
Total		**85.272**

Fuente: (Basto Murillo & Pérez Gutiérrez, 2019)

La recolección de LFU de los establecimientos relacionados en la Tabla 5-5 representa algo más del 22% de la generación teórica de LFU para el año 2018, una cifra baja si consideramos que la meta establecida por la Resolución 1326 para ese año era la recolección de al menos el 50% de las LFU. Algunos factores que explican la diferencia son:

> No fue caracterizada toda la población de generadores de LFU en la ciudad. Debido a limitaciones de diferente índole: prácticas, informalidad en el sector, predisposición de los actores o fuentes de información que contribuyeran a la identificación.

La normatividad relacionada con la gestión de LFU es relativamente reciente y desconocida por muchos de los actores que intervienen en la cadena de recuperación.

Supervisión y control insuficiente por parte de las entidades gubernamentales.

Ausencia de un sistema de recolección de LFU en la ciudad

Ausencia de programas de promoción y difusión que concienticen a la población acerca de la gestión de LFU.

Para proyectar la cantidad de LFU recuperadas en Ibagué se considera que el aumento del parque automotor de la ciudad en los años recientes redundará en una mayor generación de LFU. Por otra parte, la tasa de recolección se espera que aumente progresivamente año a año, considerando la normativa vigente que establece metas de recolección que crecen cada año a razón de 5% hasta alcanzar una tasa de recolección del 80%. La proyección de esta y las demás medidas a considerar se proyectarán hasta el año 2028, año hasta el cual se profieren las metas propuestas en la resolución 1326 de 2017.

5.2.3 Alternativas de ubicación para un centro de acopio multipropósito

Un trabajo de grado vinculado a la presente investigación identificó cuatro zonas potenciales para la ubicación de un centro de acopio para LFU (ver Figura 5-3). En dicho estudio se tomó en consideración el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) para la ciudad de Ibagué en el cual se ofrecen lineamientos y disposiciones en cuanto al uso del suelo, clasificación del territorio, establece zonas de riesgos y es el instrumento que rige el desarrollo territorial de la ciudad. El uso del suelo en la ciudad de Ibagué es clasificado según su uso como: Zona residencial, Zona de comercio y servicios, Zona institucional, Zona industrial, Zona centro y centralidades y Zona de protección de acuerdo con el Artículo 254 del Decreto 0823 de 2014. Otros criterios considerados fueron: vías de acceso, disponibilidad de servicios públicos, valor del m^2 y topografía del terreno.

Figura 5-3 Alternativas de ubicación para el centro de acopio multipropósito



Fuente: Elaboración propia con base en (Giraldo & Gutiérrez, 2018)

5.2.4 Alternativas tecnológicas a implementar en el centro de acopio multipropósito

Para identificar y caracterizar los procesos productivos susceptibles de implementar en el centro de acopio multipropósito se realizó una revisión bibliográfica en múltiples fuentes de información: bases de datos especializadas como *Science Direct*, *Scopus*, *Web of Science* (WoS), *SCIELO* y repositorios institucionales mediante el motor de búsqueda *Google Scholar*. Las revistas especializadas contribuyeron a contextualizar las prácticas de recuperación con mayor desarrollo desde el campo de la investigación. Sin embargo, la implementación de estas propuestas en el contexto del caso de estudio es adversa debido al alto requerimiento tecnológico. Adicionalmente, los artículos encontrados en las bases de datos especializadas corresponden en su mayoría a alternativas de producción que aún están en fase experimental.

Por otra parte, en los repositorios instituciones se encontró un alto número de investigaciones de pregrado, especialización y maestría que desarrollaron estudios de factibilidad para la fabricación de productos a partir de residuos de LFU. Con base en estos hallazgos se consideraron las disposiciones para las LFU, algunas de ellas ofrecen un producto terminado y otras un producto intermedio que puede ser un insumo o materia prima para otro proceso productivo. A continuación, se ofrece una breve descripción de los procesos considerados como alternativas de implementación en el centro de acopio multipropósito.

Trituración mecánica, consiste en la reducción del tamaño de la LFU por medio de la fricción metálica. Este proceso puede variar dependiendo del tamaño de la partícula de caucho que se desea obtener. Cuando el tamaño de la partícula es superior a 50mm se considera triturado, cuando su tamaño esta entre los 1 y 10mm es granulado de caucho (GRC) y cuando su tamaño es inferior a 1mm se considera polvo de caucho. Por otra parte, cuando su tamaño oscila entre los 10 y 50mm suele llamarse viruta de caucho.

Trituración criogénica, consiste llevar la LFU a bajas temperaturas (aproximadamente -80 °C) por medio de un agente congelante (el más común es nitrógeno) para luego triturar las LFU por fricción hasta hacerlas granulo de caucho o polvo de caucho según sea la necesidad (Gracia, 2018).

Producción de diésel sintético, se obtiene por medio de una técnica de tratamiento termoquímico de LFU conocido como pirólisis. Este proceso consiste en el fraccionamiento de sustancias orgánicas en ausencia de oxígeno, sometiéndolas a altas temperaturas, por lo tanto, no existe combustión directa ni oxidación. Las proporciones relativas de los elementos producidos y su calidad dependen principalmente de la temperatura y del tiempo que se aplique la pirólisis, además de la composición de los insumos usados (Briseño et al., 2018).

Fabricación de pisos, resina de poliuretano, pigmentos y GRC son mezclados a altas temperaturas hasta lograr una mezcla homogénea, este proceso tarda entre 4 y 6 minutos. Seguidamente, la mezcla es dispuesta en moldes siendo sometidas a prensado durante cerca de 20 minutos a temperatura ambiente. Este proceso da como resultados pisos de alta resistencia. Estudios han demostrado que este tipo de pisos presenta mayor vida útil que sus homólogos en cerámica (Calderón, 2018).

Fabricación de tapetes, el GRC es coprocesado con fibras sintéticas, yute, hilo industrial, junto a otros insumos para la fabricación de tapetes decorativos para el hogar (Sanmiguel León & Anacona Muñoz, 2019).

Considerando las aplicaciones previamente expuestas se proponen las siguientes alternativas tecnológicas para implementar en el centro de acopio multipropósito.

Tabla 5-6 Alternativas tecnológicas a implementar en el centro de acopio multipropósito

Alternativa	Tecnología
T1	Trituración mecánica
T2	Trituración criogénica
T3	Trituración mecánica y producción de diésel sintético
T4	Trituración criogénica y producción de diésel sintético
T5	Trituración mecánica y fabricación de pisos
T6	Trituración criogénica y fabricación de pisos
T7	Trituración mecánica y fabricación de tapetes
T8	Trituración criogénica y fabricación de tapetes

Fuente: Elaboración propia

La inversión requerida para la puesta en marcha de cada una de las alternativas definidas en la Tabla 5-6 se obtuvo a partir de la revisión de literatura antes mencionada. Así mismo se obtuvo información relacionada con: costos fijos de operación, costos variables de producción, capacidad instalada del proceso productivo, precios de venta e impactos estimados sobre el medio ambiente. Un componente que no logró ser identificado en la literatura fue el impacto social de cada una de estas alternativas. Para evaluar este impacto se realizó una consulta a expertos. Este aspecto es detallado más adelante en el apartado 5.2.6.

5.2.5 Ubicación de plantas de recuperación para subproductos de la cadena

Actualmente en Ibagué no se realiza transformación alguna sobre las LFU. La única actividad que mínimamente se realiza con los LFU es la recolección del residuo. Considerando los productos y subproductos que se generaran a partir del diseño ilustrado en la Figura 5-2 se identificaron clientes potenciales en el ámbito nacional. Para este fin fue de ayuda la caracterización de actores detallada en el apartado 4.2 del presente documento.

Para la disposición del gránulo de caucho se considera como principal destino el proceso de recuperación energética. A las periferias de la ciudad de Ibagué se ubica una de las plantas de producción de cemento más grande del país. Se estima que en esta planta se produce 1 de cada 4 toneladas del cemento consumido en todo el país (El Universal, 2019). La empresa Cemex en los últimos años ha estado incursionando en el uso de combustibles alternativos para suplir los grandes requerimientos energéticos de sus hornos. Actualmente en la planta de Carocolito (periferia de Ibagué) se utiliza la cascara de arroz como sustituto al carbón. En otras de sus plantas de producción ya han tenido sus primeras experiencias en la utilización de LFU como combustible alterno al carbón. Esto les permitió sustituir el carbón en un 35% (Cemex, 2019). Argos desde el año 2015 utiliza triturado de caucho en su proceso productivo y tiene capacidad para disponer en promedio 65.000 toneladas de LFU al año (Argos, 2020).

Quemar un kg de gránulo de caucho genera 32 MJ (Megajulios) de energía. El requerimiento energético promedio para la producción de una tonelada de cemento es de 5 MkJ (millones de kilojulios), se estima que producir 1 tonelada de cemento requiere aproximadamente de 0.2 tonelada

granulado de caucho (Dehghanian & Mansour, 2009). Estudios han mostrado buenos rendimiento cuando la sustitución de granulado de caucho sustituye en un 20% al carbón. Con porcentajes más altos el rendimiento del sistema presenta disminución en calidad y aprovechamiento del poder calorífico (Thomas & Gupta, 2016). Con base en las anteriores consideraciones se puede calcular el requerimiento máximo de gránulo de caucho demandado por la planta de cemento el Caracolito.

La Asociación Colombiana de Reencauchadores de Llantas y Afines (ANRE) ha identificado la ubicación geográfica de todas las empresas dedicadas al recauchutado de llantas en Colombia. La mayor concentración se presenta en Bogotá con 11 empresas, seguido de Antioquia con 6. Por lo anterior y por disponibilidad de la información, se asumen estos dos departamentos como posibles destinos para el proceso de recauchutado para este tipo de subproducto generado por el centro de acopio. Así mismo y como se presentó en el apartado 4.2.2 las empresas dedicadas a la transformación del gránulo de caucho para diversos usos (fabricación de pisos, productos artesanales, pavimentación de vías con asfalto modificado, entre otras) en su mayoría están ubicadas en los departamentos de Antioquía y Cundinamarca.

Figura 5-4 Destinos para los subproductos de llantas usadas



Fuente: Elaboración propia

5.2.6 Criterios para evaluar el desempeño de la cadena de suministro

El enfoque moderno para la evaluación de cadenas de suministro sugiere la valoración de diversos criterios, dejando de basar el diseño y las diversas decisiones del modelo a factores exclusivamente económicos (costos, ingresos, utilidad o indicadores financieros) y considerar también el impacto sobre el medio ambiente y las implicaciones sociales que puede presentar. La evaluación de la cadena de suministro inversa de LFU se realizará con base en las siguientes medidas:

5.2.6.1 Desempeño económico

La evaluación económica para la cadena de suministro inversa pretende maximizar el Valor Presente Neto (VPN). El VPN consiste en evaluar la diferencia entre ingresos y egresos generados en diferentes periodos de tiempo. Uno de los beneficios de la aplicación del VPN es que se incorpora el concepto del valor del dinero en el tiempo en la modelación de la cadena de suministro. En la *Ec. 5-2* se presenta el método para el cálculo del VPN. Allí A se refiere al horizonte de planeación, Utilidad se refiere a la utilidad generada por la cadena de suministro inversa en cada año, mientras que i supone la tasa de interés o tasa interna de oportunidad y es la que indica la valoración o depreciación del dinero en el tiempo. Adicionalmente, se consideró únicamente los ingresos generados por el centro de acopio.

$$VPN = \sum_{a=0}^{A} \frac{Utilidad_a}{(1+i)^a} \qquad \text{Ec. 5-2}$$

Para el cálculo de la utilidad de cada uno de los años el único ingreso será por ventas de los diferentes productos y sub-productos generados en el centro de acopio. Mientras que se consideran los costos asociados a: transporte, costos fijos de operación (aquí se incluyen costos de: arrendamiento, servicios públicos y nomina no vinculados a producción), costos variables de producción y costos por mantener inventario. Para el caso del año inicial se contempla el costo de apertura del centro de acopio.

5.2.6.2 Desempeño ambiental

Para evaluar el impacto ambiental en cada uno de los eslabones y procesos de la cadena de suministro inversa se utilizará el eco-indicador 99. Este indicador mide tres tipos de daños: A la salud humana, A la calidad del medio ambiente y A los recursos por medio del análisis del ciclo de vida del producto. En los últimos años ha aumentado la implementación de este indicador para realizar la evaluación ambiental en cadenas de suministro (Dehghanian & Mansour, 2009; Subulan et al., 2015). La unidad de medida de este indicador está dada por "punto Eco-indicador" que representa una centésima parte de la carga ambiental anual de un ciudadano europeo promedio. Algunos autores debaten el grado de abstracción y síntesis que presenta el eco-indicador 99 para evaluar el componente ambiental de una cadena de suministro (Singh et al., 2018). A pesar de lo anterior, son diversas las ventajas que presenta la aplicación del eco-indicador 99:

- La construcción de este indicador requiere evaluar todo el ciclo de vida del producto.
- Su cálculo toma considera múltiples impactos medioambientales (Afectación a la salud humana, calidad del medio ambiente y a los recursos naturales)
- Puntuación ambiental única, lo cual facilita la modelación matemática del componente ambiental.
- Permite comparar fácilmente el impacto ambiental de diferentes procesos o cadenas de suministro.
- De acuerdo con lo que se presentó en el estado del arte la aplicación de este indicador ha venido en aumento en el diseño de cadenas de suministro sostenibles.

5.2.6.3 Desempeño social

La aplicación de indicadores y métodos cuantitativos para evaluar el impacto social resulta complejo en la mayoría de los casos, debido a su naturaleza subjetiva y cualitativa (Mota et al., 2013). Estudios

han demostrado un déficit en la evaluación del pilar social en la gestión y diseño de cadenas de suministro sostenibles (Stindt, 2017). La evaluación social con frecuencia presenta diferencias significativas dependiendo del caso de estudio. En la actualidad no se ha llegado a un consenso en cuanto a los factores que componen el pilar social y mucho menos en la importancia de cada uno de esos factores. Por lo anterior, comúnmente se opta por la aplicación del método Analytic Hierarchy Process (AHP) para obtener los pesos de cada criterio que compone el pilar social. Este método demanda del juicio de expertos (Messmann et al., 2020).

Para la evaluación del desempeño social de cadena de suministro inversa de LFU se utilizó el método AHP proponiendo la estructura ilustrada en la Figura 5-5. La aplicación del método se realiza para calcular la importancia de cada uno de los objetivos del problema formulado (económico, ambiental y social). Los desempeños económicos y ambientales no se conectan con las alternativas porque estas relaciones son conocidas y no se considerarán durante la consulta a expertos. Caso contrario ocurre con el componente social, con el cual se espera consolidar un indicador agregado evaluando la generación de empleo, riesgos laborales y el desarrollo social para cada una de las alternativas de tecnología y ubicación. Este indicador social agregado se implementará en la función objetivo del modelo matemático propuesto en el apartado 5.3. Este indicador es adimensional, en tanto, se normaliza cada uno de los sub-criterios mediante la aplicación del método AHP.

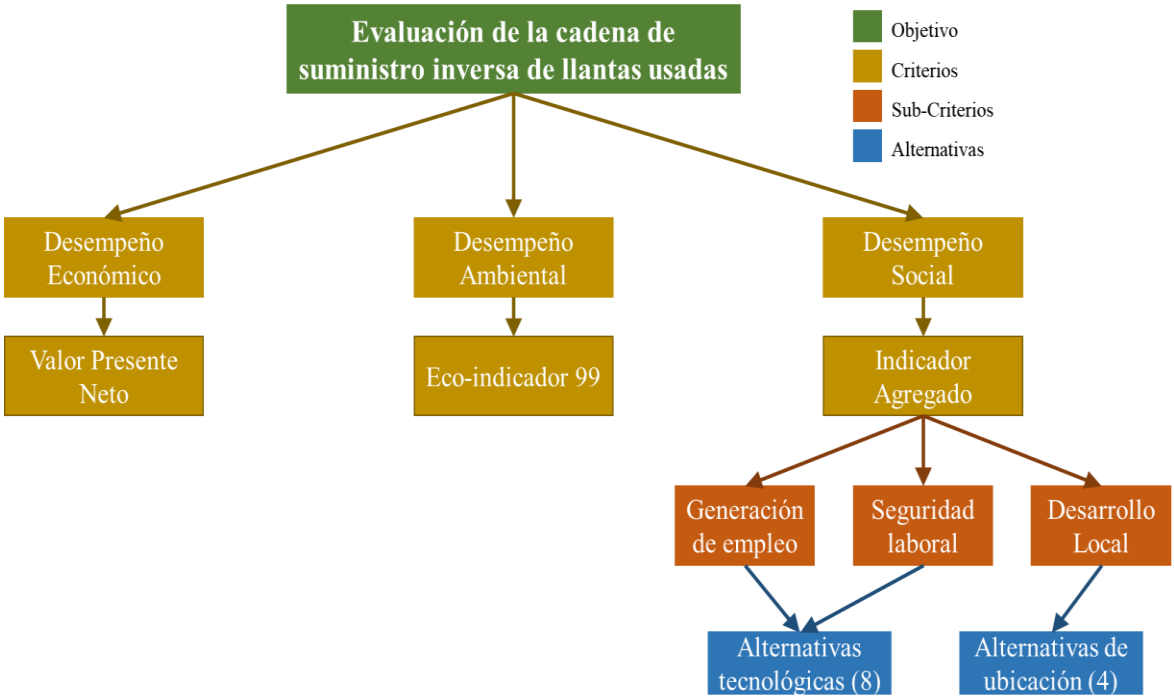
La elección de solo tres subcriterios para conformar el componente social se justifica en la revisión de literatura. Messmann et al., (2020) realizaron una revisión sistemática de literatura para dar luces acerca de la evaluación social en cadenas de suministro inversa. Este estudio encontró que precisamente los factores mayormente incorporados en el pilar social son la generación de empleo, seguridad laboral y desarrollo económico aplicados en el 69, 25 y 31% respectivamente. Otros componentes menormente utilizados son: la satisfacción del cliente (10%), seguridad del cliente (8%) o calidad del empleo (7%). Los subcriterios utilizados se definen así:

Generación de empleo, se refiere al número de empleos que es generado por la apertura de un centro de acopio multipropósito considerando la implementación tecnológica del mismo. Este componente contempla exclusivamente el número de empleos directos, la cantidad de empleos indirectos no son considerados debido a su difícil cuantificación.

Seguridad laboral, se refiere a la exposición de los colaboradores a ambientes peligrosos que pueden presentar repercusiones inmediatas o a largo plazo sobre su salud. Algunos ejemplos son exposición a elementos químicos o accidentes laborales. Entre mayor calificación se obtenga en este ítem, menor exposición para los colaboradores.

Desarrollo Local, la apertura de un centro de acopio multipropósito causa un impacto en las dinámicas sociales y económicas de una comunidad, este impacto no siempre es considerado como positivo. Por lo general, zonas de menor desarrollo son priorizadas.

Figura 5-5 Evaluación de la cadena de suministro inversa de llantas usadas



Fuente: Elaboración propia

En el proceso de implementación del AHP es indispensable elegir adecuadamente los expertos a consultar. Para desempeñar el rol de expertos se ponderó el conocimiento de la problemática (gestión de residuos en especial de LFU), conocimiento de las dinámicas sociales, económicas y ambientales de las diferentes zonas de la ciudad, en tanto, una de las decisiones estratégicas será la de ubicación y conocimiento relacionado con la gestión de cadenas de suministro. Una limitación para la elección de los expertos fue la disponibilidad de tiempo de algunos de los candidatos iniciales. Considerando lo anterior se consolidó el siguiente grupo de expertos:

Tabla 5-7 Perfil de los expertos consultados

N°	Cargo	Formación académica	Experiencia
1	Director de la gestora urbana Ibagué	Maestría en desarrollo regional y planificación del territorio	4 años desarrollando labores de planeación territorial en el departamento del Tolima
2	Directora de asuntos ambientales del Tolima	Especialista en gerencia de proyectos	3 años en la gestión ambiental y de residuos en el departamento del Tolima
3	Directora de participación ciudadana del Tolima	Especialista en administración pública contemporánea	Más de 8 años en el desarrollo de proyectos con vocación social en la ciudad de Ibagué
4	Secretario de ambiente y gestión del riesgo Ibagué	Maestría en derecho internacional	Más de 5 años de experiencia en política pública ambiental.

Fuente: Elaboración propia

La consulta a expertos fue realizada mediante sesiones de videoconferencia y vía telefónica que tomó entre 30 y 50 minutos dependiendo del conocimiento de la metodología AHP por parte del experto.

Se descartó la utilización de formularios virtuales como los de Google porque era vital contextualizar al experto en cuanto al objetivo de la presente investigación y explicar la metodología AHP. De esta manera las respuestas serían más fiables y no habría lugar a errores provenientes del desconocimiento del método. La escala de juicio utilizada fue la propuesta por Saaty, (1990) (ver Tabla 5-8). Sobre las respuestas obtenidas se calculó la razón de consistencia (CR). En los casos que esta medida fue superior a 10% se descartaron las respuestas, se explicó nuevamente las escalas y se aplicó nuevamente el instrumento. En caso de que la razón de consistencia en el segundo intento persistiera superior al 10% se sugiere descartar los juicios del experto del análisis. Debido a que sus respuestas son más inconsistentes que si se respondiera el instrumento aleatoriamente.

Tabla 5-8 Escala utilizada para la comparación de pares en el método AHP

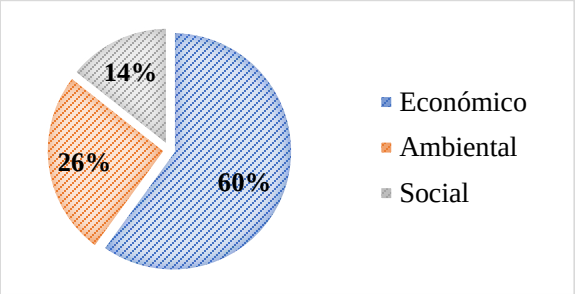
Escala numérica	Escala verbal	Descripción
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio.
3	El elemento es moderadamente más importante respecto al otro.	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro.
5	El elemento es fuertemente más importante respecto al otro.	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro.
7	La importancia del elemento es muy fuerte respecto al otro.	Un elemento domina fuertemente
9	La importancia del elemento es extrema respecto al otro.	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible.
2-4-6-8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes.	

Fuente: Elaboración propia a partir de Saaty, (1990)

Inicialmente la técnica AHP no fue diseñada para la valoración de múltiples actores. Lo anterior, hace necesario consolidar una matriz de valoraciones consensuadas. Cuando se trabaja con expertos con enfoques o campos de estudio diferentes es de alta dificultad llegar a un consenso en las calificaciones, por lo cual, se procede a sintetizar los juicios en uno solo mediante la computación de cada uno de ellos. Los juicios no deben ser sintetizados promediando las medias aritméticas de cada uno de los expertos, porque esto rompería la reciprocidad de la matriz. Por ejemplo, las calificaciones de dos expertos fueron 4 y 6, en caso de aplicar media aritmética la calificación sintetizada sería 5, se esperaría que su reciproco sea 1/5. Sin embargo, al realizar la operación del otro lado de la matriz el promedio de 1/4 y 1/6 es 5/24, lo cual difiere del reciproco esperado (1/5). Con esta consideración se propone la utilización de la media geométrica para sintetizar los juicios de los expertos porque permite mantener el principio de reciprocidad dentro de la matriz.

Al realizar la comparación entre criterios (económico, ambiental y social) todos los expertos concordaron que el factor de mayor importancia es el componente económico. Durante las consultas todos manifestaron que un proyecto que no garantiza su sostenibilidad económica está destinado a fracasar. Esta consideración se incluirá más adelante como una restricción del modelo matemático. Luego de construir la matriz de juicios sintetizados, se procede al cálculo de los pesos de cada uno de los criterios, se establece que la jerarquía de los criterios en orden descendente de importancia es económico, ambiental y social (ver Figura 5-6). La matriz de juicios sintetizados presenta un CR de 1,71%.

Figura 5-6 Pesos de las medidas de desempeño según los expertos

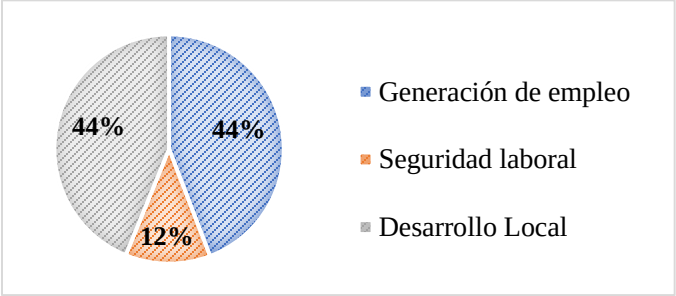


Fuente: Elaboración propia

En relación con los subcriterios que componen el pilar social, inicialmente se planteó la hipótesis que cada uno de ellos dependía de la implementación tecnológica y de la ubicación. Sin embargo, en las comunicaciones con los expertos se encontró que no era el caso. Por ejemplo, el subcriterio generación de empleo únicamente varía en función de la implementación tecnológica, mientras que la ubicación del centro de acopio no tiene influencia. De la misma manera se evidenció que la seguridad laboral estaba influenciada por la implementación tecnológica. Mientas que el subcriterio desarrollo local únicamente se veía influenciado por la ubicación, mientras que el impacto de la implementación tecnológica era mínimo.

Los expertos concordaron de manera unánime que el subcriterio denominado seguridad laboral es el de menor importancia. En todos los casos su ponderación fue inferior al 13%. Los juicios estuvieron divididos en relación con los subcriterios generación de empleo y desarrollo local. Finalmente, la matriz de juicios sintetizada tuvo un CR de 2,87%, la importancia de los criterios generación de empleo y desarrollo local presentan pesos iguales (44%), mientras que el peso de seguridad laboral es pequeño en comparación con los demás componentes del indicador (12%).

Figura 5-7 Pesos de subcriterios del pilar social según los expertos



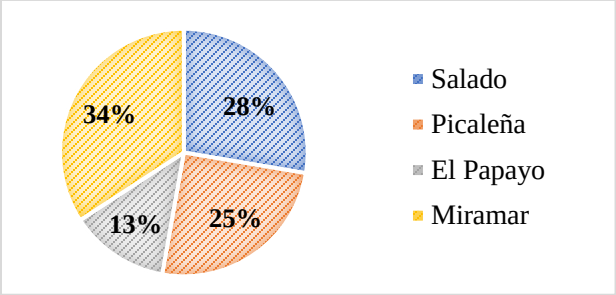
Fuente: Elaboración propia

El subcriterio generación de empleo de cada una de las alternativas tecnológicas no fue puesto en consideración de los expertos, en tanto, la variable fue cuantificada como número de empleos nuevos generados y esta estadística es conocida para cada una de las alternativas tecnológica, mientras que la decisión de ubicación no tiene injerencia alguna sobre el subcriterio generación de empleo.

El subcriterio desarrollo local fue evaluado entre cada una de las alternativas de ubicación. En este sentido, los juicios de los expertos fueron heterogéneos y no se presentó una marcada predilección por una de las ubicaciones. A pesar de lo anterior, la matriz de juicios sintetizadas tuvo una CR de

1,46%. La ubicación que obtuvo mayor ponderación en este subcriterio fue Miramar. En este sentido las opiniones de los expertos concuerdan con lo encontrado en el estado del arte, donde las zonas de menor desarrollo suelen ser las mejores calificadas en este componente y las de mayor desarrollo con las ponderaciones más bajas. Siguiendo esta lógica se encuentra que la zona industrial el Papayo obtuvo la ponderación baja, tradicionalmente esta zona ha sido ocupada por empresas dedicadas a la transformación. El resumen de las ponderaciones se presenta en la Figura 5-8.

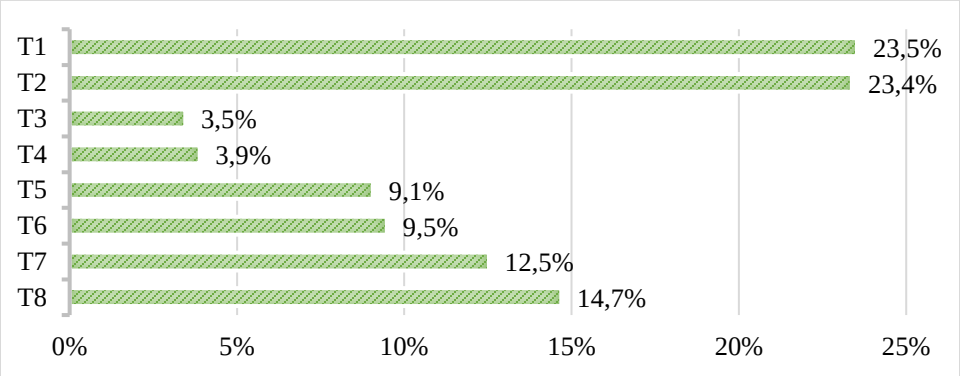
Figura 5-8 Pesos de las alternativas de ubicación considerando el subcriterio desarrollo local



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, el subcriterio seguridad laboral fue el que obtuvo CRs más altos en la evaluación individual de los expertos, fue el único que tuvo que ser repetido (con el experto 3) debido a un CR que superaba el 10% inicialmente establecido. La razón de los altos CR puede ser el alto número de alternativas a evaluar para este componente (8). Sin embargo, el CR de la matriz sintetizada fue de 2,42%. Las implementaciones tecnológicas que fueron consideradas menos riesgosas para los expertos son los procesos de trituración (T1 y T2) sin ningún proceso extra, mientras que incorporar a la trituración un proceso de fabricación de diésel sintético (T3 y T4) es considerado lo más riesgoso para la salud de los trabajadores. Todas las ponderaciones producto del juicio de los expertos es presentada en la Figura 5-9. En el Anexo 4 se detalla las respuestas de cada uno de los expertos y los cálculos.

Figura 5-9 Pesos de las alternativas tecnológicas subcriterio seguridad laboral



Fuente: Elaboración propia

5.3 Formulación matemática

Este apartado tiene como objetivo diseñar un modelo que permita la optimización de la cadena de suministro inversa. Se propone un modelo de programación multi-objetivo y multi-periodo. Los

objetivos considerados son: la maximización de los beneficios económicos y sociales y minimizar el impacto sobre el medio ambiente. Las variables contemplan: la decisión de ubicación de un centro de acopio entre un conjunto de zonas posibles, la implementación tecnología del centro que tiene implicaciones directas en el funcionamiento al interior del centro de acopio y el flujo de material entre los actores de la cadena. Así mismo se contemplan decisiones de producción al interior del centro de acopio.

5.3.1 Supuestos del modelo

- La generación de LFU de cada uno de los generadores es conocida para cada uno de los años y su comportamiento es determinístico.
- La demanda de LFU de cada una de las plantas de recuperación es conocida y de tipo determinística.
- La ubicación de los generadores de llantas y plantas de recuperación es conocida.
- Las alternativas de ubicación de los centros de acopio son conocidas y establecidas con antelación.
- La inversión para realizar la apertura del centro de acopio es fija y conocida para cada alternativa tecnológica.
- Los costos fijos y variables asociados al proceso de trituración y de producción son conocidos y varían entre año y año.
- El producto final fabricado en el centro de acopio es comercializado en su totalidad. Esta implicación no aplica para el granulado de caucho.
- La capacidad del centro de acopio para cada uno de sus procesos es conocida y fija en el tiempo. No se contempla dentro del modelo matemático la variación de capacidad entre un año y otro.
- El impacto ambiental (Ecoindicador 99) asociado a cada uno de los procesos de la cadena de suministro inversa (Recolección, producción y distribución) es conocido y constante en el tiempo, en tanto, no se consideran modificaciones en el diseño del sistema productivo o cambios radicales en los medios de transporte.
- Solamente se abrirá un centro de acopio y únicamente se podrá implementar una de las alternativas tecnológicas propuestas en la Tabla 5-6.
- El modelo no contempla decisiones del orden operativo como ruteo de vehículos.
- El impacto social es conocido y constante para todos los años.
- Las LFU son consideradas como una unidad agregada con un peso promedio establecido en el Anexo 2.

5.3.2 Definición de variables y parámetro del modelo.

Los parámetros de entrada del modelo son listados en la Tabla 5-9, los subíndices del modelo se presentan en la Tabla 5-10. Mientras que las variables de decisión se referencian en la Tabla 5-11. En las referidas tablas se especifica la unidad de medida de cada uno de los elementos, junto con una breve descripción.

Tabla 5-9 Parámetros utilizados en el modelo de optimización matemática

Parámetros	Descripción	Unidad
CA_{jt}	Costo de apertura del centro de acopio en la ubicación j con la tecnología t	$
CF_{jta}	Costo fijo de operación del centro de acopio en la ubicación j con la tecnología t en el año a	$/año
CVT_{kta}	Costo por tonelada triturada utilizando la tecnología t con destino a la planta de recuperación k en el año a	$/t
CVP_{ta}	Costo unitario de producto fabricado con la tecnología t en el año a	$/und
CTL_{a}	Costos de transporte de llantas usadas en el año a	$/und-km
CTP_{a}	Costos de transporte de GRC y productos terminados en el año a	$/t-km
DG_{ij}	Distancia entre el generador i y el centro de acopio j	km
DP_{jk}	Distancia entre el centro de acopio j y la panta de recuperación k	km
$DEMG_{ka}$	Demanda de GRC de la planta de recuperación k en el año a	t/año
$DEML_{ka}$	Demanda de LFU recauchutables de la planta de recuperación k en el año a	t/año
PV_{ta}	Precio de mercado del producto fabricado con la tecnología t en el año a	$/und
PVR_{a}	Precio de mercado de llantas recauchutables en el año a	$/llanta
PVG_{kta}	Precio de mercado de GRC fabricado con la tecnología t en la planta de recuperación k en el año a	$/t
PVA_{a}	Precio de mercado del acero en el año a	$/t
PC_{a}	Precio de compra de llantas usadas recolectadas en el año a	$/llanta
CM_{ja}	Costo unitario de manejo en el centro de acopio j en el año a	$/llanta
LFU_{i}	Generación de llantas usadas en la ubicación i	llantas/año
$ECOTA$	Eco indicador asociado al transporte de LFU	Eco Pt/und
$ECOTB$	Eco indicador asociado al transporte de LFU recauchatables	Eco Pt/und
$ECOTC$	Eco indicador asociado al transporte de GRC y producto terminado	Eco Pt/t
$ECOA_{t}$	Eco indicador por tonelada producida de GRC utilizando la tecnología t	Eco Pt/t
$ECOB_{t}$	Eco indicador por unidad producida utilizando la tecnología t	Eco Pt/und
$ECOC$	Eco indicador por LFU enviada a proceso de recauchatado k	Eco Pt/und
$ECOD_{k}$	Eco indicador por tonelada de GRC enviada a la planta de recuperación k	Eco Pt/t
FLR	Proporción de llantas usadas susceptibles de recauchutado	%
AC	Composición de acero de las llantas usadas	%
FC_{t}	Factor de conversión utilizando la tecnología t	N/A
FCT	Factor de conversión para el proceso de trituración caucho	N/A
$CLFU_{a}$	Factor de crecimiento de llantas usadas en el año a	%
$SOCGE_{t}$	Puntaje del subcriterio generación de empleo para alternativa tecnológica t	N/A
$SOCSL_{t}$	Puntaje del subcriterio seguridad laboral para alternativa tecnológica t	N/A
$SOCDL_{j}$	Puntaje del subcriterio desarrollo local para la ubicación j	N/A
WGE	Ponderación del subcriterio social generación de empleo	%
WSL	Ponderación del subcriterio social seguridad laboral	%
WDL	Ponderación del subcriterio social desarrollo local	%
INT_{a}	Factor de conversión del dinero en el tiempo en el año a	N/A
MR_{a}	Meta de recolección de residuos en el año a	%
CCA	Número máximo de centros de acopio a abrir en la ciudad	Centro de acopio
$CAPG_{jt}$	Capacidad de producción de GRC del centro de acopio en la ubicación j con la tecnología t	t/año
$CAPL_{j}$	Capacidad de recepción de LFU del centro de acopio en la ubicación j	llantas/año
$CAPP_{jt}$	Capacidad del centro de acopio en la ubicación j utilizando la tecnología t	Und/año

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-10 Sub-índices utilizados en el modelo de optimización matemática

Índices	Descripción	Rango
$i \in I$	Conjunto de ubicaciones de los generadores de llantas usadas	[1-22]
$j \in J$	Conjunto de alternativas de ubicación para los centros de acopio	[1-4]
$k \in K$	Conjunto de ubicaciones de plantas de recuperación	[1-4]
$t \in T$	Conjunto de alternativas tecnológicas a implementar	[1-8]
$a \in A$	Periodos de tiempo	[1-8]

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-11 Variables utilizadas en el modelo de optimización matemática

Variables	Descripción	Unidad
$\mathbf{X_{jt}}$	Variable binaria; 1 para el centro de acopio establecido en la ubicación j implementando la tecnología t, de otro modo es 0	[0,1]
$\mathbf{XL_{ija}}$	Flujo de LFU desde el generador i hasta el centro de acopio j en el año a	llantas/año
$\mathbf{XLR_{jka}}$	Flujo de LFU recauchutables desde el centro de acopio j hasta la planta de recuperación k en el año a	llantas/año
$\mathbf{XGR_{jkta}}$	Flujo de gránulo de caucho desde el centro de acopio j hasta la planta de recuperación k utilizando la tecnología t en el año a	t/año
$\mathbf{XPG_{jta}}$	Producción de GRC en el centro de acopio j con la tecnología t en el año a	t/año
$\mathbf{XPT_{jta}}$	Fabricación de producto terminado en el centro de acopio j con la tecnología t en el año a	Und/año
$\mathbf{U_a}$	Utilidad en el año a	$/año
$\mathbf{IMP_a}$	Impacto ambiental en el año a	Eco Pt/año

Fuente: Elaboración propia

5.3.3 Formulación de funciones objetivo

Como se mencionó previamente, el modelo tiene como objetivo maximizar los beneficios económicos y sociales, y minimizar el impacto sobre el medio ambiente. El objetivo económico se logra maximizando el Valor Presente Neto (VPN). En la *Ec. 5-3* ha sido simplificada calculando previamente el factor de devaluación del dinero, de esta manera el modelo matemático no es saturado con información que puede ser depurada previamente. El término negativo en la ecuación hace referencia al costo de apertura del centro de acopio multipropósito en una ubicación j implementando la tecnología t.

$$Max\ (VPN) = -\sum_{\forall j \in J}\sum_{\forall t \in T} \mathrm{CA_{jt}} * \mathrm{X_{jt}} + \sum_{\forall a \in A} INT_a * U_a \qquad \text{Ec. 5-3}$$

Costo de apertura del centro de acopio

Utilidad generada por la venta de producto

La utilidad es calculada para cada uno de los años del horizonte de planeación, considerando que los únicos ingresos están dados por la venta bien sea de subproductos o productos terminados. Los costos están asociados al transporte, operación del centro de acopio, apertura del centro de acopio, costos variables de producción y por supuesto los costos asociados al inventario. En las ecuaciones Ec. 5-4, *Ec. 5-5* y Ec. 5-10, se presentan los cálculos de la utilidad, ingresos y costos respectivamente. En las

ecuaciones Ec. 5-6 a la Ec. 5-9 se detalla los componentes del ingreso. Mientras que en las ecuaciones Ec. 5-11 a la Ec. 5-17 se detallan los componentes del costo.

$$Utilidad\ (\mathrm{U_a}) = Ingresos\ (ING_a) - Costos\ (COS_a) \quad \text{Ec. 5-4}$$

$$\mathrm{ING_a} = \sum_{\forall t \in T}\sum_{\forall j \in J} \mathrm{PV_{ta}} * \mathrm{XPT_{jta}} + \sum_{\forall k \in K}\sum_{\forall j \in J} \mathrm{PVR_a} * \mathrm{XLR_{jka}} + \sum_{k \in K}\sum_{\forall t \in T}\sum_{\forall j \in J} \mathrm{PVG_{kta}} * \mathrm{XGR_{jkta}} + \sum_{\forall t \in T}\sum_{\forall j \in J} \frac{\mathrm{AC}}{1-\mathrm{AC}} * \mathrm{PVA_a} * \mathrm{XPG_{jta}} \quad \text{Ec. 5-5}$$

$$\text{Ingresos por venta de producto terminado} = \sum_{\forall t \in T}\sum_{\forall j \in J} \mathrm{PV_{ta}} * \mathrm{XPT_{jta}} \quad \text{Ec. 5-6}$$

$$\text{Ingreso por venta de LFU recauchutables} = \sum_{\forall k \in K}\sum_{\forall j \in J} \mathrm{PVR_a} * \mathrm{XLR_{jka}} \quad \text{Ec. 5-7}$$

$$\text{Ingresos por venta de GRC} = \sum_{k \in K}\sum_{\forall t \in T}\sum_{\forall j \in J} \mathrm{PVG_{kta}} * \mathrm{XGR_{jkta}} \quad \text{Ec. 5-8}$$

$$\text{Ingreso por venta de acero} = \sum_{\forall t \in T}\sum_{\forall j \in J} \frac{\mathrm{AC}}{1-\mathrm{AC}} * \mathrm{PVA_a} * \mathrm{XPG_{jta}} \quad \text{Ec. 5-9}$$

$$\mathrm{COS_a} = \sum_{\forall j \in J}\left[\sum_{\forall t \in T} \mathrm{CF_{jta}} * \mathrm{X_{jt}} + \sum_{\forall k \in K}\sum_{\forall t \in T} \mathrm{CVT_{kta}} * \mathrm{XGR_{jkta}} + \sum_{\forall t \in T} \mathrm{CVP_{ta}} * \mathrm{XPT_{jta}} + \sum_{\forall i \in I} \mathrm{CTL_a} * \mathrm{DG_{ij}} * \mathrm{XL_{ija}} + \sum_{\forall k \in K} \mathrm{CTL_a} * \mathrm{DP_{jk}} * \mathrm{XLR_{jka}} + \sum_{\forall k \in K}\sum_{\forall t \in T} \mathrm{CTP_a} * \mathrm{DP_{jk}} * \mathrm{XGR_{jkta}} + \sum_{i \in I}\left(\mathrm{PC_a} + \mathrm{CM_{ja}}\right) * \mathrm{XL_{ija}}\right] \quad \text{Ec. 5-10}$$

$$\text{Costo fijo de operación del centro} = \sum_{\forall j \in J}\sum_{\forall t \in T} \mathrm{CF_{jta}} * \mathrm{X_{jt}} \quad \text{Ec. 5-11}$$

$$\text{Costo de producción GRC} = \sum_{\forall j \in J}\sum_{\forall k \in K}\sum_{\forall t \in T} \mathrm{CVT_{kta}} * \mathrm{XGR_{jkta}} \quad \text{Ec. 5-12}$$

$$\text{Costo de fabricación de producto terminado} = \sum_{\forall j \in J}\sum_{\forall t \in T} \mathrm{CVP_{ta}} * \mathrm{XPT_{jta}} \quad \text{Ec. 5-13}$$

$$\text{Costos de transporte (recolección)} = \sum_{\forall j \in J}\sum_{\forall i \in I} \mathrm{CTL_a} * \mathrm{DG_{ij}} * \mathrm{XL_{ija}} \quad \text{Ec. 5-14}$$

$$\text{Costo de transporte LFU recauchutables} = \sum_{\forall j \in J}\sum_{\forall k \in K} \mathrm{CTL_a} * \mathrm{DP_{jk}} * \mathrm{XLR_{jka}} \quad \text{Ec. 5-15}$$

$$\text{Costos de transporte producto terminado} = \sum_{\forall j \in J}\sum_{\forall k \in K}\sum_{\forall t \in T} \mathrm{CTP_a} * \mathrm{DP_{jk}} * \mathrm{XGR_{jkta}} \quad \text{Ec. 5-16}$$

$$\text{Costo de compra y de manejo de LFU} = \sum_{\forall j \in J}\sum_{i \in I}\left(\mathrm{PC_a} + \mathrm{CM_{ja}}\right) * \mathrm{XL_{ija}} \quad \text{Ec. 5-17}$$

El impacto sobre el medio ambiente es calculado a partir del eco-indicador 99 (ECO 99) asociado a cada eslabón la cadena de suministro. En la *Ec. 5-18* se calculó el ECO 99 para: transporte de LFU desde los generadores hasta el centro de acopio, transporte de LFU recauchutables desde el centro de acopio hasta las plantas de recuperación, transporte de GRC desde el centro de acopio hasta las plantas de recuperación, producción de GRC en el centro de acopio, producción de producto terminado en el centro de acopio, proceso de recauchutado y disposición del GRC enviado del centro de acopio a la planta de recuperación (por ejemplo, tiene menor impacto sobre el medio ambiente enviar GRC para producción de pisos que para recuperación de energía en hornos). Desde la ecuación *Ec. 5-19* a la *Ec. 5-25* se detallan los compontes del pilar ambiental (ECO99).

$$\begin{aligned}\text{Min (ECO99)} = \sum_{\forall a\in A}\Bigg[&\sum_{\forall i\in i}\sum_{\forall j\in J}\text{ECOTA}*\text{DG}_{ij}*\text{XL}_{ija}+\sum_{\forall t\in T}\sum_{\forall j\in J}\text{ECOB}_t*\text{XPT}_{jta}\\&+\sum_{\forall k\in K}\sum_{\forall j\in J}\text{ECOTB}*\text{DP}_{jk}*\text{XLR}_{jka}+\sum_{\forall j\in J}\sum_{\forall k\in K}\sum_{\forall t\in T}\text{ECOD}_k*\text{XGR}_{jkta}\\&+\sum_{\forall j\in J}\sum_{\forall t\in T}\text{ECOA}_t*\text{XPG}_{jta}+\sum_{\forall j\in J}\sum_{\forall k\in K}\text{ECOC}*\text{XLR}_{jka}\\&+\sum_{\forall j\in J}\sum_{\forall K\in k}\sum_{\forall t\in T}\text{ECOTC}*\text{DP}_{jk}*\text{XGR}_{jkta}\Bigg]\end{aligned}\qquad\text{Ec. 5-18}$$

Eco-indicador recolección de LFU $$=\sum_{\forall a\in A}\sum_{\forall i\in i}\sum_{\forall j\in J}\text{ECOTA}*\text{DG}_{ij}*\text{XL}_{ija}\qquad\text{Ec. 5-19}$$

Eco-indicador distribución de LFU recauchutables $$=\sum_{\forall a\in A}\sum_{\forall t\in T}\sum_{\forall j\in J}\text{ECOB}_t*\text{XPT}_{jta}\qquad\text{Ec. 5-20}$$

Eco-indicador distribución de producto terminado $$=\sum_{\forall a\in A}\sum_{\forall k\in K}\sum_{\forall j\in J}\text{ECOTB}*\text{DP}_{jk}*\text{XLR}_{jka}\qquad\text{Ec. 5-21}$$

Eco-indicador proceso de recuperación (externo) $$=\sum_{\forall a\in A}\sum_{\forall j\in J}\sum_{\forall k\in K}\sum_{\forall t\in T}\text{ECOD}_k*\text{XGR}_{jkta}\qquad\text{Ec. 5-22}$$

Eco-indicador producción de GRC $$=\sum_{\forall a\in A}\sum_{\forall j\in J}\sum_{\forall t\in T}\text{ECOA}_t*\text{XPG}_{jta}\qquad\text{Ec. 5-23}$$

Eco-indicador proceso de recauchutado (externo) $$=\sum_{\forall a\in A}\sum_{\forall j\in J}\sum_{\forall k\in K}\text{ECOC}*\text{XLR}_{jka}\qquad\text{Ec. 5-24}$$

Eco-indicador distribución de GRC $$=\sum_{\forall a\in A}\sum_{\forall j\in J}\sum_{\forall K\in k}\sum_{\forall t\in T}\text{ECOTC}*\text{DP}_{jk}*\text{XGR}_{jkta}\qquad\text{Ec. 5-25}$$

El indicador del impacto social es adimensional y es calculado a partir de tres componentes generación de empleo, seguridad laboral y desarrollo local. Estos componentes son evaluados únicamente con las alternativas de ubicación y de implementación tecnológica. Por ejemplo, no es considerado el factor de riesgo laboral asociado a los niveles de producción. En la ecuación *Ec. 5-26* se muestra la función objetivo social del modelo. Mientras que en las ecuaciones Ec. 5-27, Ec. 5-28 y Ec. 5-29 se presentan los componentes del indicador.

$$\text{Max (Social)} = \text{WGE} * \sum_{\forall j \in J} \sum_{\forall t \in T} \text{SOCGE}_t * \text{X}_{jt} + \text{WSL} * \sum_{\forall j \in J} \sum_{\forall t \in T} \text{SOCSL}_t * \text{X}_{jt} + \text{WDL} * \sum_{\forall j \in J} \sum_{\forall t \in T} \text{SOCDL}_j * \text{X}_{jt} \quad \text{Ec. 5-26}$$

$$\text{Subcriterio social generación de empleo} = \text{WGE} * \sum_{\forall j \in J} \sum_{\forall t \in T} \text{SOCGE}_t * \text{X}_{jt} \quad \text{Ec. 5-27}$$

$$\text{Subcriterio social seguridad laboral} = \text{WSL} * \sum_{\forall j \in J} \sum_{\forall t \in T} \text{SOCSL}_t * \text{X}_{jt} \quad \text{Ec. 5-28}$$

$$\text{Subcriterio social desarrollo local} = \text{WDL} * \sum_{\forall j \in J} \sum_{\forall t \in T} \text{SOCDL}_j * \text{X}_{jt} \quad \text{Ec. 5-29}$$

5.3.4 Definición de restricciones del modelo

Condiciones de no negatividad, El siguiente grupo de restricciones garantizan la no-negatividad en el dominio de las variables del modelo:

$$\text{XL}_{ija} \geq 0; \quad \forall i \in I;\ \forall j \in J;\ \forall a \in A \quad \text{Ec. 5-30}$$

$$\text{XLR}_{jka} \geq 0; \quad \forall j \in J;\ \forall k \in K;\ \forall a \in A \quad \text{Ec. 5-31}$$

$$\text{XGR}_{jkta} \geq 0; \quad \forall j \in J;\ \forall k \in K;\ \forall t \in T;\ \forall a \in A \quad \text{Ec. 5-32}$$

$$\text{XPT}_{jta} \geq 0; \quad \forall j \in J;\ \forall t \in T;\ \forall a \in A; \quad \text{Ec. 5-33}$$

$$\text{XPG}_{jta} \geq 0; \quad \forall j \in J;\ \forall t \in T;\ \forall a \in A; \quad \text{Ec. 5-34}$$

Las restricciones del modelo se presentan a partir de las ecuaciones Ec. 5-35 a la Ec. 5-44. A grandes rasgos, estas ecuaciones matemáticas garantizan que se mantengan balanceados los flujos de materiales a través de la cadena de suministro inversa de LFU. Un par de restricciones más son incorporadas en el modelo a raíz de particularidades de la cadena de suministro analizada.

$$\sum_{\forall j \in J} \text{XL}_{ija} \leq \text{LFU}_i * \text{CLFU}_a \quad \forall i \in I;\ \forall a \in A \quad \text{Ec. 5-35}$$

$$\sum_{\forall j \in J} \sum_{\forall t \in T} \text{XGR}_{jkta} \leq \text{DEMG}_{ka} \quad \forall k \in K;\ \forall a \in A \quad \text{Ec. 5-36}$$

$$\sum_{\forall j \in J} \text{XLR}_{jka} \leq \text{DEML}_{ka} \quad \forall k \in K;\ \forall a \in A \quad \text{Ec. 5-37}$$

$$\sum_{\forall i \in I} \text{XL}_{ija} \leq \text{CAPL}_j \quad \forall j \in J;\ \forall a \in A \quad \text{Ec. 5-38}$$

$$\mathrm{XPG_{jta}} \leq \mathrm{CAPG_{jt}} \qquad \forall j \in J;\quad \forall t \in T;\ \forall a \in A \qquad \text{Ec. 5-39}$$

$$\mathrm{XPT_{jta}} \leq \mathrm{CAPP_{jt}} \qquad \forall j \in J;\quad \forall t \in T;\ \forall a \in A \qquad \text{Ec. 5-40}$$

$$\sum_{\forall i \in I} \mathrm{XL_{ija}} = \sum_{\forall k \in K} \mathrm{XLR_{jka}} + \sum_{\forall t \in T} \mathrm{FCT} * \mathrm{XPG_{jta}} \qquad \forall j \in J;\quad \forall a \in A \qquad \text{Ec. 5-41}$$

$$\mathrm{XPG_{jta}} = \sum_{\forall k \in K} \mathrm{XGR_{jkta}} + \mathrm{FC_t} * \mathrm{XPT_{jta}} \qquad \forall j \in J;\quad \forall t \in T;\quad \forall a \in A \qquad \text{Ec. 5-42}$$

$$\sum_{\forall k \in K} \mathrm{XLR_{jka}} \leq \sum_{\forall i \in I} \mathrm{FLR} * \mathrm{XL_{ija}} \qquad \forall j \in J;\quad \forall a \in A \qquad \text{Ec. 5-43}$$

$$\sum_{\forall j \in J} \sum_{\forall t \in T} \mathrm{X_{jt}} \leq CCA \qquad \text{Ec. 5-44}$$

La expresión *Ec. 5-35* garantiza que a cada generador de LFU se le recoja como máximo el nivel de residuos generados, sin embargo, también se ha establecido un nivel de recolección mínimo para cada uno de los generadores que va aumentando para cada uno de los años, con vistas a modelar los requerimientos de la Resolución 1326 de 2017 (ver Ec. 5-46). Las ecuaciones Ec. 5-36 y Ec. 5-37 aseguran que cada una de las plantas de recuperación no reciba un flujo de material superior al que requiere, se utilizan dos restricciones porque se diferencia el flujo de GRC del flujo de LFU recauchatables.

Las restricciones Ec. 5-38, Ec. 5-39 y Ec. 5-40 fuerzan a que el flujo de material hacia el centro de acopio no exceda sus capacidades de: gestión de LFU, producción de GRC y fabricación de producto terminado respectivamente. Un aspecto vital en la modelación de cadenas de suministro es la conservación del flujo o de la materia, para este fin se formularon las ecuaciones Ec. 5-41 y Ec. 5-42, la primera se relaciona con el flujo de LFU y la segunda con el flujo de GRC. Lo anterior considerando que las LFU pueden ser enviados a recauchutado o ser triturados, mientras que el GRC puede ser comercializado o puede ser utilizado como materia prima para la fabricación de un producto de consumo final. Evidentemente, no todas las LFU son susceptibles de recauchutado por ello se plantea la ecuación Ec. 5-43, la cual asegura que solo una porción de las LFU son enviadas a procesos de recauchutado.

Por otra parte, la restricción Ec. 5-44 asegura que como máximo se abrirá un centro de acopio utilizando únicamente una alternativa tecnológica. La restricción Ec. 5-45 se formula atendiendo los conceptos emitidos por el grupo de expertos consultados, quienes argumentan que para que un proyecto sea viable a largo plazo debe asegurar su sostenibilidad financiero, por lo anterior se plantea que el VPN sea por lo menos igual a 0. Mientras que la restricción *Ec. 5-46* obliga que se cumpla con una tasa de recuperación mínima de LFU cada uno de los años del horizonte de planeación.

$$\mathrm{VPN} \geq 0 \qquad \text{Ec. 5-45}$$

$$\sum_{\forall j \in J} \mathrm{XL_{ija}} \geq \mathrm{MR_a} * \mathrm{LFU_{ia}} \qquad \forall i \in I;\ \forall a \in A \qquad \text{Ec. 5-46}$$

Finalmente, se plantean las clásicas restricciones de la gran M (ver desde Ec. 5-47 a la Ec. 5-51) para evitar el flujo de material por centros de acopio no abiertos y la utilización de tecnología no seleccionada. De igual manera este conjunto de ecuaciones evita la no linealidad en las restricciones del modelo.

$$\sum_{\forall i \in I} \sum_{\forall a \in A} XL_{ija} \leq \sum_{\forall t \in T} M * X_{jt} \qquad \forall j \in J \qquad \text{Ec. 5-47}$$

$$\sum_{\forall k \in K} \sum_{\forall a \in A} XLR_{jka} \leq \sum_{\forall t \in T} M * X_{jt} \qquad \forall j \in J \qquad \text{Ec. 5-48}$$

$$\sum_{\forall k \in K} \sum_{\forall a \in A} XGR_{jkta} \leq M * X_{jt} \qquad \forall j \in J; \quad \forall t \in T \qquad \text{Ec. 5-49}$$

$$\sum_{\forall a \in A} XPT_{jta} \leq M * X_{jt} \qquad \forall j \in J; \quad \forall t \in T \qquad \text{Ec. 5-50}$$

$$\sum_{\forall a \in A} XPG_{jta} \leq M * X_{jt} \qquad \forall j \in J; \quad \forall t \in T \qquad \text{Ec. 5-51}$$

Capítulo 6. Resultados computacionales

En el presente capitulo se abordan los resultados computacionales del modelo propuesto en el apartado 5.3.3. Para dar solución al modelo se utilizó el software GAMS en su versión 25.1.3. Todos los resultados fueron corridos en una computadora con RAM de 8GB y procesador AMD A12. En el Anexo 5 se presenta la programación utilizada en GAMS y en el Anexo 6 se presentan los datos de entrada utilizados en los modelos desarrollados en este apartado.

6.1 Una visión mono – objetivo

Inicialmente el problema matemático es abordado como un caso clásico de programación lineal entera mixta con un único objetivo. Esto se hace con dos finalidades, ilustrar que no existe una alternativa que sea dominante de las demás en los tres objetivos (económico, ambiental y social), y los resultados de la optimización mono-objetivo son el insumo para normalizar los criterios de decisión en la optimización multi-objetivo. En la Tabla 6-1 se presentan las características generales del modelo propuesto para la cadena de suministro inversa de LFU para Ibagué.

Tabla 6-1 Descripción general del modelo objeto de estudio

Característica	Descripción
Tipo de modelo	MILP
Tipo de solucionador	CPLEX – GAMS
Horizonte de tiempo	8 años
Número de variables	2011
Número de restricciones	1333

Fuente: Elaboración propia

Al correr los modelos y optimizarlos independientemente se evidencia cierta dominancia de la alternativa de localización El Papayo, que fue la decisión en la optimización económica y ambiental. Esto se debe a su cercanía a los diferentes generadores de LFU en la ciudad, lo que se traduce en un menor costo en la recolección del residuo y un impacto ambiental más bajo asociado al transporte de las LFU (ver Tabla 6-2). En los tres casos el objetivo ambiental presenta valores negativos, cuando el Eco-indicador 99 está en el rango de los números negativos significa que no hay afectación sobre el medio ambiente, por el contrario, existe un beneficio ambiental en la implementación de una cadena de suministro para recuperar LFU en Ibagué.

Tabla 6-2 Resultados de la optimización bajo la visión mono-objetivo

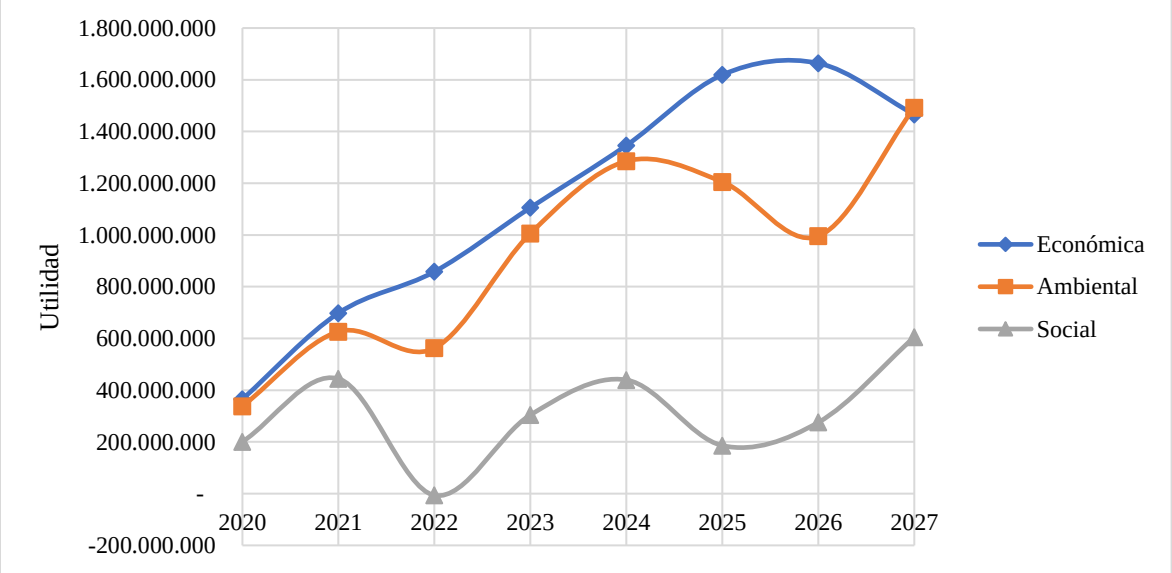
Variable	Optimización Económica	Optimización Ambiental	Optimización Social
VPN	4.185.931.390	3.332.869.173	689.069.172
ECO99	-19.654	-55.690	-13.545
Social	0,110	0,114	0,204
Localización	El Papayo	El Papayo	Miramar
Tecnología	t5	t7	t8

Fuente: Elaboración propia

Otro factor importante es que la implementación tecnológica en todos los casos contempla un proceso adicional a la trituración de las LFU, bien sea por vía criogénica (t8) o por vía mecánica (t5 y t7). La fabricación de pisos a partir de GRC es la más rentable económicamente, sin embargo, es superada en los criterios social y ambiental por las otras dos alternativas, similar situación ocurre con los resultados obtenidos en la optimización social. Precisamente esta situación de pierde y gana es lo que justifica un análisis multi-objetivo, que finalmente se utiliza para mediar entre los criterios a fin de encontrar una solución que tenga un buen rendimiento en todas las dimensiones evaluadas.

Evidentemente desde el punto de vista de generación de utilidades la optimización económica es dominante respecto a las demás (ambiental y social). De manera general la optimización ambiental presenta un desempeño económico cercano a la optimización económica, salvo en algunos años (2022, 2025 y 2026) puntuales donde se presentan marcadas diferencias, algo interesante es que en el año 2027 la optimización ambiental presenta un mejor desempeño económico que la optimización económica (ver ***Figura 6-1***). Por otra parte, la optimización social en términos de generación de utilidad se encuentra rezagada, incluso para el año 2022 no se presentan utilidades, por el contrario, se registran pérdidas de $6.431.000. Es importante aclarar que la utilidad generada en los años presenta menor ponderación que las generadas en los primeros años. Esto se debe a que la metodología VNP contempla la devaluación del dinero en el tiempo.

Figura 6-1 Progresión en el tiempo de la utilidad generada en el centro de acopio.

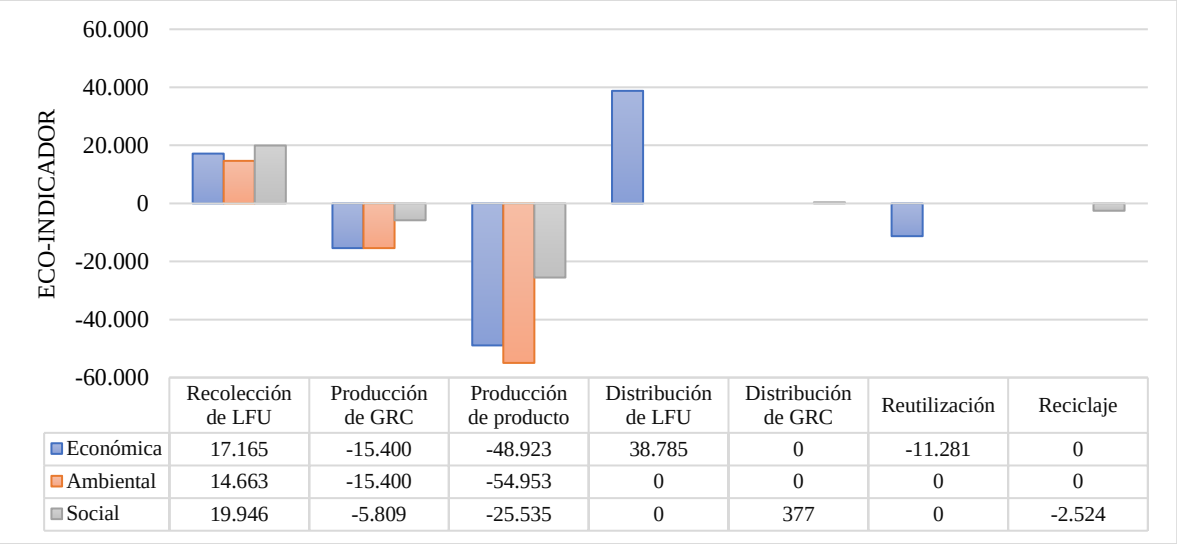


Fuente: Elaboración propia

Para cada uno de los procesos que tiene lugar en la cadena de suministro de LFU se modeló el impacto sobre el medio ambiente. El proceso que presenta mayor afectación sobre el medio ambiente es la recolección del residuo derivado del impacto del transporte en un contexto urbano, en este sentido el pico de impacto ambiental se presentó en la distribución de LFU recauchatables. En gran parte, por las largas distancias que separan ambos actores (esto exclusivamente en la optimización económica). Mientras que el proceso de producción de producto terminado en los tres casos (optimización económica, ambiental y social) presenta grandes beneficios para el medio ambiente, en tanto, se transforma un residuo en un producto nuevo. Los procesos de distribución, reutilización y reciclaje

presentan en su mayoría valores de 0, esto se debe a que los productos intermedios son poco comercializados, por ejemplo, el GRC se consume en su totalidad en los procesos de transformación (fabricación de pisos o tapetes) al interior del centro de acopio multipropósito (ver Figura 6-2). Por otra parte, el proceso de producción de GRC presenta leves beneficios para el medio ambiente, lo cual se alinea a los resultados obtenidos por investigaciones previas (Dehghanian & Mansour, 2009; Subulan et al., 2015).

Figura 6-2 Contribución al Eco-indicador por proceso en la cadena de suministro



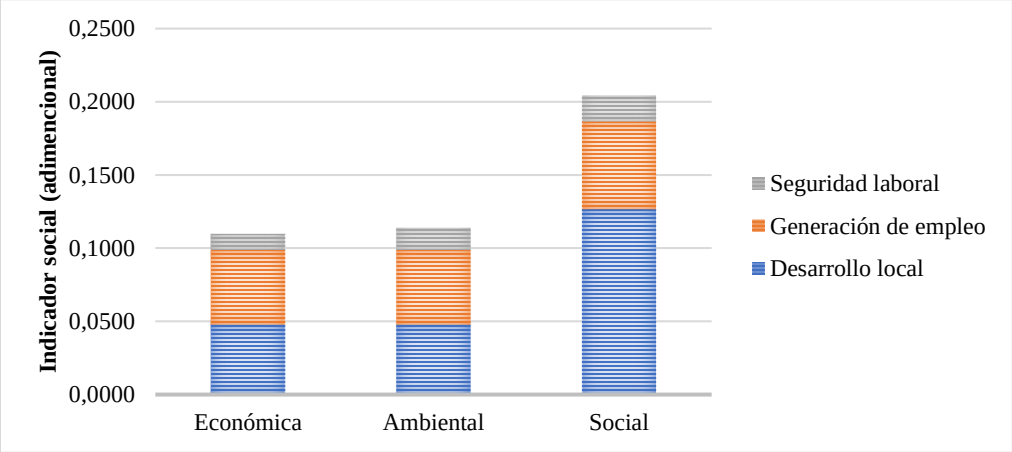
	Recolección de LFU	Producción de GRC	Producción de producto	Distribución de LFU	Distribución de GRC	Reutilización	Reciclaje
Económica	17.165	-15.400	-48.923	38.785	0	-11.281	0
Ambiental	14.663	-15.400	-54.953	0	0	0	0
Social	19.946	-5.809	-25.535	0	377	0	-2.524

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, el costo de mayor participación en la cadena de suministro propuesta es el asociado a la fabricación del producto terminado (pisos y alfombras) que representa entre el 80% y 85% del costo total anual, mientras que el costo de recolección representa algo más del 2%. Así mismo, el mayor ingreso para el centro de acopio multipropósito se deriva de la venta de producto terminado, mientras que la venta de subproductos presenta baja participación y es apalancada en su mayoría por la comercialización del acero que es obtenido como subproducto en el proceso de trituración de LFU, en este rubro el aporte de la comercialización de GRC es nulo porque todo lo que se produce es consumido al interior del centro.

El pilar social como era de esperar obtuvo el mayor valor mediante la optimización social con un indicador agregado de 0,204 (ver ***Figura 6-3***). Este indicador como se mencionó previamente es adimensional y resulta de la aplicación de la metodología AHP dentro de la modelación matemática. El subcriterio de mayor participación en la optimización social fue el desarrollo local aportando 0,127 al indicador global. Mientras que para la optimización económica y ambiental el subcriterio de mayor partición fue generación de empleo aportando 0,05 en ambos casos. Para las tres optimizaciones el subcriterio de menor aporte fue la seguridad laboral, esto se debe a que el peso de este criterio es del 12%.

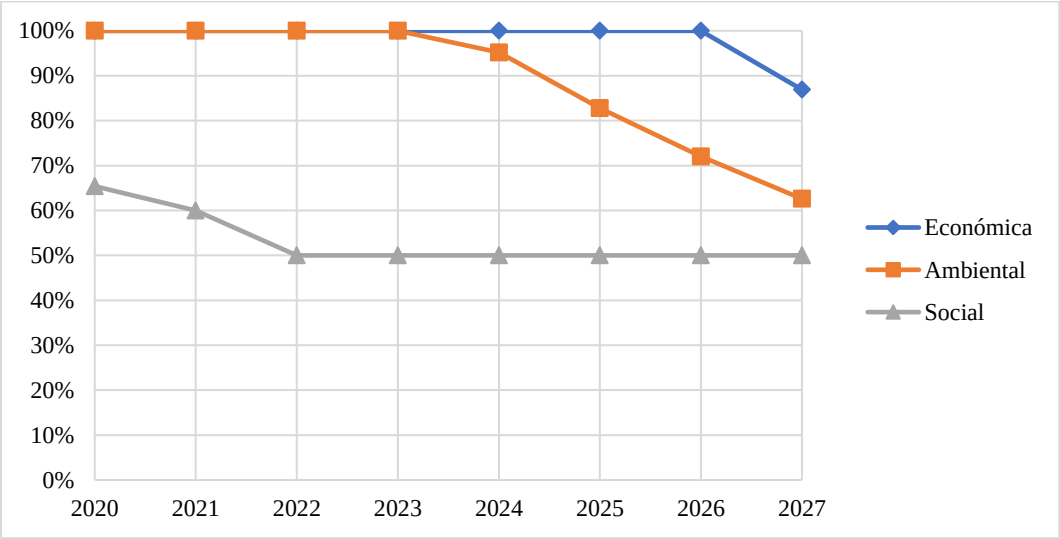
Figura 6-3 Componentes del pilar social



Fuente: Elaboración propia

En relación con la tasa de recuperación de LFU, el desempeño más bajo lo presenta la optimización social, que mantiene un nivel promedio del 50%, con un pico de recolección del 65% en el año 2020 (ver Figura 6-4). Mientras que la optimización económica y ambiental alcanzan tasas de recuperación del 100% en los primeros cuatro años, a partir del año 2024 la tasa de recuperación baja progresivamente hasta llegar al 63% en el año 2027 (esto en cuanto a la optimización ambiental). Lo anterior se debe a que la generación de LFU en la ciudad para el año 2023 supera la capacidad del centro de acopio multipropósito, en tanto, se supuso un crecimiento anual del 15% en la generación de LFU. El proceso que limita la capacidad del centro de acopio en ambos casos (económico y ambiental) es el proceso de producción de GRC por la vía mecánica, que justamente a partir del año 2023 presenta una ocupación del 100% de su capacidad de producción. Hay que recordar que la capacidad de producción para cada uno de los procesos que tienen lugar en el centro de acopio se asumió como constante en el tiempo.

Figura 6-4 Tasa de recuperación de LFU de la cadena de suministro



Fuente: Elaboración propia

6.2 Optimización multi – objetivo

El modelo multi-objetivo propuesto es solucionado aplicando el método de la suma ponderada (Abdolazimi et al., 2020). Este método consiste en transformar un problema de múltiples objetivos en uno mono – objetivo. La implementación de este método demanda normalizar cada una de las funciones objetivos, para luego, construir una función objetivo compuesta llamada F(x), que no es más que la suma de cada una de las funciones objetivo normalizadas. Sin embargo, cada función objetivo no presenta el mismo nivel de importancia y, en este punto toma importancia la consulta a expertos realizada, los pesos asignados a cada función objetivo corresponden a los calculados en el apartado 5.2.6 en la aplicación de la metodología AHP. En la ecuación Ec. 6-1 se presenta la estructura de la función objetivo aplicando el método de la suma ponderada. W_i representa la importancia de cada una de las funciones objetivo y su valor debe estar en el rango de 0 y 1, adicionalmente la suma de los W_i debe ser igual a 1. La normalización de cada una de las funciones objetivo se realiza dividiendo el valor del criterio en el valor óptimo obtenido en el apartado anterior (ver Tabla 6-2).

$$Max\ F(x) = \sum_{\forall i \in n} W_i * \frac{f_i(x)}{f_i^*(x)} \qquad \text{Ec. 6-1}$$

La solución obtenida bajo la perspectiva multicriterio logró cumplir con el 89,9% del valor óptimo de los modelos individuales. Por ejemplo, el valor optimo obtenido para el VNP en la optimización individual fue de $4.185.931.390. En la optimización multi-objetivo este valor se redujo en algo más de $115 millones, en contra partida el Eco-indicador aumentó en 29.920 puntos. En síntesis, lo que se perdió en el componente económico se ganó en el ambiental (ver Tabla 6-3). El componente social obtuvo su nivel más bajo, esto se debe a que presenta la ponderación más baja y su impacto sobre el objetivo compuesto no es significativo. La mejor alternativa de localización es la Zona Industrial El Papayo y la implementación tecnología que optimiza el objetivo compuesto es la producción de GRC por la vía mecánica y la implementación de un sistema productivo para la fabricación pisos a base de GRC.

Tabla 6-3 Resultados de la optimización bajo la visión multi-objetivo

Variable	Optimización Multi-objetivo
Objetivo compuesto	89,9%
VPN	4.070.175.656
ECO99	-49.574
Social	0,110
Localización	El Papayo
Tecnología	t5

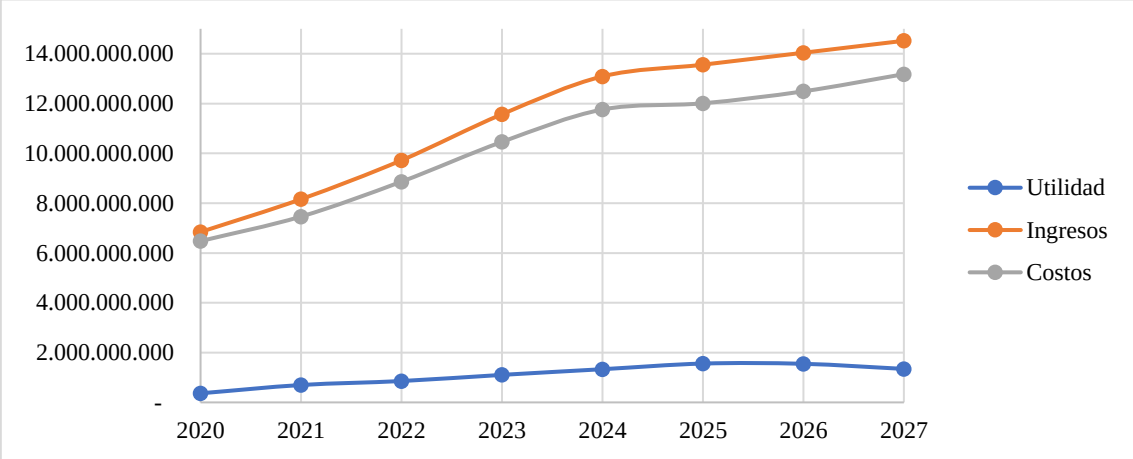
Fuente: Elaboración propia

Al igual que en la optimización mono-objetivo la mayor afectación sobre el medio ambiente se da en el proceso de recolección de LFU. Sin embargo, en la perspectiva multiobjetivo no existe afectación en la fase de distribución de GRC y de LFU recauchutables. Lo anterior se debe a que todas las LFU que ingresan al centro de acopio son usadas para producir GRC y posteriormente este GRC es utilizado en su totalidad para la producción de pisos. El proceso de reciclaje que tiene lugar en el

centro de acopio deja saldos positivos ambientalmente hablando con un eco–indicador 99 de -64.322 puntos considerando el proceso de trituración y de transformación.

La utilidad generada en el centro de acopio en la optimización multi-objetivo presentó un comportamiento creciente hasta el año 2025. Posterior a este año la utilidad cae progresivamente en los años 2026 y 2027 (ver ***Figura 6-5***). Los ingresos generados por el centro de acopio crecen año a año y a partir del año 2024 el factor de crecimiento de la utilidad disminuye. Lo anterior, se puede explicarse porque en este año se alcanza la máxima capacidad de producción del centro de acopio (más adelante se explica detalladamente). Los costos también presentan una tendencia creciente en el horizonte de planeación. Sin embargo, su tasa de crecimiento es más baja que la de los ingresos entre los años 2020 y 2025, esto permite que en este rango de tiempo la utilidad aumente.

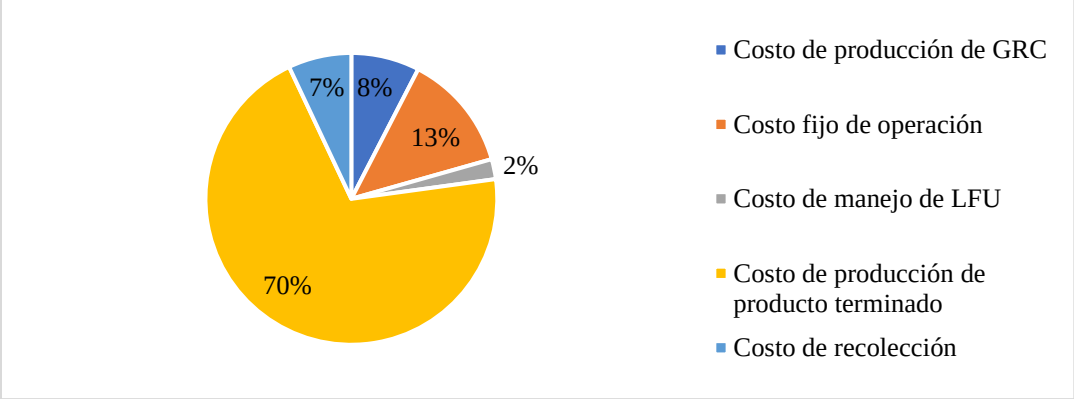
Figura 6-5 Progresión del componente económico en el tiempo para la optimización multi-objetivo



Fuente: Elaboración propia

En la solución arrojada por la optimización multiobjetivo los ingresos del centro de acopio provienen de la comercialización del producto terminado (pisos) y del sub-producto acero. En materia de costos, el costo asociado a la producción de pisos representa el 70%, los costos fijos de operación el 13%, los costos de recolección de las LFU el 7%, los restantes egresos se derivan del costo de manejo de las LFU en el centro de acopio (ver ***Figura 6-6***).

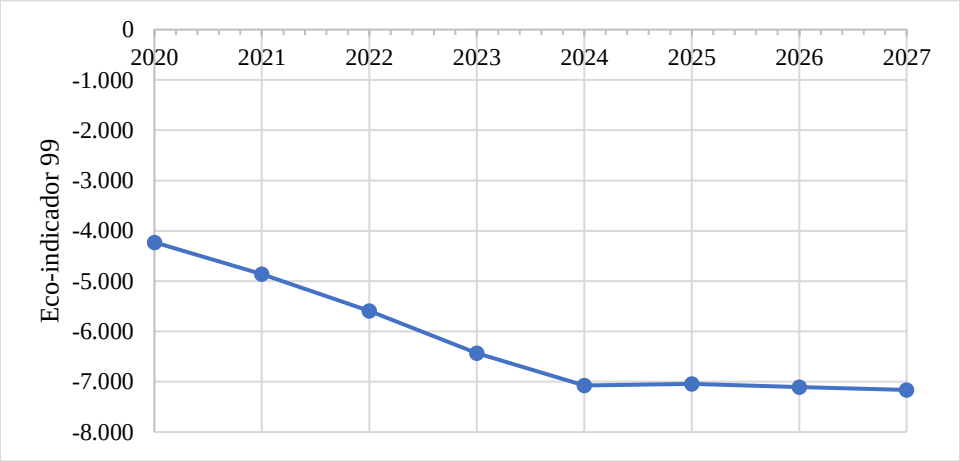
Figura 6-6 Distribución del costo



Fuente: Elaboración propia

El eco-indicador 99 que es la medida del impacto ambiental presenta una marcada tendencia decreciente año a año hasta llegar al año 2024. Luego de este año el indicador presenta un leve aumento en el año 2025 y en los daños siguientes leves disminuciones. Lo anterior indica que año a año la cadena de recuperación de LFU presenta beneficios ambientales. Por ejemplo, para el año 2022 se estima un eco-indicador de -5.591, esto quiere decir, que se está liberando al medio ambiente de una contaminación proporcional a la generada por 5.591 ciudadanos europeos en un año.

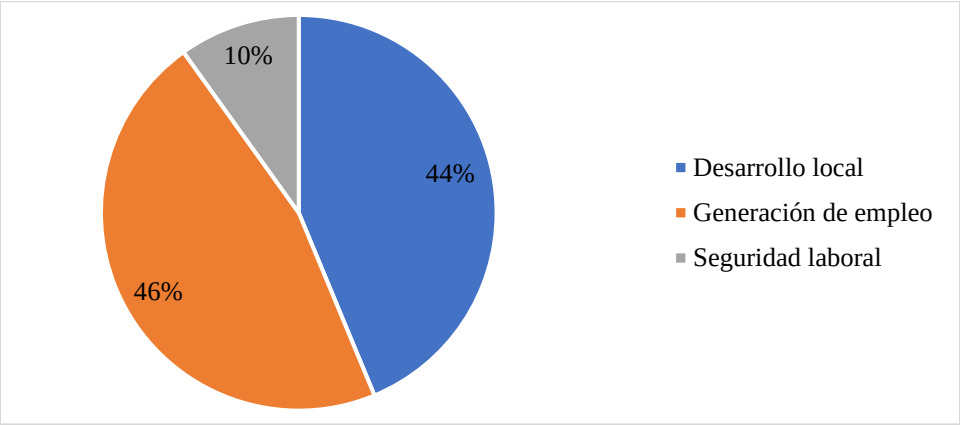
Figura 6-7 Progresión del eco-indicador en el tiempo optimización multi-objetivo



Fuente: Elaboración propia

La mayor participación del pilar social está dada por el componente de generación de empleo que tiene una participación del 46% sobre el indicador, seguido del desarrollo social, mientras que la seguridad laboral fue el de menor participación (10%) sobre la construcción del indicador (ver ***Figura 6-8***). La calificación obtenida del pilar social en la optimización multiobjetivo logra cumplir tan solo con el 54% de la calificación obtenida en la optimización social. Lo anterior se debe a que en la optimización multiobjetivo el pilar social presenta la ponderación más baja.

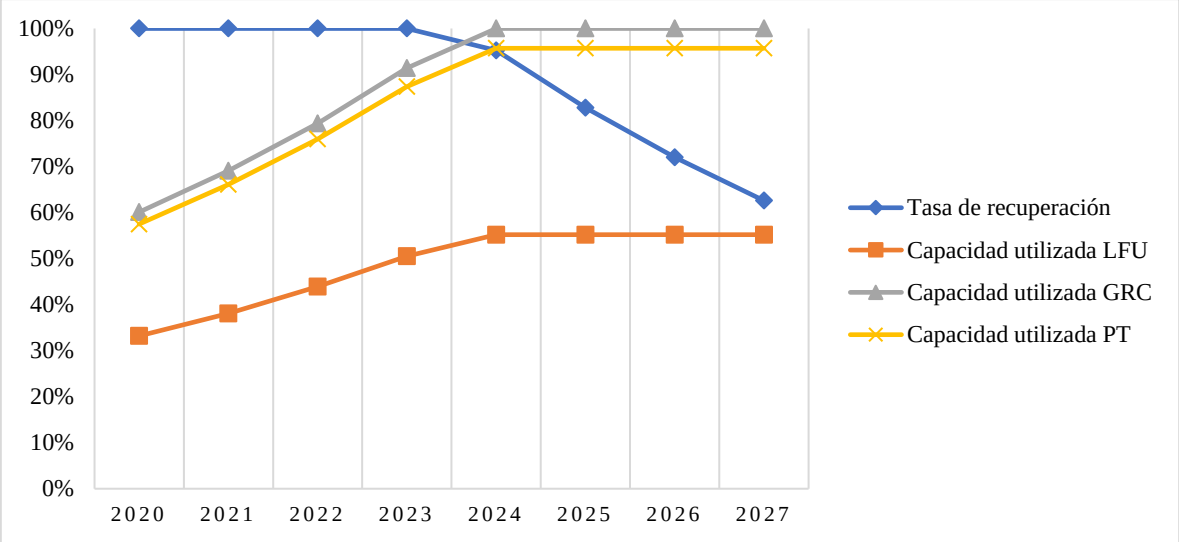
Figura 6-8 Composición del pilar social en la optimización multi-objetivo



En el análisis mono – objetivo se evidenció que la tasa de recuperación de LFU caía a partir del año 2023. Al comparar la tasa de recuperación con la utilización de la capacidad del centro de acopio multipropósito, se evidencia que la capacidad de producción de GRC es el cuello de botella del

proceso productivo (ver **Figura 6-9**). Así mismo, una vez que se alcanza la capacidad máxima de producción de GRC, suceden dos situaciones: la tasa de recuperación de LFU disminuye progresivamente y las demás capacidades se mantienen constante. En tanto, el diseño de la cadena de suministro propuesta no contempla el aprovisionamiento de GRC a través de fuentes externas al centro de acopio multipropósito.

Figura 6-9 Tasa de recuperación de LFU Vs Utilización de capacidad



Fuente: Elaboración propia

6.3 Evaluación de escenarios

En este apartado se pretende evaluar el comportamiento de la cadena de suministro inversa ante posibles variaciones en los datos de entrada.

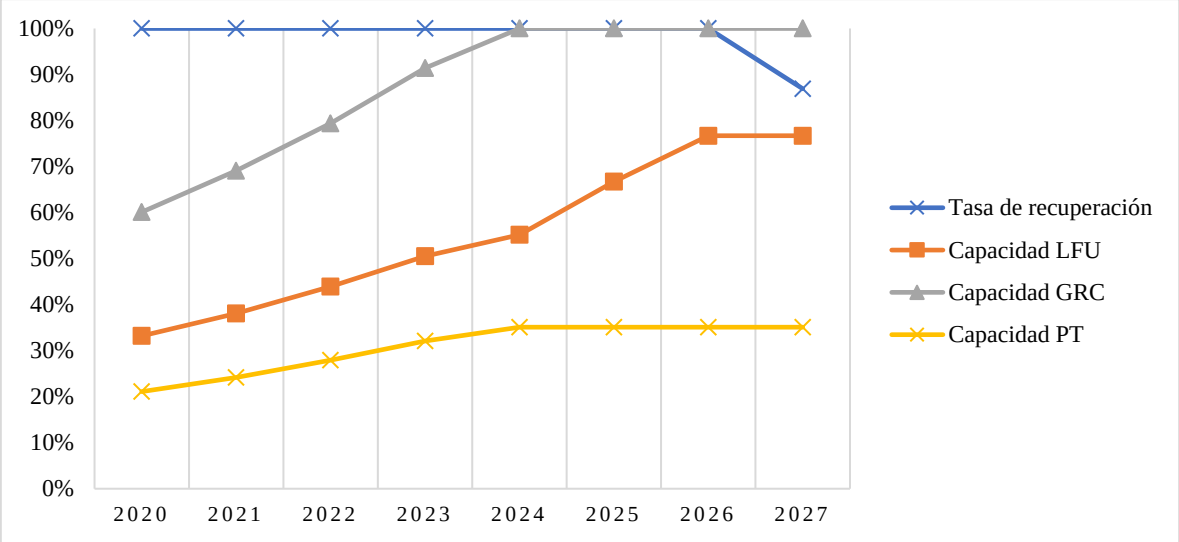
6.3.1 Exclusión del costo de apertura del centro de acopio

Una de las alternativas tecnológicas a implementar en el centro de acopio comprende un proceso de fabricación de diésel sintético a partir del GRC. A pesar de su atractivo margen de utilidad no logró ser la mejor alternativa en alguno de los modelos de optimización. Lo anterior se debe a que la apertura de un centro de acopio con esta tecnología requiere de una inversión considerablemente alta. Adicionalmente, esta implementación tiene la capacidad de procesar 16 toneladas de GRC al día. La generación de LFU en la ciudad de Ibagué no es suficiente para garantizar altos niveles de utilización de la capacidad de esta implementación tecnológica.

Al correr el modelo quitando el costo de apertura del centro de acopio, se evidencia que la solución óptima sigue siendo ubicar el centro de acopio en El Papayo e implementar la tecnología t5. Lo cual llama la atención considerando el alto margen de utilidad del diésel sintético. Al realizar un análisis sobre esta alternativa tecnológica se evidencia que la generación de LFU en la ciudad de Ibagué tan solo alcanza para cubrir en promedio una tercera parte de la capacidad de producción de diésel sintético (ver **Figura 6-10**). La implementación de esta alternativa presenta un fuerte desbalanceo de capacidad al interior del centro de acopio, cuando el proceso de trituración de LFU está al 100% y el proceso de producción de diésel sintético esta recién en el 30%. Otro aspecto que es adverso para esta

tecnología es la ineficiencia en el proceso de transformación, se requiere altas cantidades de GRC para fabricar un galón de diésel sintético. Aún sin considerar el costo de apertura, esta alternativa presenta un VNP de $1.679.168.000 y un objetivo compuesto inferior al 50%, lo cual evidencia que este proceso no tiene un buen desempeño en el componente ambiental, quizás la única medida de desempeño destacable es en el pilar social.

Figura 6-10 Tasa de recuperación de LFU Vs Utilización de capacidad diésel sintético



Fuente: Elaboración propia

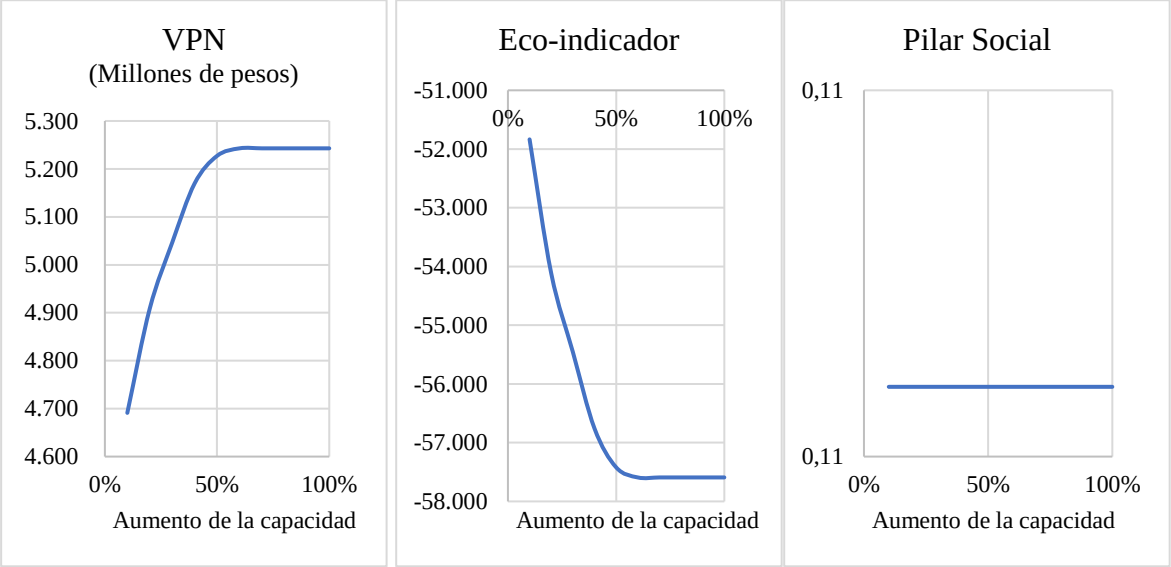
Teniendo en cuenta las consideraciones previas, en el escenario actual de la ciudad de Ibagué es inviable implementar un proceso de fabricación de diésel sintético. Al realizar el análisis de sensibilidad sobre esta alternativa se encuentra que se requiere triplicar la producción de GRC en el centro de acopio, lo cual equivale a un aumento del 430% en la generación de LFU en la ciudad. Aún en este escenario la utilidad generada en los 8 años no alcanza a cubrir el costo de implementación de esta tecnología.

6.3.2 Variación de la capacidad del centro de acopio.

Previamente se evidenció que a partir del año 2023 la capacidad instalada del centro de acopio se queda corta frente al nivel de generación de LFU en la ciudad. Por lo cual se realiza un análisis de sensibilidad sobre la capacidad del centro de acopio con el objetivo de evaluar el impacto que puede generar sobre las medidas de desempeño del modelo.

En la Figura 6-11 se evidencia que aumentar la capacidad instalada del centro de acopio a partir del año 2024 aumenta las medidas de desempeño (a excepción del componente social que permanece constante). Queda claro que existe una relación directa entre la capacidad y el pilar económico, y una relación indirecta con el pilar ambiental, siempre que el aumento no sea superior al 60%, porque en este punto aumentar más la capacidad no tiene efecto alguno sobre ninguna de las dos medidas de desempeño. El nivel máximo del VNP es de $5.227.243.569 y el nivel mínimo del eco indicador 99 es de -57.420 puntos, estos niveles se alcanzan con una ampliación en la capacidad del 65%.

Figura 6-11 Medidas de desempeño en función del aumento de la capacidad



Fuente: Elaboración propia

La ampliación de la capacidad del centro de acopio resulta ser beneficioso para todas las medidas de desempeño. Sin embargo, hay que considerar la relación costo-beneficio. A medida que el aumento en la capacidad es mayor el impacto que genera sobre las medidas de desempeño es menor. Por ejemplo, la diferencia entre aumentar la capacidad en un 10% y un 20% se traduce en una mejora en el VPN de $217.577.931 y una reducción del impacto ambiental de 2280 puntos, en cambio, la diferencia entre el 40% y 50% es de tan solo $57.512.023 en el VNP y 662 puntos en el Eco indicador 99. Teniendo como factor decisorio la relación costo beneficio explicada la mejor alternativa es ampliar la capacidad del centro de acopio en un 20% en los años posteriores al 2023.

Capítulo 7. Conclusiones y limitaciones

7.1 Conclusiones

El auge mundial en la mitigación del impacto ambiental ha impulsado el estudio y la implementación de cadenas de suministro enfocadas a la recuperación de residuos. Dentro del diseño de la cadena de recuperación las decisiones de localización e implementación tecnológica son de gran importancia y su impacto sobre el desempeño de la red es alto. En Colombia y en especial en la ciudad de Ibagué es de gran importancia implementar un sistema que se encargue de la recolección de LFU para hacerle frente a la creciente generación de este tipo de residuos, así como, la necesidad de diseñar e implementar cadenas de suministro (sean inversas o directas) que promuevan la competitividad de la ciudad y contribuya a reducir la alta tasa de desempleo y la escasa participación de la industria manufacturera en el PIB departamental.

Por otra parte, la revisión de referentes teóricos permitió concluir que los problemas asociados al diseño de cadenas de suministro inversas deben incorporar un enfoque holístico, donde la toma de decisiones recaiga sobre múltiples factores y no se limite a la evaluación del desempeño económico. Evidentemente el componente mayormente evaluado en el diseño de cadenas de suministro es el económico, mientras que en los últimos 15 años la evaluación ambiental ha venido ganando participación, el pilar social es el menos estudiado y son escasos los estudios que lo incorporan dentro de los criterios de evaluación debido a su difícil y debatida cuantificación. En este sentido, la formulación de problemas de programación lineal entera mixta es lo más recurrente. Las metodologías de solución varían dependiendo del caso de estudio, sin embargo, cada vez son más los estudios que optan por la aplicación de métodos heurísticos y la construcción de algoritmos de solución.

El diseño de la cadena de suministro inversa para LFU, permitió incorporar en la evaluación de desempeño criterios económicos, ambientales y sociales. Así mismo el integrar al modelo la implementación tecnológica como una variable de decisión en el proceso de optimización de la cadena de suministro contribuye a la comprensión de la problemática. Los resultados obtenidos muestran que es más beneficioso desde el punto de vista económico y ambiental la implementación de procesos productivos que cierren el ciclo y transformen materiales intermedios como el GRC en un producto terminado. Los resultados también dejan en evidencia que la ciudad de Ibagué tiene un alto potencial para la implementación de un sistema de recolección de residuos que logra ser rentable, sostenible y sustentable en el tiempo.

Este estudio ofrece una referencia para el diseño de cadenas de recuperación de LFU bajo un enfoque holístico y la metodología implementada permitió modelas el componente social. A partir de tres subcriterios (desarrollo local, generación de empleo y seguridad laboral) que son incorporados mediante la metodología AHP. Lo anterior, contribuye a cerrar la brecha existente identificada en el marco de referencia que planteaba un déficit de estudios que incorporaran el pilar social y ambiental al diseño de cadenas de suministro.

A pesar de que los conceptos asociados a la logística urbana promueven la instalación de plantas de procesamiento y de producción a las periferias de las ciudades, los resultados del presente estudio muestran que la alternativa de localización que tuvo los mejores desempeños tanto económicos como ambientales (no así sociales) es la más cercana al perímetro urbano de la ciudad. Lo anterior, se debe

a que la mayoría de los generadores de LFU en la ciudad de Ibagué se ubican en zonas centrales y la lejanía a estos puntos se traduce en mayores costos de recolección del residuo. Adicionalmente, el mayor impacto sobre el medio ambiente se deriva de los procesos de transporte, por lo cual a mayores distancias mayor afectación sobre el medio ambiente.

Una de las contribuciones de la presenta investigación está asociada con la evaluación del componente social dentro de una cadena de suministro, un factor que ha sido poco estudiado, pero que en los últimos años ha ganado gran interés por parte de la comunidad científica. Así mismo se presentó de manera resumida el funcionamiento de las cadenas de suministro inversas de LFU en algunas partes del mundo, se discuten aciertos, resultados de la implementación y perspectivas de mejora. Precisamente en este proceso se identifica que son escasos los estudios que evalúan el impacto o el desempeño que ha tenido la implementación de programas posconsumo en Colombia. Este es una problemática poco explorada y que ofrece grandes posibilidades para el desarrollo de futuras investigaciones.

Considerando la propuesta para el diseño de la cadena de suministro inversa de LFU del presente documento y con miras a mejorar el modelamiento, es necesario incorporar factores de riesgo dentro del modelo. Estos factores de riesgo pueden ser incorporados utilizando datos de entrada de tipo estocástico o mediante la formulación de múltiples escenarios. El modelo propuesto en este documento permite incorporar un mayor número de tecnologías para implementar en el centro de acopio multipropósito. Esto siempre que se cuente con toda la información asociada al proceso productivo como: rendimiento del proceso, costo de apertura, costos fijos, costos variables de producción, impacto sobre el medio ambiente asociado al proceso productivo (eco indicador 99).

Otro aspecto para considerar en futuras investigación es abordar el diseño de una cadena de suministro inversa multi-producto. El costo de transporte de LFU es más costoso que el de otros residuos debido a su relación peso – volumen. Por lo cual considerar la recuperación de otros residuos permitirían aprovechar el volumen perdido en el transporte de LFU. De igual manera, en el ámbito de la optimización matemática el tamaño del caso de caso de estudio es un factor importante porque da lugar a la utilización de heurísticas para solucionar el problema.

Para aportar a la complejidad del problema se podría considerar decisiones de capacidad dentro del modelo de optimización. Por ejemplo, contemplar aumento en la capacidad en uno de los eslabones de la cadena de suministro en un periodo de tiempo a sumiendo un costo debido al aumento de la capacidad.

7.2 Limitaciones

El desarrollo del presente estudio tuvo como principal limitante el acceso a la información. Mucha de la información requerida para la modelación matemática no estaba disponible para el contexto estudiado, por lo cual se tuvo que recurrir a la literatura especializada en especial los datos relacionados con el impacto ambiental. Adicionalmente, caracterizar los generadores de LFU fue una tarea complicada debido al nivel de informalidad del sector, así mismo en la ciudad no se cuenta con un registro confiable que liste los establecimientos comerciales que pueden llegar a ser generadores de LFU.

7.3 Resultados académicos

- ✓ Participación en congreso internacional:

Congreso Internacional de Industria Organizaciones y Logística 2019
Título del trabajo: "Diseño de una Cadena de suministro inversa para la generación de valor a partir de llantas usadas. Un caso urbano: Ibagué"

- ✓ Participación en congreso nacional:

Congreso Colombiano de Investigación de Operaciones – ASOCIO 2019
Título del trabajo: "Estudio para la localización de centros de acopio de llantas usadas en el contexto urbano, en la ciudad de Ibagué"

- ✓ Proyectos de investigación vinculantes

Título de la investigación: Caracterización de la cadena de recuperación de llantas usadas en Ibagué
Tipo de proyecto: Trabajo de grado – modalidad de investigación
Autores: Jorge Luis Basto Murillo y Jhon Alexander Pérez Gutiérrez
Estado: Terminado

Título de la investigación: Propuesta para la generación de valor a partir de las llantas usadas en Ibagué.
Tipo de proyecto: Trabajo de grado – modalidad de investigación
Autores: Mayra Alejandra Sanmiguel León y Jeraldinne Muñoz Anacona
Estado: Terminado

Título de la investigación: Diseño de una metodología para el ruteo de vehículos en la recolección de llantas usadas en Ibagué.
Tipo de proyecto: Trabajo de grado – modalidad de investigación
Autor: Juan Sebastián Varón Vera
Estado: Terminado

Bibliografía

Abdallah, T., Diabat, A., & Rigter, J. (2013). Investigating the option of installing small scale PVs on facility rooftops in a green supply chain. *International Journal of Production Economics*, *146*(2), 465–477. https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2013.03.016

Abdolazimi, O., Salehi Esfandarani, M., Salehi, M., & Shishebori, D. (2020). Robust design of a multi-objective closed-loop supply chain by integrating on-time delivery, cost, and environmental aspects, case study of a Tire Factory. *Journal of Cleaner Production*, *264*, 121566. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121566

Aliapur. (2019). *L ' ESSENTIEL*. https://www.aliapur.fr/fr/

Amin, S. H., Zhang, G., & Akhtar, P. (2017). Effects of uncertainty on a tire closed-loop supply chain network. *Expert Systems with Applications*, *73*, 82–91. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.12.024

ANLA. (2019). *Inicio*. Sistema de Recolección Selectiva de Llantas Usadas. http://www.anla.gov.co/

ANLA. (2020). *Por la naturaleza*. http://www.anla.gov.co/noticias/469-por-la-naturaleza

ANRE. (2020). *ANRE – ANRE – Asociación Colombiana de Reencauchadores de Llantas y Afines.* https://asociacionanre.org/wp2/

Argos. (2020). *Llantas usadas, el combustible de nuestra planta Rioclaro - Grandes Realidades | ArgosGrandes Realidades | Argos*. http://grandesrealidades.argos.co/llantas-usadas-el-combustible-de-nuestra-planta-rioclaro/

Arroyo López, P., Villanueva Bringas, M., Gaytán Iniestra, J., & García Vargas, M. (2015). Simulación de la tasa de reciclaje de productos electrónicos Un modelo de dinámica de sistemas para la red de logística inversa11Los autores desean expresar su agradecimiento al ingeniero Álvaro Núñez Solís, director de Recicla Electrónicos México por su . *Contaduría y Administración*, *59*(1), 9–41. https://doi.org/10.1016/s0186-1042(14)71242-2

Ayvaz, B., Bolat, B., & Aydın, N. (2015). Stochastic reverse logistics network design for waste of electrical and electronic equipment. *Resources, Conservation and Recycling*, *104*, 391–404. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.07.006

Azapagic, A. (1999). Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation. *Chemical Engineering Journal*, *73*(1), 1–21. https://doi.org/10.1016/S1385-8947(99)00042-X

Ballou, R. H. (2004). *Logística. Administración de la cadena de suministro* (Enrique Quintanar Duarte (Ed.); Quinta). Pearson Educación.

Banguera, L. A., Sepúlveda, J. M., Ternero, R., Vargas, M., & Vásquez, Ó. C. (2018). Reverse logistics network design under extended producer responsibility: The case of out-of-use tires in the Gran Santiago city of Chile. *International Journal of Production Economics*. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.09.006

Barbosa-Póvoa, A. P., da Silva, C., & Carvalho, A. (2018). Opportunities and challenges in sustainable supply chain: An operations research perspective. *European Journal of Operational Research*, *268*(2), 399–431. https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2017.10.036

Basto Murillo, J. L., & Pérez Gutiérrez, J. A. (2019). *Caracterización de la cadena de recuperación de llantas usadas en Ibagué*. Universidad de Ibagué.

Battaïa, O., & Gupta, S. M. (2015). Reverse supply chains: A source of opportunities and challenges. *Journal of Manufacturing Systems*, *37*, 587–588. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.11.005

Beamon, B. M. (1998). Supply chain design and analysis: Models and methods. *International Journal of Production Economics*, *55*(3), 281–294. https://doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00079-6

Beheshtifar, S., & Alimoahmmadi, A. (2015). A multiobjective optimization approach for location-allocation of clinics. *International Transactions in Operational Research*, *22*(2), 313–328.

https://doi.org/10.1111/itor.12088

BID. (n.d.). *Logística urbana | Observatorio Regional de Logística*. Retrieved October 16, 2018, from http://logisticsportal.iadb.org/node/2020

Bloemhof-Ruwaard, J. M., Van Wassenhove, L. N., Gabel, H. L., & Weaver, P. M. (1996). An environmental life cycle optimization model for the European pulp and paper industry. *Omega*, *24*(6), 615–629. https://doi.org/10.1016/S0305-0483(96)00026-6

Bonilla-petriciolet, J. A. F. A. (2014). Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería Desarrollo de un algoritmo de optimización global en colonias de hormigas con selección de región factible para espacios continuos. *Revista Internacional de Mètodos Numèricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, *30*(3), 178–187. https://doi.org/10.1016/j.rimni.2013.06.006

Brandenburg, M., & Seuring, S. (2014). Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions. *European Journal of Operational Research*, *233*(2), 299–312. https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2013.09.032

Braz, A. C., De Mello, A. M., de Vasconcelos Gomes, L. A., & de Souza Nascimento, P. T. (2018). The bullwhip effect in closed-loop supply chains: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, *202*, 376–389. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.042

Briseño, M. A., Rincón, N., & Cataño, J. M. (2018). *Elaboración del estudio de pre factibilidad para el montaje de una empresa productora de diésel sintético a partir de llantas usadas en Bogotá*. Escuela Colombiana De Ingeniería Julio Garavito.

Caddy, I. N., & Helou, M. M. (2007). Supply chains and their management: Application of general systems theory. *Journal of Retailing and Consumer Services*, *14*(5), 319–327. https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2006.12.001

Calderón, P. A. (2018). *Formulación de un plan de negocio para la fabricación de pisos de grano de caucho reciclado, a partir de la recuperación de llantas usadas en la ciudad de Villavicencio.* Universidad Santo Tomás.

Campbell-Johnston, K., Calisto Friant, M., Thapa, K., Lakerveld, D., & Vermeulen, W. J. V. (2020). How circular is your tyre: Experiences with extended producer responsibility from a circular economy perspective. *Journal of Cleaner Production*, *270*, 122042. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122042

Cemex. (2019). *Innovando para un mundo mejor*.

Chen, W., Feng, H., Shen, D., Jia, Y., Li, N., Ying, X., & Chen, T. (2018). *Science of the Total Environment Carbon materials derived from waste tires as high-performance anodes in microbial fuel cells*. *618*, 804–809. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.201

Cheraghalipour, A., Paydar, M. M., & Hajiaghaei-keshteli, M. (2017). An Integrated Approach for Collection Center Selection in Reverse Logistic. *International Journal of Engineering*, *30*(7). https://doi.org/10.5829/ije.2017.30.07a.10

Chopra, S., & Meindl, P. (2008). *Administración de la cadena de suministro* (Quinta). Pearson Educación.

CIMPP. (2018). *Vías y Movilidad – CIMPP*. http://cimpp.ibague.gov.co/vias-y-movilidad/

Cortolima. (2015, June 15). *Alarma en el Guamo por Manejo Inadecuado de Escombros | CORTOLIMA*. https://www.cortolima.gov.co/boletines-prensa/alarma-guamo-manejo-inadecuado-escombros

Cortolima. (2016). *Ibaguereños Cumplieron la Cita con los Elementos Posconsumo | CORTOLIMA*.

Cortolima. (2017). *Llantas, luminarias y periféricos fue la mayor demanda en la 2da jornada de recolección pos consumo | CORTOLIMA*.

Cortolima. (2019a, May 31). *Gracias Tolima, otra jornada posconsumo exitosa | CORTOLIMA*. https://www.cortolima.gov.co/boletines-prensa/gracias-tolima-otra-jornada-posconsumo-exitosa

Cortolima. (2019b, July 19). *Cortolima impone medida de compensatoria por afectaciones de un incendio en Mariquita | CORTOLIMA*. https://www.cortolima.gov.co/boletines-prensa/cortolima-impone-medida-compensatoria-afectaciones-incendio-mariquita

Costa-Salas, Y., Sarache, W., & Überwimmer, M. (2017). Fleet size optimization in the discarded tire collection process. *Research in Transportation Business and Management*, *24*(March), 81–89. https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2017.08.001

CSCMP. (2018). *cscmp.org*. https://cscmp.org/

Cyclus. (2019). *CYCLUS - Tienda en línea*. https://www.cyclus.com.co/

DANE. (2019). *Empleo y desempleo*. https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/mercado-laboral/empleo-y-desempleo

Datta, S. (2012). Multi-criteria multi-facility location in Niwai block, Rajasthan. *IIMB Management Review*, *24*(1), 16–27. https://doi.org/10.1016/J.IIMB.2011.12.003

de Figueiredo, J. N., & Mayerle, S. F. (2008). Designing minimum-cost recycling collection networks with required throughput. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *44*(5), 731–752. https://doi.org/10.1016/j.tre.2007.04.002

Dehghanian, F., & Mansour, S. (2009). Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm. *Resources, Conservation and Recycling*, *53*(10), 559–570. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.04.007

Devika, K., Jafarian, A., & Nourbakhsh, V. (2014). Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: A comparison of metaheuristics hybridization techniques. *European Journal of Operational Research*, *235*(3), 594–615. https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2013.12.032

Duarte, C., Souza, R. De, & Agosto, M. D. A. D. (2013). Resources , Conservation and Recycling Value chain analysis applied to the scrap tire reverse logistics chain : An applied study of co-processing in the cement industry. *"Resources, Conservation & Recycling," 78*, 15–25. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.06.007

Ebrahimi, S. B. (2018). A stochastic multi-objective location-allocation-routing problem for tire supply chain considering sustainability aspects and quantity discounts. *Journal of Cleaner Production*, *198*, 704–720. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.059

Ecology Rubber. (2020). *Inicio*. http://www.ecologyrubber.co/

Ecopneus. (2020). *Newsletter Ecopneus 2020 n°1 - Speciale Cambio Pulito*. https://mailchi.mp/74d8954b8fd2/newsletter-ecopneus-n-8-499883?e=1b730eb3fa

El Colombiano. (2010). *Mundo Limpio, la pionera*. https://www.elcolombiano.com/historico/mundo_limpio_la_pionera-NVEC_99576

El Espectador. (2017). *¿Plata por plástico? ¿Premio al reciclador? | EL ESPECTADOR*. https://www.elespectador.com/opinion/plata-por-plastico-premio-al-reciclador-columna-713973/

El Nuevo Día. (2017, October 9). *Alcalde estaría dispuesto a abrir nuevos cupos para taxis eléctricos | El Nuevo Día*. http://www.elnuevodia.com.co/nuevodia/tolima/ibague/404520-alcalde-estaria-dispuesto-a-abrir-nuevos-cupos-para-taxis-electricos

El Nuevo Día. (2018). *Propietarios de busetas buscan hacerle competencia a Sitsa | El Nuevo Día*. http://www.elnuevodia.com.co/nuevodia/tolima/ibague/421302-propietarios-de-busetas-buscan-hacerle-competencia-a-sitsa

El Tiempo. (2014). *Alerta por llantas quemadas en Bogotá - Archivo Digital de Noticias de Colombia y el Mundo desde 1.990 - eltiempo.com*. https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-14797575

El Tiempo. (2016). *Reciclaje de llantas en Colombia - Archivo Digital de Noticias de Colombia y el Mundo desde 1.990 - eltiempo.com*. El Reciclaje de Llantas, Un Mercado Que Todavía Falta Por Explorar.

https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16732153

El Universal. (2019). *"En 2019 retomaremos la senda de crecimiento": presidente de Cemex | Industria cementera | EL UNIVERSAL - Cartagena | EL UNIVERSAL - Cartagena*. https://www.eluniversal.com.co/economica/en-2019-retomaremos-la-senda-de-crecimiento-presidente-de-cemex-280555-PBEU396548

Envés. (2020). *ENVÉS: Diseño Sostenible*. https://enves.com.co/#

Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J., & Péton, O. (2015). Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review. *Omega*, *54*, 11–32. https://doi.org/10.1016/J.OMEGA.2015.01.006

ETRMA. (2015). *End-of-life Tyre Report 2015*. 36. http://www.etrma.org/library-2

ETRMA. (2018a). *ELT management in Europe*. ELT Management Figures 2016. http://www.etrma.org/tyres/ELTs/ELT-management

ETRMA. (2018b). *Used Tyres/ELT Management in Europe - Volumes Situation 2016*. *1*, 2016. http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/20180502---2016-elt-data_for-press-release.pdf

ETRMA. (2019). *ELT Management figures 2017*. https://www.etrma.org/wp-content/uploads/2019/11/ELT-Management-Figures-2017-vf.xlsx.pdf

Fathollahi-Fard, A. M., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Mirjalili, S. (2018). Hybrid optimizers to solve a tri-level programming model for a tire closed-loop supply chain network design problem. *Applied Soft Computing Journal*, *70*, 701–722. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.06.021

Fourth Assessment Report - Climate Change 2007 - The Physical Science Basis. (2007).

Gamberini, R., Gebennini, E., Manzini, R., & Ziveri, A. (2010). Resources , Conservation and Recycling On the integration of planning and environmental impact assessment for a WEEE transportation network — A case study. *"Resources, Conservation & Recycling,"* *54*(11), 937–951. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.02.001

Georgia Tech. (2017). *The Evolution of SCL | Georgia Tech Supply Chain and Logistics Institute*. https://www.scl.gatech.edu/about/scl/history

Giraldo, M. A., & Gutiérrez, I. D. (2018). *Metodología para la localización de centros de acopio de llantas usadas en el contexto urbano, en la ciudad de Ibagué.* Universidad de Ibagué.

Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., & Van Zelm, R. (2009). *ReCiPe 2008 First edition Report I: Characterisation*.

Goedkoop, M., & Spriensma, R. (2001). *The Eco-indicator 99 A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment Methodology Annex*.

Gracia, W. F. P. (2018). *Aplicación criogénica en el proceso productivo de la destrucción de llantas usadas en Bogotá atendiendo un esquema Green Logistic*. Universidad Militar Nueva Granada.

Group, E. (2020). *Ekogroup*. http://www.ekogroup.co/#

Guide, Jr, V. D. R., & Van Wassenhove, L. N. (2002). The Reverse Supply Chain. *Harvard Business Review*.

Hajiaghaei-keshteli, M., Abdallah, K. S., & Fathollahi-fard, A. M. (2018). *A Collaborative Stochastic Closed-loop Supply Chain Network Design for Tire Industry*. *31*(10), 1715–1722.

Huella Urbana. (2020). *Huella Urbana — Pisos fabricados con caucho de llantas recicladas*. http://www.huellaurbana.com/#proyectos

Islam, T., & Huda, N. (2018). Resources , Conservation & Recycling Reverse logistics and closed-loop supply chain of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)/ E-waste : A comprehensive literature review. *Resources, Conservation & Recycling*, *137*(March), 48–75.

https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.026

ISO 14040. (2006). *ISO 14040:2006 - Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework*.

Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., & Rosenbaum, R. (2003). IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *8*(6), 324–330. https://doi.org/10.1007/BF02978505

Kazancoglu, Y., Kazancoglu, I., & Sagnak, M. (2018). A new holistic conceptual framework for green supply chain management performance assessment based on circular economy. *Journal of Cleaner Production*, *195*, 1282–1299. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.015

Krikke, H., Bloemhof-Ruwaard, J., & Van Wassenhove, L. N. (2003). Concurrent product and closed-loop supply chain design with an application to refrigerators. *International Journal of Production Research*, *41*(16), 3689–3719. https://doi.org/10.1080/0020754031000120087

Kumar, A., Jain, V., & Kumar, S. (2014). A comprehensive environment friendly approach for supplier selection. *Omega*, *42*(1), 109–123. https://doi.org/10.1016/J.OMEGA.2013.04.003

L Guerra, T Murino, & E Romano. (2009). *Recent advances in system science and simulation in engineering : proceedings of the 8th WSEAS International Conference on System Science and Engineering.* WSEAS Press. https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-78149297164&origin=inward&txGid=4e255b16069ff99c84939e85733446ea

Lebreton, B., & Tuma, A. (2006). *A quantitative approach to assessing the profitability of car and truck tire remanufacturing*. *104*, 639–652. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.11.010

Lee, A. H. I., Chen, H. H., & Chen, S. (2015). Suitable organization forms for knowledge management to attain sustainable competitive advantage in the renewable energy industry. *Energy*, *89*, 1057–1064. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.047

Logistec. (2015). *"Logística Urbana: Realidades y tendencias"*. Revista Logistec Supply Chain Management y Más. http://www.revistalogistec.com/index.php/logistica/global/item/455-logistica-urbana-realidades-y-tendencias

Machin, E. B., Pedroso, D. T., & de Carvalho, J. A. (2017). Energetic valorization of waste tires. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *68*(September 2016), 306–315. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.110

MADS. (2017). *"Productores y comercializadores de llantas en el país deberán tener un Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas": Minambiente | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/3055-productores-y-comercializadores-de-llantas-en-el-pais-deberan-tener-un-sistema-de-recoleccion-selectiva-y-gestion-ambiental-de-llantas-usadas-minambiente

Messmann, L., Zender, V., Thorenz, A., & Tuma, A. (2020). How to quantify social impacts in strategic supply chain optimization: State of the art. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 257). https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120459

Mota, B., Gomes, M. I., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2013). Towards supply chain sustainability: Balancing costs with environmental and social impacts. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 32, pp. 895–900). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63234-0.50150-0

Mumtaz, U., Ali, Y., Petrillo, A., & Felice, F. De. (2018). Science of the Total Environment Identifying the critical factors of green supply chain management : Environmental bene fi ts in Pakistan. *Science of the Total Environment*, *640–641*, 144–152. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.231

Newbert, S. L. (2007). Empirical research on the resource-based view of the firm: an assessment and suggestions for future research. *Strategic Management Journal*, *28*(2), 121–146. https://doi.org/10.1002/smj.573

Ottoni, M., Dias, P., & Xavier, L. H. (2020). A circular approach to the e-waste valorization through urban mining in Rio de Janeiro, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, *261*, 120990. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120990

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

Pedram, A., Yusoff, N. Bin, Udoncy, O. E., Mahat, A. B., Pedram, P., Babalola, A., Yadollahinia, M., Teimoury, E., & Paydar, M. M. (2017). Integrated forward and reverse supply chain: A tire case study. *Waste Management*, *60*(July), 215–228. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.018

Pieragostini, C., Mussati, M. C., & Aguirre, P. (2012). On process optimization considering LCA methodology. *Journal of Environmental Management*, *96*(1), 43–54. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2011.10.014

Portafolio. (2013). *Se desinfla Michelin en el país: cierra Icollantas | Empresas | Negocios | Portafolio*. https://www.portafolio.co/negocios/empresas/desinfla-michelin-pais-cierra-icollantas-87336

Prahinski, C., & Kocabasoglu, C. (2006). Empirical research opportunities in reverse supply chains. *Omega*, *34*(6), 519–532. https://doi.org/10.1016/j.omega.2005.01.003

Rahman, S., & Subramanian, N. (2012). Factors for implementing end-of-life computer recycling operations in reverse supply chains. *International Journal of Production Economics*, *140*(1), 239–248. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.07.019

Ramarad, S., Khalid, M., Ratnam, C. T., Chuah, A. L., & Rashmi, W. (2015). Waste tire rubber in polymer blends: A review on the evolution, properties and future. *Progress in Materials Science*, *72*, 100–140. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.02.004

REPAK ELT. (2019). *Review of year 1 of operation of compliance scheme for tyres*.

REPAK ELT. (2020). *ANNUAL REPORT 2019*.

Roger, D., & Tibben-Lembke, R. (1998). Going Backwards : Reverse Logistics Trends and Practices Going Backwards : Reverse Logistics Trends and Practices. *Reverse Logistics Executive Council Press*, 2. https://doi.org/10.1006/jema.2001.0488

Rueda Verde. (2019). *RuedaVerde - Reciclaje de Llantas*. https://www.ruedaverde.com.co/

Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, *48*(1), 9–26. https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I

Sahebjamnia, N., Fathollahi-Fard, A. M., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2018). Sustainable tire closed-loop supply chain network design: Hybrid metaheuristic algorithms for large-scale networks. *Journal of Cleaner Production*, *196*, 273–296. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.245

Sanmiguel León, M. A., & Anacona Muñoz, J. (2019). *Propuesta para la generación de valor a partir de las llantas usadas en Ibagué.* Universidad de Ibagué.

Saxena, L. K., Jain, P. K., & Sharma, A. K. (2018). A fuzzy goal programme with carbon tax policy for Brownfield Tyre remanufacturing strategic supply chain planning. *Journal of Cleaner Production*, *198*, 737–753. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.005

Schultmann, F., Engels, B., & Rentz, O. (2003). Closed-Loop Supply Chains for Spent Batteries. *Interfaces*, *33*(6), 57–71. https://doi.org/10.1287/inte.33.6.57.25183

Sebola, M. R., Mativenga, P. T., & Pretorius, J. (2018). A Benchmark Study of Waste Tyre Recycling in South Africa to European Union Practice. *Procedia CIRP*, *69*(May), 950–955. https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.137

Seuring, S. (2013). A review of modeling approaches for sustainable supply chain management. *Decision Support Systems*, *54*(4), 1513–1520. https://doi.org/10.1016/J.DSS.2012.05.053

Shaharudin, M. R., Govindan, K., Zailani, S., Tan, K. C., & Iranmanesh, M. (2017). Product return management: Linking product returns, closed-loop supply chain activities and the effectiveness of the reverse supply chains. *Journal of Cleaner Production*, *149*, 1144–1156. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.133

Shokohyar, S., Mansour, S., & Karimi, B. (2013). Simulation-based optimization of ecological leasing: a step toward extended producer responsibility (EPR). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *66*(1–4), 159–169. https://doi.org/10.1007/s00170-012-4315-9

Shu, X., & Huang, B. (2014). Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. *Construction and Building Materials*, *67*(PART B), 217–224. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.027

Sienkiewicz, M., Kucinska-Lipka, J., Janik, H., & Balas, A. (2012). Progress in used tyres management in the European Union: A review. *Waste Management*, *32*(10), 1742–1751. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.05.010

Siew, K., & Mohamed, Z. (2013). Resources , Conservation and Recycling Reverse logistics in Malaysia : Investigating the effect of green product design and resource commitment. *"Resources, Conservation & Recycling," 81*, 71–80. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.08.005

SIGNUS. (2019). *SIGNUS Adapta la estructura de sus tarifas 2020 - SIGNUS*. https://www.signus.es/signus-adapta-la-estructura-tarifas-2020/

Simic, V., & Dabic-Ostojic, S. (2016). Interval-parameter chance-constrained programming model for uncertainty-based decision making in tire retreading industry. *Journal of Cleaner Production*, *167*, 1490–1498. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.122

Singh, V., Dincer, I., & Rosen, M. A. (2018). Life Cycle Assessment of Ammonia Production Methods. In *Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions* (pp. 935–959). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813734-5.00053-6

Stindt, D. (2017). A generic planning approach for sustainable supply chain management - How to integrate concepts and methods to address the issues of sustainability? *Journal of Cleaner Production*, *153*, 146–163. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.126

Suárez, O. de A. (2012). *Una aproximación a la heuristica y metaheuristicas* (pp. 44–50). http://www.academia.edu/28600218/Heuristica_y_metaheuristica

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. In *Applied Mathematical Modelling* (Vol. 39, Issue 9). https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.11.004

Thomas, B. S., & Gupta, R. C. (2016). A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *54*, 1323–1333. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.092

TRANSGESA. (2016). *Logística Urbana, reto para el presente | Transgesa*. https://www.transgesa.com/blog/logistica-urbana-reto/

Uruburu, Á., Ponce-Cueto, E., Cobo-Benita, J. R., & Ordieres-Meré, J. (2013). The new challenges of end-of-life tyres management systems: A Spanish case study. *Waste Management*, *33*(3), 679–688. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.006

USTMA. (2018). *Scrap Tire Markets | U.S. Tire Manufacturers Association*. https://www.ustires.org/scrap-tire-markets

Valorpneu. (2018). *Modelo Operacional e Financeiro – ValorPneu*. https://www.valorpneu.pt/sistema-sgpu/modelo-operacional-e-financeiro/

Valorpneu. (2019). *Tabela de Ecovalor – ValorPneu*. https://www.valorpneu.pt/tabela-de-ecovalor/

Vitasek, K. (2013). Supply chain management: Terms and Glossary. *Healthcare Informatics : The Business Magazine for Information and Communication Systems*, *17*(2), 58–60. https://doi.org/10.1201/9781420025705.ch2

Xu, Z., Elomri, A., Pokharel, S., Zhang, Q., Ming, X. G., & Liu, W. (2017). Global reverse supply chain design for solid waste recycling under uncertainties and carbon emission constraint. *Waste Management*, *64*, 358–370. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.024

Yadollahinia, M., Teimoury, E., & Paydar, M. M. (2018). Tire forward and reverse supply chain design considering customer relationship management. *Resources, Conservation and Recycling*, *138*(July), 215–228. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.018

Anexos

Anexo 3 Instrumento aplicado a conductores en la ciudad de Ibagué

La siguiente encuesta está dirigida a personas que son poseedores o manejan vehículos en Ibagué y transitan diariamente por las calles y avenidas de esta ciudad. Se hace con el fin, de conocer el tiempo aproximado de desgaste de las llantas según el tipo de vehículo y su uso.

Nombre del encuestado: _____

Celular del encuestado: _____

1. **¿Es usted?**

Propietario: ____ Conductor: ___

2. **¿Servicio que presta el vehículo?**

Publico: ____ Particular: ____

3. **¿Qué tipo de vehículo es?**

Automóvil ___ Taxi: ___ Buses___ Busetas Camiones___ Camionetas____ Camperos____ Cuatrimotos___ Microbuses___ Motocarros___ Motocicletas___ tractocamiones___ Volquetas___

4. **¿Tiene usted una marca de llantas de preferencia?**

Si: ____ No: ____

Cuales: _____

5. **¿Podría describir las dimensiones de sus llantas?**

Ancho (P): _____ /Perfil: _____ / (R) Rin: ____



6. **¿Cuántas llantas tiene su vehículo?**

2__ 4__ 6__ 8__ 10__

7. **¿Cuál es el tiempo aproximado que duran las llantas de su vehículo?**

Llantas de adelante: Llantas de Atrás:

Meses: ___ Días: ___ años: ___ Meses: ____ Días: ___ años: __

Anexo 4 Metodología AHP

Respuestas experto 1

Matriz de comparación de criterios			
	Económico	Ambiental	Social
Económico	1,00	3,00	4,00
Ambiental	0,33	1,00	2,00
Social	0,25	0,50	1,00
Total	1,58	4,50	7,00

Matriz de comparación de sub-criterios			
Sub-criterios	Generación de empleo	Seguridad laboral	Desarrollo Local
Generación de empleo	1,00	4,00	1,00
Seguridad laboral	0,25	1,00	0,33
Desarrollo Local	1,00	3,00	1,00
Total	2,25	8,00	2,33

Matriz de comparación de alternativas (sub-criterio Seguridad laboral)								
Seguridad laboral	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
T1	1,00	2,00	6,00	7,00	4,00	5,00	3,00	4,00
T2	0,50	1,00	3,00	3,00	4,00	4,00	2,00	2,00
T3	0,17	0,33	1,00	1,00	0,33	0,33	0,25	0,25
T4	0,14	0,33	1,00	1,00	0,33	0,33	0,50	0,50
T5	0,25	0,25	3,00	3,00	1,00	2,00	0,50	0,50
T6	0,20	0,25	3,00	3,00	0,50	1,00	0,50	0,50
T7	0,33	0,50	4,00	2,00	2,00	2,00	1,00	2,00
T8	0,25	0,25	4,00	2,00	2,00	2,00	0,50	1,00
Total	2,84	4,92	25,00	22,00	14,17	16,67	8,25	10,75

Matriz de comparación de alternativas (sub-criterio Desarrollo Local)				
Desarrollo Local	U1	U2	U3	U4
U1	1,00	0,50	0,33	1,00
U2	2,00	1,00	1,00	3,00
U3	3,00	1,00	1,00	1,00
U4	1,00	0,33	1,00	1,00
Total	7,00	2,83	3,33	6,00

Resultados experto 1

Matriz de criterios normalizada						
	Económico	Ambiental	Social	Total	Prioridad	CR
Económico	0,63	0,67	0,57	1,87	62,3%	3,03
Ambiental	0,21	0,22	0,29	0,72	23,9%	3,01
Social	0,16	0,11	0,14	0,41	13,7%	3,01
Total	1,00	1,00	1,00		CI=	0,01
					RI=	0,58
					CR=	1,58%

Matriz de comparación de sub-criterios normalizada						
Sub-criterios	Generación de empleo	Seguridad laboral	Desarrollo Local	Total	Prioridad	CR
Generación de empleo	0,44	0,50	0,43	1,37	45,77%	3,01
Seguridad laboral	0,11	0,13	0,14	0,38	12,63%	3,00
Desarrollo Local	0,44	0,38	0,43	1,25	41,60%	3,01
Total	1,00	1,00	1,00		CI=	0,00
					RI=	0,58
					CR=	0,79%

Matriz Comparación de alternativas (sub-criterio Seguridad laboral) normalizada											
Seguridad laboral	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	Total	Prioridad	CM
T1	0,35	0,41	0,24	0,32	0,28	0,30	0,36	0,37	2,63	32,94%	8,40
T2	0,18	0,20	0,12	0,14	0,28	0,24	0,24	0,19	1,59	19,83%	8,62
T3	0,06	0,07	0,04	0,05	0,02	0,02	0,03	0,02	0,31	3,86%	8,14
T4	0,05	0,07	0,04	0,05	0,02	0,02	0,06	0,05	0,35	4,43%	8,23
T5	0,09	0,05	0,12	0,14	0,07	0,12	0,06	0,05	0,69	8,66%	8,40
T6	0,07	0,05	0,12	0,14	0,04	0,06	0,06	0,05	0,58	7,25%	8,21
T7	0,12	0,10	0,16	0,09	0,14	0,12	0,12	0,19	1,04	12,98%	8,48
T8	0,09	0,05	0,16	0,09	0,14	0,12	0,06	0,09	0,80	10,06%	8,54
Total	0,79	0,85	0,68	0,82	0,72	0,76	0,82	0,72		CI	0,05
										RI	1,41
										CR=	3,83%

Matriz comparación de alternativas (sub-criterio Desarrollo Local) normalizada							
	U1	U2	U3	U4	Total	Prioridad	CM
U1	0,14	0,18	0,10	0,17	0,59	14,65%	4,18
U2	0,29	0,35	0,30	0,50	1,44	35,97%	4,20
U3	0,43	0,35	0,30	0,17	1,25	31,20%	4,14
U4	0,14	0,12	0,30	0,17	0,73	18,18%	4,18
Total	1,00	1,00	1,00	1,00		CI	0,06
						RI	0,9
						CR=	6,50%

Respuestas experto 2

Matriz de comparación de criterios			
	Económico	Ambiental	Social
Económico	1,00	2,00	3,00
Ambiental	0,50	1,00	3,00
Social	0,33	0,33	1,00
Total	1,83	3,33	7,00

Matriz de comparación de sub-criterios			
Sub-criterios	Generación de empleo	Seguridad laboral	Desarrollo Local
Generación de empleo	1,00	5,00	2,00
Seguridad laboral	0,20	1,00	0,50
Desarrollo Local	0,50	2,00	1,00
Total	1,70	8,00	3,50

Matriz de comparación de alternativas (sub-criterio Seguridad laboral)								
Seguridad laboral	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
T1	1,00	3,00	3,00	9,00	2,00	2,00	2,00	2,00
T2	0,33	1,00	6,00	5,00	1,00	2,00	1,00	2,00
T3	0,33	0,17	1,00	3,00	0,20	0,17	0,17	0,17
T4	0,11	0,20	0,33	1,00	0,17	0,17	0,17	0,17
T5	0,50	1,00	5,00	6,00	1,00	1,00	2,00	2,00
T6	0,50	0,50	6,00	6,00	1,00	1,00	0,33	0,50
T7	0,50	1,00	6,00	6,00	0,50	3,00	1,00	0,33
T8	0,50	0,50	6,00	6,00	0,50	2,00	3,00	1,00
Total	3,78	7,37	33,33	42,00	6,37	11,33	9,67	8,17

Matriz de comparación de alternativas (sub-criterio Desarrollo Local)				
Desarrollo Local	U1	U2	U3	U4
U1	1,00	0,33	1,00	0,50
U2	3,00	1,00	4,00	3,00
U3	1,00	0,25	1,00	0,25
U4	2,00	0,33	4,00	1,00
Total	7,00	1,92	10,00	4,75

Resultados experto 2

Matriz de criterios normalizada						
	Económico	Ambiental	Social	Total	Prioridad	CR
Económico	0,55	0,60	0,43	1,57	52,5%	3,08
Ambiental	0,27	0,30	0,43	1,00	33,4%	3,06
Social	0,18	0,10	0,14	0,42	14,2%	3,02
Total	1,00	1,00	1,00		CI=	0,03
					RI=	0,58
					CR=	4,64%

Matriz de comparación de sub-criterios normalizada						
Sub-criterios	Generación de empleo	Seguridad laboral	Desarrollo Local	Total	Prioridad	CR
Generación de empleo	0,59	0,63	0,57	1,78	59,49%	3,01
Seguridad laboral	0,12	0,13	0,14	0,39	12,85%	3,00
Desarrollo Local	0,29	0,25	0,29	0,83	27,66%	3,00
Total	1,00	1,00	1,00		CI=	0,00
					RI=	0,58
					CR=	0,48%

Matriz Comparación de alternativas (sub-criterio Seguridad laboral) normalizada											
Seguridad laboral	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	Total	Prioridad	CM
T1	0,26	0,41	0,09	0,21	0,31	0,18	0,21	0,24	1,92	23,98%	8,74
T2	0,09	0,14	0,18	0,12	0,16	0,18	0,10	0,24	1,20	15,06%	9,09
T3	0,09	0,02	0,03	0,07	0,03	0,01	0,02	0,02	0,30	3,70%	8,18
T4	0,03	0,03	0,01	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,17	2,11%	8,63
T5	0,13	0,14	0,15	0,14	0,16	0,09	0,21	0,24	1,26	15,73%	9,03
T6	0,13	0,07	0,18	0,14	0,16	0,09	0,03	0,06	0,86	10,80%	8,61
T7	0,13	0,14	0,18	0,14	0,08	0,26	0,10	0,04	1,08	13,48%	8,95
T8	0,13	0,07	0,18	0,14	0,08	0,18	0,31	0,12	1,21	15,14%	9,21
Total	0,74	0,80	0,64	0,71	0,84	0,56	0,59	0,84		CI	0,11
										RI	1,41
										CR=	8,15%

Matriz comparación de alternativas (sub-criterio Desarrollo Local) normalizada							
	U1	U2	U3	U4	Total	Prioridad	CM
U1	0,14	0,17	0,10	0,11	0,52	13,05%	4,11
U2	0,43	0,52	0,40	0,63	1,98	49,55%	4,27
U3	0,14	0,13	0,10	0,05	0,43	10,65%	4,02
U4	0,29	0,17	0,40	0,21	1,07	26,75%	4,18
Total	1,00	1,00	1,00	1,00		CI	0,05
						RI	0,9
						CR=	5,35%

Respuestas experto 3

Matriz de comparación de criterios			
	Económico	Ambiental	Social
Económico	1,00	3,00	3,00
Ambiental	0,33	1,00	1,00
Social	0,33	1,00	1,00
Total	1,67	5,00	5,00

Matriz de comparación de sub-criterios			
Sub-criterios	Generación de empleo	Seguridad laboral	Desarrollo Local
Generación de empleo	1,00	4,00	0,50
Seguridad laboral	0,25	1,00	0,33
Desarrollo Local	2,00	3,00	1,00
Total	3,25	8,00	1,83

Matriz de comparación de alternativas (sub-criterio Seguridad laboral)								
Seguridad laboral	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
T1	1,00	1,00	8,00	8,00	4,00	4,00	4,00	4,00
T2	1,00	1,00	7,00	8,00	3,00	3,00	2,00	2,00
T3	0,13	0,14	1,00	2,00	0,17	0,17	0,20	0,14
T4	0,13	0,13	0,50	1,00	0,17	0,17	0,13	0,13
T5	0,25	0,33	6,00	6,00	1,00	3,00	0,25	0,20
T6	0,25	0,33	6,00	6,00	0,33	1,00	0,33	0,25
T7	0,25	0,50	5,00	8,00	4,00	3,00	1,00	1,00
T8	0,25	0,25	7,00	8,00	5,00	4,00	1,00	1,00
Total	3,25	3,68	40,50	47,00	17,67	18,33	8,91	8,72

Matriz de comparación de alternativas (sub-criterio Desarrollo Local)				
Desarrollo Local	U1	U2	U3	U4
U1	1,00	3,00	5,00	2,00
U2	0,33	1,00	2,00	0,25
U3	0,20	0,50	1,00	0,14
U4	0,50	4,00	7,00	1,00
Total	2,03	8,50	15,00	3,39

Resultados experto 3

Matriz de criterios normalizada						
	Económico	Ambiental	Social	Total	Prioridad	CR
Económico	0,60	0,60	0,60	1,80	60,0%	3,00
Ambiental	0,20	0,20	0,20	0,60	20,0%	3,00
Social	0,20	0,20	0,20	0,60	20,0%	3,00
Total	1,00	1,00	1,00		CI=	0,00
					RI=	0,58
					CR=	0,00%

Matriz de comparación de sub-criterios normalizada						
Sub-criterios	Generación de empleo	Seguridad laboral	Desarrollo Local	Total	Prioridad	CR
Generación de empleo	0,31	0,50	0,27	1,08	36,01%	3,13
Riesgos laborales	0,08	0,13	0,18	0,38	12,79%	3,04
Desarrollo Local	0,62	0,38	0,55	1,54	51,19%	3,16
Total	1,00	1,00	1,00		CI=	0,05
					RI=	0,58
					CR=	9,37%

Matriz Comparación de alternativas (sub-criterio Seguridad laboral) normalizada											
Seguridad laboral	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	Total	Prioridad	CM
T1	0,31	0,27	0,20	0,17	0,23	0,22	0,45	0,46	2,30	28,74%	9,30
T2	0,31	0,27	0,17	0,17	0,17	0,16	0,22	0,23	1,71	21,37%	8,90
T3	0,04	0,04	0,02	0,04	0,01	0,01	0,02	0,02	0,20	2,52%	8,19
T4	0,04	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,15	1,91%	8,26
T5	0,08	0,09	0,15	0,13	0,06	0,16	0,03	0,02	0,71	8,93%	8,76
T6	0,08	0,09	0,15	0,13	0,02	0,05	0,04	0,03	0,58	7,28%	8,19
T7	0,08	0,14	0,12	0,17	0,23	0,16	0,11	0,11	1,12	14,04%	9,44
T8	0,08	0,07	0,17	0,17	0,28	0,22	0,11	0,11	1,22	15,20%	9,77
Total	0,85	0,80	0,70	0,66	0,49	0,62	0,78	0,77		CI	0,12
										RI	1,41
										CR=	8,65%

Matriz comparación de alternativas (sub-criterio Desarrollo Local) normalizada							
	U1	U2	U3	U4	Total	Prioridad	CM
U1	0,49	0,35	0,33	0,59	1,77	44,19%	4,25
U2	0,16	0,12	0,13	0,07	0,49	12,21%	4,05
U3	0,10	0,06	0,07	0,04	0,27	6,65%	4,04
U4	0,25	0,47	0,47	0,29	1,48	36,95%	4,18
Total	1,00	1,00	1,00	1,00		CI	0,04
						RI	0,9
						CR=	4,87%

Respuestas experto 4

Matriz de comparación de criterios			
	Económico	Ambiental	Social
Económico	1,00	3,00	5,00
Ambiental	0,33	1,00	3,00
Social	0,20	0,33	1,00
Total	1,53	4,33	9,00

Matriz de comparación de sub-criterios			
Sub-criterios	Generación de empleo	Seguridad laboral	Desarrollo Local
Generación de empleo	1,00	5,00	0,50
Seguridad laboral	0,20	1,00	0,20
Desarrollo Local	2,00	5,00	1,00
Total	3,20	11,00	1,70

Matriz de comparación de alternativas (sub-criterio Seguridad laboral)								
Seguridad laboral	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
T1	1,00	0,25	3,00	1,00	2,00	1,00	2,00	0,50
T2	4,00	1,00	9,00	2,00	7,00	3,00	6,00	3,00
T3	0,33	0,11	1,00	0,50	0,33	0,33	0,25	0,25
T4	1,00	0,50	2,00	1,00	2,00	1,00	1,00	0,50
T5	0,50	0,14	3,00	0,50	1,00	0,33	0,33	0,25
T6	1,00	0,33	3,00	1,00	3,00	1,00	4,00	1,00
T7	0,50	0,17	4,00	1,00	3,00	0,25	1,00	1,00
T8	2,00	2,00	4,00	2,00	4,00	1,00	1,00	1,00
Total	10,33	4,50	29,00	9,00	22,33	7,92	15,58	7,50

Matriz de comparación de alternativas (sub-criterio Desarrollo Local)				
Desarrollo Local	U1	U2	U3	U4
U1	1,00	6,00	5,00	0,50
U2	0,17	1,00	2,00	0,25
U3	0,20	0,50	1,00	0,25
U4	2,00	4,00	4,00	1,00
Total	3,37	11,50	12,00	2,00

Resultados experto 4

Matriz de criterios normalizada						
	Económico	Ambiental	Social	Total	Prioridad	CR
Económico	0,65	0,69	0,56	1,90	63,3%	3,07
Ambiental	0,22	0,23	0,33	0,78	26,0%	3,03
Social	0,13	0,08	0,11	0,32	10,6%	3,01
Total	1,00	1,00	1,00		CI=	0,02
					RI=	0,58
					CR=	3,34%

Matriz de comparación de sub-criterios normalizada						
Sub-criterios	Generación de empleo	Seguridad laboral	Desarrollo Local	Total	Prioridad	CR
Generación de empleo	0,31	0,45	0,29	1,06	35,37%	3,06
Seguridad laboral	0,06	0,09	0,12	0,27	9,04%	3,01
Desarrollo Local	0,63	0,45	0,59	1,67	55,59%	3,09
Total	1,00	1,00	1,00		CI=	0,03
					RI=	0,58
					CR=	4,65%

Matriz Comparación de alternativas (sub-criterio Seguridad laboral) normalizada											
Seguridad laboral	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	Total	Prioridad	CM
T1	0,10	0,06	0,10	0,11	0,09	0,13	0,13	0,07	0,78	9,72%	8,83
T2	0,39	0,22	0,31	0,22	0,31	0,38	0,39	0,40	2,62	32,74%	9,14
T3	0,03	0,02	0,03	0,06	0,01	0,04	0,02	0,03	0,25	3,17%	8,65
T4	0,10	0,11	0,07	0,11	0,09	0,13	0,06	0,07	0,73	9,18%	8,95
T5	0,05	0,03	0,10	0,06	0,04	0,04	0,02	0,03	0,38	4,76%	8,47
T6	0,10	0,07	0,10	0,11	0,13	0,13	0,26	0,13	1,04	12,95%	9,28
T7	0,05	0,04	0,14	0,11	0,13	0,03	0,06	0,13	0,70	8,72%	8,85
T8	0,19	0,44	0,14	0,22	0,18	0,13	0,06	0,13	1,50	18,76%	9,35
Total	0,76	0,52	0,72	0,67	0,69	0,84	0,87	0,73		CI	0,13
										RI	1,41
										CR=	9,53%

Matriz comparación de alternativas (sub-criterio Desarrollo Local) normalizada							
	U1	U2	U3	U4	Total	Prioridad	CM
U1	0,30	0,52	0,42	0,25	1,49	37,14%	4,37
U2	0,05	0,09	0,17	0,13	0,43	10,70%	4,07
U3	0,06	0,04	0,08	0,13	0,31	7,78%	4,07
U4	0,59	0,35	0,33	0,50	1,78	44,38%	4,34
Total	1,00	1,00	1,00	1,00		CI	0,07
						RI	0,9
						CR=	7,88%

Respuestas sintetizadas

Matriz de comparación de criterios			
Criterios	Económico	Ambiental	Social
Económico	1,00	2,71	3,66
Ambiental	0,37	1,00	2,06
Social	0,27	0,49	1,00
Total	1,64	4,20	6,72

Matriz de comparación de sub-criterios			
Sub-criterios	Generación de empleo	Seguridad laboral	Desarrollo Local
Generación de empleo	1,00	4,47	0,84
Seguridad laboral	0,22	1,00	0,32
Desarrollo Local	1,19	3,08	1,00
Total	2,41	8,55	2,17

Matriz de comparación de alternativas (sub-criterio Seguridad laboral)								
Seguridad laboral	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
T1	1,00	1,11	4,56	4,74	2,83	2,51	2,63	2,00
T2	0,90	1,00	5,80	3,94	3,03	2,91	2,21	2,21
T3	0,22	0,17	1,00	1,32	0,25	0,24	0,21	0,20
T4	0,21	0,25	0,76	1,00	0,37	0,31	0,32	0,27
T5	0,35	0,33	4,05	2,71	1,00	1,19	0,54	0,47
T6	0,40	0,34	4,24	3,22	0,84	1,00	0,69	0,50
T7	0,38	0,45	4,68	3,13	1,86	1,46	1,00	0,90
T8	0,50	0,50	5,09	3,72	2,11	2,00	1,11	1,00
Total	3,97	4,16	30,19	23,78	12,29	11,62	8,71	7,55

Matriz de comparación de alternativas (sub-criterio Desarrollo Local)				
Desarrollo Local	U1	U2	U3	U4
U1	1,00	1,32	1,70	0,84
U2	0,76	1,00	2,00	0,87
U3	0,59	0,50	1,00	0,31
U4	1,19	1,15	3,25	1,00
Total	4,28	4,80	8,80	3,73

Comparación de alternativas (sub-criterio Generación de empleo)								
Generación de empleo	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
T1	1,00	0,80	0,53	0,47	0,73	0,62	0,73	0,62
T2	1,25	1,00	0,67	0,59	0,91	0,77	0,91	0,77
T3	1,88	1,50	1,00	0,88	1,36	1,15	1,36	1,15
T4	2,13	1,70	1,13	1,00	1,55	1,31	1,55	1,31
T5	1,38	1,10	0,73	0,65	1,00	0,85	1,00	0,85
T6	1,63	1,30	0,87	0,76	1,18	1,00	1,18	1,00
T7	1,38	1,10	0,73	0,65	1,00	0,85	1,00	0,85
T8	1,63	1,30	0,87	0,76	1,18	1,00	1,18	1,00
Total	12,25	9,80	6,53	5,76	8,91	7,54	8,91	7,54

Respuestas sintetizadas

Matriz de criterios normalizada						
Desempeño	Económico	Ambiental	Social	Total	Prioridad	CR
Económico	0,61	0,65	0,54	1,80	60,0%	3,04
Ambiental	0,22	0,24	0,31	0,77	25,6%	3,02
Social	0,17	0,12	0,15	0,43	14,4%	3,01
Total	1,00	1,00	1,00		CI=	0,01
					RI=	0,58
					CR=	1,71%

Matriz de comparación de sub-criterios normalizada						
	Generación de empleo	Seguridad laboral	Desarrollo Local	Total	Prioridad	CR
Generación de empleo	0,41	0,52	0,39	1,33	44,19%	3,05
Seguridad laboral	0,09	0,12	0,15	0,36	11,98%	3,01
Desarrollo Local	0,49	0,36	0,46	1,31	43,83%	3,04
Total	1,00	1,00	1,00		CI=	0,02
					RI=	0,58
					CR=	2,87%

Matriz Comparación de alternativas (sub-criterio Seguridad laboral) normalizada											
Seguridad laboral	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	Total	Prioridad	CM
T1	0,25	0,27	0,15	0,20	0,23	0,22	0,30	0,26	1,88	23,53%	8,30
T2	0,23	0,24	0,19	0,17	0,25	0,25	0,25	0,29	1,87	23,38%	8,35
T3	0,06	0,04	0,03	0,06	0,02	0,02	0,02	0,03	0,28	3,45%	8,05
T4	0,05	0,06	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,31	3,88%	8,15
T5	0,09	0,08	0,13	0,11	0,08	0,10	0,06	0,06	0,72	9,06%	8,23
T6	0,10	0,08	0,14	0,14	0,07	0,09	0,08	0,07	0,76	9,48%	8,18
T7	0,10	0,11	0,16	0,13	0,15	0,13	0,11	0,12	1,00	12,53%	8,32
T8	0,13	0,12	0,17	0,16	0,17	0,17	0,13	0,13	1,18	14,69%	8,32
Total	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		CI	0,03
										RI	1,41
										CR=	2,42%

Matriz comparación de alternativas (sub-criterio Desarrollo Local) normalizada							
	U1	U2	U3	U4	Total	Prioridad	CM
U1	0,23	0,27	0,19	0,23	0,93	23,16%	4,05
U2	0,18	0,21	0,23	0,23	0,85	21,13%	4,05
U3	0,14	0,10	0,11	0,08	0,44	10,94%	4,02
U4	0,28	0,24	0,37	0,27	1,16	28,91%	4,03
Total	0,83	0,83	0,90	0,81		CI	0,01
						RI	0,9
						CR=	1,46%

Matriz de comparación de alternativas (sub-criterio Generación de empleo) normalizada											
Generación de empleo	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	Total	Prioridad	CM
T1	0,25	0,19	0,02	0,02	0,06	0,05	0,08	0,08	0,76	9,49%	8,00
T2	0,32	0,24	0,02	0,02	0,07	0,07	0,10	0,10	0,95	11,86%	8,00
T3	0,47	0,36	0,03	0,04	0,11	0,10	0,16	0,15	1,42	17,79%	8,00
T4	0,54	0,41	0,04	0,04	0,13	0,11	0,18	0,17	1,61	20,16%	8,00
T5	0,35	0,26	0,02	0,03	0,08	0,07	0,11	0,11	1,04	13,05%	8,00
T6	0,41	0,31	0,03	0,03	0,10	0,09	0,14	0,13	1,23	15,42%	8,00
T7	0,35	0,26	0,02	0,03	0,08	0,07	0,11	0,11	1,04	13,05%	8,00
T8	0,41	0,31	0,03	0,03	0,10	0,09	0,14	0,13	1,23	15,42%	8,00
Total	3,09	2,36	0,22	0,24	0,73	0,65	1,02	1,00		CI	0,00
										RI	1,41