



DECANATURA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
FORMATO DE ENTREGA TRABAJO DE GRADO

Fecha de entrega: 12 de Diciembre de 2018

Estudiante: Cristina Ramírez Meneses

Director: Joan Paola Cruz

Codirector: Enrique Romero Motta

El presente documento avala la entrega del trabajo de grado por parte del director y codirector.

Documentos anexos Copia digital del Trabajo de Grado (1)

Firma Director

Firma Codirector

Firma Estudiante

Identificación de las barreras de entrada de PyMEs a una red logística inversa de llantas usadas en la ciudad de Bogotá D.C. desde un enfoque de dinámica de sistemas

Autor

Cristina Ramírez Meneses

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Decanatura de Ingeniería Industrial

Maestría en Ingeniería Industrial

Bogotá D.C., Colombia

2018

Identificación de las barreras de entrada de PyMEs a una red logística inversa de llantas usadas en la ciudad de Bogotá D.C. desde un enfoque de dinámica de sistemas

Autor

Cristina Ramírez Meneses

Trabajo de grado para optar al título de
Magíster en Ingeniería Industrial

Director

Joan Paola Cruz González

Ingeniera Industrial, M.Sc.

Co-Director

Enrique Romero Motta

Ingeniero Industrial, M.Sc.

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Decanatura de Ingeniería Industrial

Maestría en Ingeniería Industrial

Bogotá D.C., Colombia

2018

© Únicamente se puede usar el contenido de las publicaciones para propósitos de información. No se debe copiar, enviar, recortar, transmitir o redistribuir este material para propósitos comerciales sin la autorización de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Cuando se use el material de la Escuela se debe incluir la siguiente nota “Derechos reservados a Escuela Colombiana de Ingeniería” en cualquier copia en un lugar visible. Y el material no se debe notificar sin el permiso de la Escuela.

Publicado en 2019 por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Avenida 13 No 205-59 Bogotá. Colombia

TEL: +57 – 1 668 36 00

Reconocimiento o Agradecimientos

Agradecimiento a Dios por guiarme y acompañarme en mi vida brindándome la perseverancia y sabiduría para alcanzar mis metas propuestas. A mi familia por su amor y apoyo incondicional que me motiva cada día a salir adelante.

Agradezco a mis directores de tesis, ingenieros: Joan Paola Cruz y Enrique Romero, quienes tuvieron la disposición de compartir su conocimiento y motivación para orientar la presente investigación. Agradezco al cuerpo administrativo y docente de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito; quienes contribuyeron en alguna medida con el desarrollo y socialización de los productos obtenidos en este trabajo.

Resumen

La gestión de los Productos Fuera de Uso (PFU) en la cadena de suministro, es un problema complejo y en ocasiones poco atractivo para las organizaciones, dado el alto grado de incertidumbre del retorno, los costos logísticos en los que se incurre para el desarrollo de las operaciones de recolección y disposición, y en ocasiones por desconocimiento de las ventajas económicas, legales y sociales alcanzables a través de la implantación de sistemas de logística inversa. La presente investigación estudia las barreras de entrada que puede experimentar una Pyme en el momento de implementar o participar en un sistema de logística inversa para llantas fuera de uso en la ciudad de Bogotá. A través de un modelo de Dinámica de Sistemas (DS) se evaluaron las relaciones causales entre las variables, encontrándose como limitantes: un mercado poco desarrollado para los productos del aprovechamiento disponible sujeto a altos costos de recolección, transporte (costos logísticos) y tratamiento, lo que restringen la rentabilidad del sistema para el productor. Por otra parte, la dinámica de generación de llantas usadas en la ciudad es superior a la capacidad de las alternativas disponibles de aprovechamiento, por lo cual es necesario promover nuevos usos de los materiales recuperados con demandas suficientes para equilibrar el sistema.

El estudio representa un aporte en la construcción de conocimiento alrededor de los campos de aplicación de la DS y proyecta información relevante para empresarios y entes gubernamentales para encaminar la toma de decisiones vista desde enfoques sistémicos relacionando aspectos operacionales, legales y económicos.

Abstract

Obsolete products management is a complex and sometimes unattractive problem for organizations, due to the high degree of uncertainty regarding the materials' return; high logistical costs invested during the collecting and disposal operations processes, and sometimes because the economical, legal and social advantages that can be achieved through the implementation of reverse logistics systems are ignored. This research focuses on the barriers of entry that an SME can experience when implementing or applying a reverse logistic system in Bogotá-Colombia. Through a System Dynamics model, causal relationships between variables were correlated, finding several limiting factors such as the market for those products derived from this process is not profitable and collection, transportation and treatment costs of these materials are not engaging for the main producer. On the other hand, production dynamics of tires in Bogotá is greater than the capacity of the available alternatives for use, thus it is necessary to promote new uses for the recovered materials including appealing offers for the producer in order to balance the system.

This research represents significant contribution to build knowledge around application ranges of DS and provides relevant information for entrepreneurs and governmental bodies to direct in the decision-making seen from systemic approaches, linking operational, legal and economic issues.

Tabla de contenido

Lista de Figuras.....	III
Lista de Tablas	IV
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 PROBLEMÁTICA Y JUSTIFICACIÓN	2
1.1.1 Contexto	2
1.1.2 Descripción del Problema.....	6
1.2 OBJETIVOS Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	9
1.3 ALCANCE Y LIMITACIONES	10
1.4 METODOLOGÍA.....	10
2. CAPÍTULO	19
SISTEMA DE LOGÍSTICA INVERSA DE LLANTAS USADAS EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C.	19
3. CAPÍTULO	34
EVALUACIÓN DE LAS BARRERAS DE ENTRADA DE PYMES A UNA RED LOGÍSTICA INVERSA DE LLANTAS USADAS EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C. DESDE UN ENFOQUE DE DINÁMICA DE SISTEMAS.....	34
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
BIBLIOGRAFÍA	57
ABREVIACIONES.....	62
APÉNDICES.....	63

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama causal sistema de logística inversa de llantas usadas en la ciudad de Bogotá d.c. elaboración propia.	41
Figura 2. Diagrama de niveles y flujos generación de llantas fuera de uso.	42
Figura 3. Generación de llantas nuevas y usadas en la ciudad de bogotá.	44
Figura 4. recolección de llantas usadas	45
Figura 5. Diagrama forrester del de logística inversa de llantas usadas en la ciudad de bogotá d.c. elaboración propia	46
Figura 6. Disposición de llantas para procesos de aprovechamiento.	45
Figura 7. Costos logísticos y utilidades totales del sistema.....	47
Figura 8. Utilidades por alternativa de aprovechamiento	47
Figura 9. Utilidades por ventas de material recuperado.....	48
Figura 10. llantas fuera de uso a disponer por los srs	48
Figura 11. eficiencia económica del sistema	49
Figura 12. Utilidades de las alternativas de aprovechamiento si se reduce el 15% al productor del costo logístico	49

Lista de tablas

Tabla 1. Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas, con cobertura en Bogotá D.C.....24

Tabla 2. Empresas y participantes en las entrevistas semiestructuradas.....26

Tabla 3. Crecimiento del parque automotor –generación de llantas nuevas y usadas..... 44

Tabla 4. Ajustes en el modelo propuesto escenario 1 48

Tabla 5. Utilidades por alternativa reduciendo el 15% del costo logístico al productor..... 49

1. Introducción

La función de la gestión logística se ha convertido en el eje principal para la implementación de estrategias exitosas en la cadena de suministro, actuando como conector entre las empresas y sus clientes (Green, Whitten, & Inman, 2008). Sin embargo, hoy se debe ir más allá de llevar productos hasta el cliente en las cantidades, tiempos y costos requeridos; los mercados cada vez tienen mayor exigencia y preferencia ante productos y servicios que representen un menor impacto negativo al medio ambiente (Kannan, Noorul Haq, & Devika, 2009), haciendo que conceptos como la logística verde y logística inversa tomen cada vez mayor importancia en el desarrollo de cadenas de suministro que se preocupan por la sostenibilidad de sus procesos.

Desde esta perspectiva la logística verde incorpora aspectos ambientales en todas las actividades logísticas tradicionales para entregar productos y servicios de una manera amigable con el medio ambiente, la sociedad y con eficiencia económica (Chhabra, Garg, y Singh, 2018), (hung Lai y Wong,2012). Por su parte, la logística inversa corresponde al conjunto de todas las actividades y actores necesarios para recolectar datos y productos fuera de uso; para recuperar su valor residual, recrear y redistribuir un producto comercializable o un factor de entrada que se puede volver a utilizar en los procesos de creación de valor a futuro (Nuss, Sahamie, & Stindt, 2015). Sin embargo, su implementación no es una tarea trivial, existen una cantidad de variables y sinergias entre ellas que deben ser analizadas antes de configurar redes de flujo inverso para dichos productos.

La creciente preocupación por el agotamiento de los recursos y la degradación del medio ambiente están empujando a los gobiernos a generar leyes que exijan a las organizaciones responder y administrar sus productos hasta el final de su vida útil (Rachih, Mhada, y Chiheb, 2018). En Colombia el gobierno, a través del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS, enmarcados en la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos (Conpes 3874, 2016) ha adelantado diversas estrategias para fomentar la reutilización, aprovechamiento, valorización y reciclaje de diferentes productos que al ser dispuestos de manera inadecuada generan efectos negativos en el medio ambiente. En el caso de las Llantas fuera de uso, a través de la Resolución 1326 de 2017, se establece la obligatoriedad de los productores de formular, presentar, implementar y mantener Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas (SRS), es decir, se deben establecer sistemas de logística inversa para las llantas que se comercializan en el territorio nacional.

La presente investigación desarrolla un análisis de las barreras de entrada que experimenta una PyME en el momento de implementar un sistema de logística inversa

para llantas fuera de uso en la ciudad de Bogotá: valorando la imposición legislativa ante la oportunidad de rentabilidad económica que puede representar para la empresa.

Haciendo uso de la herramienta de Dinámica de Sistemas (DS), se logró construir un modelo de simulación, basado en el estudio de las relaciones causales que existen entre las partes de este sistema, permitiendo comprender su comportamiento a través del tiempo y probar diferentes alternativas de intervención. Este trabajo se organiza como se muestra a continuación: en el capítulo 1, se contextualiza y describe la situación problema y la metodología como se aborda la investigación; a continuación, los resultados son expuestos en dos artículos científicos: el capítulo 2, corresponde al artículo publicado como memoria en el evento científico 2018 de la Asociación Colombiana de Dinámica de Sistemas, en él, se describe el análisis cualitativo del modelo a través de la construcción del diagrama causal. En el capítulo 3 se explora de manera cuantitativa el comportamiento dinámico del sistema basado en el modelo matemático con el que se relacionan las variables identificadas, este capítulo contiene el artículo con el que se aplica a la divulgación en una revista indexada de Ingeniería industrial. Finalmente, las conclusiones y recomendaciones generales del estudio son expuestas en el capítulo 4.

La investigación representa un aporte a la construcción de conocimiento alrededor de los campos de acción que tiene la dinámica de sistemas (DS). Para el sector productivo y entes gubernamentales es una herramienta que permite encaminar la toma de decisiones vista desde enfoques sistémicos relacionando aspectos operacionales, legales y económicos.

1.1 Problemática y Justificación

1.1.1 Contexto

La administración de la cadena de suministro (SCM, por sus siglas en inglés) y la logística se han convertido en un factor determinante para la competitividad y productividad de las empresas a nivel mundial (Christopher, 1993a),(Jiménez y Hernández, 2002),(Ballou, 2004), (Servera-Francés, 2010), (Kirby y Brosa, 2011). Aunque, resulta complejo establecer límites conceptuales entre la SCM y la gestión logística; la clave está en que todos los participantes de la cadena de suministro comprendan la perspectiva con la que se relacionan cada una de las funciones establecidas para cada rol (Larson y Halldorsson,2004). Por ejemplo, una perspectiva unionista, como la adoptada por el Consejo de Gestión Logística (CLM, por sus siglas en inglés); muestra a la SCM como la gestión de las relaciones estrategias entre los actores de la cadena con un modelo empresarial coherente y de alto rendimiento, y a la logística como: “la parte del proceso de la cadena de suministro que planifica, implementa y controla el flujo y almacenamiento eficiente y efectivo de bienes, servicios e información desde el punto de origen hasta el

punto de consumo para cumplir requisitos de los clientes” (Consejo de Profesionales de Gestión de la Cadena de Suministro,2018).

En los últimos años, la estructura de las cadenas de suministro y sus procesos logísticos, han ido evolucionando y adaptándose a las condiciones del entorno, factores como; el agotamiento de los recursos naturales, las fluctuaciones en los precios de las materias primas, la necesidad de proteger el medio ambiente y los efectos del cambio climático, están obligando a las empresas a reconsiderar sus modelos comerciales y reestructurar sus cadenas de suministro para ser más sostenibles (Wu y Pagell, 2011). Es así como la concepción tradicional de la cadena de suministro definida como: una red de organizaciones que se integran con el objetivo de llevar bienes o servicios desde las fuentes de materia prima hasta el consumidor final, con valor agregado y satisfaciendo los requerimientos establecidos (Ballou, 2004; Chopra & Meindl, 2008; Christopher, 1993a), amplía su alcance, cuando surgen interrogantes como: ¿Qué sucede cuando un producto ha perdido valor en algún punto de la cadena de suministro?, ¿Quiénes son responsables de la correcta disposición de los residuos industriales generados en los procesos desarrollados a lo largo de la cadena de suministros ?, ¿Es posible recuperar valor de los Productos Fuera de Uso (PFU)?. Desde esta perspectiva se evidencia una demanda de bienes y servicios cada vez más ligados al comportamiento medio ambiental de las empresas y el desarrollo sostenible. Actualmente, los consumidores esperan que los productores implementen sistemas de logística inversa a través de los cuales; los productos fuera de uso sean retornados a la cadena, para su procesamiento, recuperación y/o disposición responsable con el medio ambiente (Kannan et al., 2009).

Sin embargo, la falta de investigación sobre cómo incorporar aspectos de sostenibilidad en las cadenas de suministros hace que esta sea una tarea desafiante (Mota, Gomes, Carvalho,y Barbosa-Povoa, 2014). La gestión de los residuos y recuperación de productos, en las cadenas de suministro, es un problema complejo y en ocasiones poco atractivo para las organizaciones, dados los altos costos logísticos en los que se incurre para el desarrollo de las operaciones de retorno y disposición final de los PFU. Pues, no necesariamente todas las prácticas ambientales traerán ahorros de costos, algunas pueden de hecho llegar a aumentarlos, especialmente en el corto plazo (Wu y Pagell, 2011). El reto actualmente está en cómo las organizaciones enfrentan las presiones del entorno con relación a la sostenibilidad, tomando decisiones para ejecutar un negocio rentable a corto plazo, que no comprometa negativamente el medio ambiente, ni la sociedad en el futuro.

Autores como: (Matos & Hall, 2007) y (Hall & Vredenburg, 2003), argumentan que no se ha abordado completamente el análisis de parámetros para el diseño estratégico de la cadena de suministro sostenible existe un alto grado de incertidumbre y riesgo que prácticamente lleva a las empresas a que naveguen por un entorno dinámico, sin una hoja de ruta clara. Se requiere de herramientas para la toma de decisiones a nivel estratégico en aspectos que involucran el análisis de barreras de entrada en las que se

valora si interesa o no el retorno, problemas de localización de instalaciones (puntos de recolección, transferencia y plantas de tratamiento), así como decisiones de carácter operativo relacionadas con problemas de enrutamiento de vehículos asociado al flujo de materiales y gestión de inventario, entre otros aspectos que van más allá del cumplimiento legal y social.

En el contexto colombiano, el desarrollo de cadenas de suministro sostenibles, a través de procesos de logística verde e inversa, siguen siendo un gran reto que solo algunos pocos han asumido con responsabilidad. Las empresas de gran tamaño desarrollan modelos de logística inversa con mayor frecuencia, en comparación con las Micro, Pequeña y Mediana Empresa (PyMEs), dado que la gran empresa posee el capital e infraestructura necesaria para invertir en proyectos de este tipo. Es el caso de empresas importantes para el país como: Alpina, Bavaria, Cencosud, CocaCola, Arcos Dorados, natura, Peldar, Grupo Familia, Carvajal, Tetra Pack y Unilever, las cuales conforman uno de los mayores clúster de reciclaje en América Latina llamado Compromiso Empresarial para el Reciclaje (CEMPRE Colombia, 2018); Michelin Colombia/ Incollantas recupera las llantas de sus usuarios, las remanufactura y las devuelve a los mismos (Michellin, 2018); otro caso de destacar es el de CISCO Colombia, el cual ha desarrollado una estrategia de "economía circular" con la que en el último año fiscal logro retornar 11.400 toneladas métricas de producto para su reutilización, reacondicionamiento o reciclaje (CISCO, 2018). Sin embargo, cabe resaltar que en Colombia, las PyMEs, representan un segmento de gran importancia para el sector productivo del país, según cifras del Registro Único Empresarial y Social (RUES) al 2016, el 99,6% de las empresas registradas eran PyMEs (el 94,7% son microempresas y 4,9% pequeñas y medianas), éstas, según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2017), generan alrededor del 67% del empleo y aportan el 28% del Producto Interno Bruto (PIB); y es precisamente en las PyMEs, donde se evidencia mayores falencias conceptuales y tecnológicas en materia logística y específicamente en logística inversa, aspecto que limita el desarrollo productivo y competitivo del país.

Cuando en Colombia se habla de logística, se observa que, generalmente, los empresarios no tienen claro cuáles son las implicaciones que este término tiene para el desarrollo de la cadena de suministro dentro de los procesos internos y externos de una organización (Cipolletta, Pérez, & Sánchez, 2010) Al respecto, es común encontrar que se hace referencia a la logística como aquellas actividades relacionadas con el despacho y con el personal que separa, consolida, carga y envía los pedidos de los clientes de una compañía, catalogándolas como acciones rutinarias y no generadoras de valor agregado al producto (Cely, 2013), desconociendo así, el potencial y responsabilidad de la logística desde la función estratégica de la organización para lograr la sinergia de todos los procesos a lo largo de la cadena de suministro en función del flujo de eficiente de materiales, información y capital que satisfacen los requerimientos del cliente.

En el estudio de caracterización del sector de la logística en Colombia (Mesa sectorial de logística & SENA, 2014), los resultados demostraron que el sector tiene un alto potencial de mejoramiento, especialmente en tres aspectos importantes que son: (i) Talento humano; (ii) Organización y medio ambiente y (iii) Macro tendencias globales. El estudio menciona que el pensamiento de los gerentes Logísticos de las empresas analizadas es netamente operacional, tanto así, que:

Ninguna empresa manifestó la necesidad de capacitación y/o formación sobre Supply Chain Management y Logística, cuando el estudio evidenció dicha necesidad. Muy pocos gerentes de Logística diferencian entre Supply Chain Management y Logística, y para muchos de ellos, “cadenas de suministro” es lo mismo que “logística” (Mesa Sectorial de Logística y SENA, 2014. p 393).

Un efecto de esta falencia conceptual puede verse a nivel de organización y medio ambiente; pues se encontró bajos niveles de integración en la administración de la cadena de suministro y baja competitividad logística, lo que lleva a altos costos de operación y desaprovechamiento de recursos; en ninguna empresa analizada en el estudio se evidenció la utilización de energías renovables, ni la utilización de materiales biodegradables y muy pocas comprenden el alcance de la logística inversa considerado como un proceso estratégico.

Por otro lado, las macro tendencias globales, fueron percibidas por los empresarios como asuntos de tecnología e infraestructura, cuando en realidad estos son efectos de retos aún más complejos como por ejemplo: el aumento de la población y la migración, la conectividad global, la viabilidad de mercados emergentes, productos más complejos, escasez en las capacidades, desastres naturales, escasez en la mano de obra, y los retos asociados al medio ambiente y al cambio climático que afectan significativamente cada uno de los procesos en administración de la cadena de suministro y Logística.

Otro estudio reciente que refleja la baja apropiación de la logística inversa como ventaja competitiva, es la Encuesta Nacional de Logística 2015 (Departamento Nacional de Planeación, 2015), en la cual se clasificaron las empresas participantes del estudio en tres niveles de desarrollo logístico de acuerdo con los proyectos que vienen trabajando. Los niveles fueron establecidos como: Básico, Medio y Avanzado, sólo en este último se consideran proyectos de eficiencia ambiental y proyectos colaborativos con clientes y proveedores.

De las empresas clasificadas en nivel avanzado (30.5% de las empresas usuarias de servicios logísticos (USL) y 27.4% de las empresas prestadoras de servicios logísticos (PSL)), sólo un 34,1% de PSL trabajan en proyectos de eficiencia ambiental y han establecido acciones para hacer una logística sostenible, que en su mayoría pertenecen a empresas de gran tamaño. De estas, el 50,5% de los esfuerzos se han centrado en la renovación de la flota de transporte y en la adecuada programación de muelles,

impactando sustancialmente en la disminución de emisiones de CO₂, y un 25.2% se han centrado en la logística inversa para la recuperación de materias de desperdicio.

Si bien, la logística inversa es considerada a nivel mundial como una ventaja competitiva en el ámbito legal, social y económico para toda organización (Chanintrakul, Mondragon, Lalwani, & Wong, 2009; de Brito & Dekker, 2004; Mihi, 2007) En Colombia la implementación de sistemas de logística inversa no es una característica destacada en gran parte de las empresas nacionales. La tendencia, al igual que ha sucedido en Europa, es que a largo plazo la normatividad sea cada vez más rigurosa y contemple cada vez más aspectos y sectores; en función de incentivar el desarrollo sostenible y la competitividad (Mihi, 2007).

1.1.2 Descripción del Problema

La generación de residuos sólidos es una acción ineludible en el desarrollo cotidiano de los seres humanos; el aumento de la densidad poblacional, los hábitos de consumo, el desarrollo económico y tecnológico, guardan una relación directamente proporcional al volumen de basuras generadas. Según el estudio del Banco Mundial y el Departamento Nacional de Planeación de 2015, citado en el Documento (Conpes 3874, 2016): en Colombia actualmente, se generan 11,6 millones de toneladas de residuos al año y solo se recicla el 17%. En Bogotá, se generan 7.500 toneladas al día y se reciclan entre 14% y 15%. El diagnóstico revela que la disponibilidad de suelos para efectuar la disposición final no está acorde con la creciente generación de residuos, por tanto:

“Si se continúa con la misma dinámica de generación de residuos, sin adecuadas medidas para mejorar su aprovechamiento o tratamiento, y con patrones de producción y consumo insostenibles, en el año 2030 tendremos emergencias sanitarias en la mayoría de las ciudades del país y una alta generación de emisiones de GEI” (Conpes 3874, 2016, p.31).

Para hacer frente a esta situación, en Colombia existe una Política Nacional de pos consumo, con la cual se busca gestionar el retorno de productos fuera de uso para su posterior tratamiento, reutilización, aprovechamiento, valorización y reciclaje, (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo de Colombia, 2017). En esencia está basada en el concepto de la responsabilidad extendida del productor – REP, el cual es definido por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD POLICY HIGHLIGHTS, 2016) como: una estrategia emergente que promueve la integración de los costos ambientales asociados con los productos a lo largo de su ciclo de vida, transfiriendo la responsabilidad (física y/o económica completa o parcial) hacia el productor y el suministro de incentivos a los productores para que tengan en cuenta consideraciones ambientales desde la etapa del diseño del producto. Este instrumento obliga a los fabricantes e importadores de ciertos productos de consumo masivo, a

organizar, desarrollar y financiar la gestión integral de los residuos derivados de sus productos, es decir a estructurar un sistema de logística inversa.

El MADS expidió diferentes resoluciones que regulan los residuos posconsumo tales como envases de plaguicidas, medicamentos o fármacos vencidos, baterías usadas, plomo ácido, pilas y/o acumuladores, llantas usadas, bombillas y computadores y periféricos. No obstante, existen programas voluntarios los cuales son establecidos y desarrollados como iniciativas del sector privado con el apoyo de entidades del sector público (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo de Colombia, 2017)

Sin embargo, pese a que se cuenta con una amplia legislación en materia ambiental, los resultados no han sido los esperados. Aún existen muchas empresas que desconocen o no cumplen a cabalidad lo dispuesto en la normatividad, no se ha apropiado ampliamente la estrategia de logística inversa como un mecanismo para la generación de valor y lograr mejores niveles de competitividad. Esto puede evidenciarse en las cifras presentadas por el DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE, 2016), a través del Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica (SCAE), en el informe de cuenta Satélite Ambiental, el cual registra que en el año 2015 se aprovecharon el 38,2 % de los residuos sólidos generados en los procesos de producción, para la generación de energía, reciclado y nueva utilización, de estos, solo un 8, %, de los residuos totales generados por la industria se reutilizaron o reciclaron.

Desde este panorama, el presente proyecto está enfocado en analizar el caso del plan posconsumo de llantas fuera de uso en la ciudad de Bogotá, reglamentado actualmente por la Ley 2811 de 1974, Resolución 1326 del 2017 (anterior Resolución 1457 de 2010), Resolución 6981 de 2011 y Decreto 442 de 2015, por medio de los cuales se fundamenta la gestión ambiental de este residuo en el país y específicamente en el Distrito Capital.

En el año 2010, el MADS, en ejercicio de sus facultades legales expide la Resolución 1457 por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas y se adoptan otras disposiciones. En ella se establecieron las metas mínimas de recolección y tratamiento que los productores deberían asegurar a través de sistemas colectivos o individuales, como se cita a continuación:

“a) A más tardar el 31 de noviembre de 2010 los productores deberán iniciar el proceso de recolección de llantas usadas, el cual deberá operar de manera ininterrumpida y progresiva hasta la puesta en marcha de los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas; b) A partir del año 2012, los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas deberán asegurar la recolección y gestión ambiental mínimo anual del 20% de las llantas usadas, sobre la base del promedio de las llantas puestas por el productor en el mercado en los dos años anteriores a la fecha de presentación del Sistema ante el MAVDT; c) En los años posteriores se debe garantizar

incrementos anuales mínimos del 5% hasta alcanzar el 65% como mínimo “(Art. 10°. Res. 1457 dé 2010).

Sin embargo, en informes de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), se muestra un incumplimiento a dichas metas establecidas a ello se suma el agravante de las nuevas disposiciones dadas en la Resolución 1326 del 2017, la cual, tras identificar la necesidad de avanzar en el fortalecimiento de dichos sistemas y considerando el crecimiento del parque automotor; involucra otros tipos de llantas tales como las de motocicletas, bicicletas y llantas fuera de carretera.

Por lo anterior, es evidente que existen falencias en la configuración de los sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas en la ciudad, más allá del cumplimiento a la legislación vigente; este es un caso en el que no se ha abordado completamente el análisis de parámetros para la configuración estratégica del sistema, alineando los objetivos empresariales con los objetivos gubernamentales. Existe un alto grado de incertidumbre y riesgo, en el que las empresas están tomando decisiones enfocadas únicamente a validar el cumplimiento de la normatividad, pese a ello, la cantidad de residuo de llantas usadas es superior a la capacidad de recolección y tratamiento de los actores implicados, generando una problemática insostenible que crece diariamente.

Un factor crucial para la gestión de cadena de suministro es que sea identificada como un sistema de redes de colaboración entre los actores implicados y no como esfuerzos individuales. La articulación de los actores implicados en la cadena de suministro de llantas aún no es eficiente; pues se trata de un sistema complejo en el cual interactúan variables que generan causas y efectos no siempre de manera lineal, y existe gran incertidumbre en el momento de planear los procesos de recolección y disposición del producto fuera de uso, generando así, altos costos en la operación logística.

El presente proyecto toma como objeto de estudio las PyMEs involucradas en la producción o gestión de llantas usadas en la ciudad de Bogotá D.C., Teniendo en cuenta cifras de la cámara de comercio de Bogotá, en el año 2018, se encontraron registradas 25080 empresas asociadas a actividades económicas en la cadena de suministro de llantas (código CIUU: C2211,C2212,G4511,G4520,G4530,H4921,H4923), de las cuales el 89% corresponde a Microempresas, el 9% a Pequeñas empresas, seguido del 2% de Medianas empresas y solo un 1% son Grandes empresas. Por ello, son las PyMEs quienes requieren herramientas de juicio que permitan apoyar la toma de decisiones a la hora de diseñar una red logística inversa, en función de lograr mayores beneficios para el sistema, es decir; hacer el análisis de barreras de entrada; etapa en la que se decide si un producto se incluye o no en el sistema inverso, valorando la imposición legislativa, la oportunidad de rentabilidad económica y contribución social.

Desde esta perspectiva, La dinámica de sistemas (DS) es una herramienta que permite construir modelos de simulación basada en el estudio de las relaciones causales que

existen entre las partes del sistema, para tomar decisiones en entornos complejos. Esta metodología permite: identificar el problema, desarrollar hipótesis dinámicas que expliquen las causas del problema, construir un modelo de simulación del sistema que permita analizar la raíz del problema, verificar que el modelo reproduce de forma satisfactoria el comportamiento observado en la realidad, probar en el modelo las diferentes alternativas o políticas que solucionan el problema, e implementar la mejor solución (Sterman, 2000). Lo que resulta útil para dimensionar barreras externas de entrada en la implementación de sistemas de logística inversa para llantas fuera de uso de las PyMEs en la ciudad de Bogotá D.C., esto es entender y facilitar la toma de decisiones que realizan los empresarios al momento de participar o implementar estos programas, e identificar factores que incidan en el fortalecimiento de los sistemas de logística inversa que nos permitan avanzar en un aprovechamiento mucho más efectivo de los residuos.

1.2 Objetivos y Pregunta de Investigación

Objetivo General:

Identificar las barreras de entrada que inciden en la participación de una Pyme en un sistema de logística Inversa para la recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas de vehículos en la ciudad de Bogotá, D.C. a través de un modelo de Dinámica de Sistemas.

Objetivos específicos:

- Caracterizar el sistema de logística inversa por medio de los actores y elementos relevantes en el sistema, así como sus relaciones, comportamientos y toma de decisiones, determinando las relaciones de causalidad involucradas y sus barreras de entrada.
- Caracterizar la situación actual del sistema en términos de: números de actores, volúmenes, frecuencias de generación del residuo y alternativas de valorización, capacidades de instalaciones.
- Identificar los criterios para la clasificación y disposición de los neumáticos fuera de uso en la red de suministros inversa identificados como restricciones para la modelación.

- Construir el modelo de Dinámica de Sistemas (DS) para representar la situación problemática en función de las variables y procesos que permiten la toma de decisiones.
- Evaluar el modelo a partir de la simulación (pruebas y análisis de sensibilidad) e identificar las políticas de intervención y comportamiento de la red inversa en el tiempo para mejorar la toma de decisiones de los actores involucrados.

Preguntas de Investigación

¿Cuáles son las barreras de entrada que inciden en la participación efectiva de una Pyme en un Sistema de logística Inversa para la recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas de vehículos en la ciudad de Bogotá, D.C.?

1.3 Alcance y Limitaciones

La investigación se centra en empresas PyMEs en la ciudad de Bogotá que requieren implementar o vincularse a un sistema de logística inversa para llantas usadas de acuerdo con lo establecido en la Resolución 1326 del 13 de Julio del 2017. El modelo propuesto incluye únicamente los actores y procesos de: recolección, almacenamiento, transporte y aprovechamiento asociados a llantas de automóviles, camiones, camionetas, buses, busetas y tractocamiones hasta rin 22,5 pulgadas.

La investigación se centra en la primera etapa para la implantación de un sistema logístico inverso propuesto por Kopicki, Berg y Legg (1993) en la cual se analizan las barreras de entrada, tales como: las motivaciones económicas, legales y operacionales que inciden en la participación y/o implementación de un sistema de logística inversa.

Algunos de los datos obtenidos como costos de producción y utilidades del sistema corresponden a aproximaciones dadas por las empresas en las entrevistas realizadas, debido a conceptos de información confidencial. Por lo cual, los resultados obtenidos son representaciones cercanas a la realidad.

1.4 Metodología

Implantar un sistema de logística inversa no es un proceso estandarizado, ni de criterio unificado. Sin embargo, autores como Roger y Tibben–Lembke (1999), y Rogers, Kopicki, Berg y Legg (1993) proponen una serie de etapas por medio de las cuales una organización puede configurar un sistema de este tipo. En general los autores coinciden

en el planteamiento de una fase inicial en la que se caracteriza y evalúa el contexto del sistema inverso a partir del cual se determina las estrategias y procedimientos para la gestión de los PFU. Uno de las propuestas más destacadas es la de Kopicki et al (1993), quien plantea cuatro pasos para la implementación de la logística inversa, los cuales son en su orden: (i) Análisis de barreras de entrada; en el que se decide o no que el producto se incluya en un sistema de logística inversa, teniendo en cuenta sus motivaciones o limitantes, (ii) Gestión de la recolección; en el que se diseñan mecanismos para la recolección del producto, (iii) Clasificación; en el que se decide qué hacer con el producto (reparación, canibalización, reutilización, reciclaje, confinación), y (iv) Colocación; en el que se envían los productos a los destinos elegidos.

El presente estudio se enmarca en la etapa inicial (análisis de las barreras de entrada) que debe darse en la configuración de un sistema de logística inversa; en ella se requiere de herramientas que faciliten la comprensión del sistema actual y analizar su comportamiento en el tiempo, lo cual apoya la toma de decisiones y el diseño de estrategias en etapas posteriores.

El diseño de cadenas de suministro sostenibles y la logística inversa han sido abordados desde distintos métodos de investigación. Prajapati, Kant y Shankar (2018) realizan una revisión sistemática de la literatura de logística inversa disponible, destacando los modelos matemáticos como uno de los métodos más implementados por los investigadores en este campo, seguido del estudio de caso y la encuesta que van tomando fuerza en los últimos años.

Sin embargo, los aspectos de sostenibilidad en las cadenas de suministros están determinados por la interacción de los actores involucrados en ella, las cuales pueden observarse a nivel: intraorganizacional (microscópico), interorganizacional (mesoscópico) y un agregado de la industria o sector (macroscópico). (Fabbe-Costes, Roussat, Colin, 2011). En cada uno de ellos existen múltiples variables que se relacionan de forma compleja y no siempre de manera lineal, limitando la pertinencia de algunos modelos matemáticos en análisis del sistema.

Rebs, Brandenburg y Seuring (2018). Exaltan el modelado SD como una herramienta poderosa para el análisis de cadenas de suministro sostenibles. A través de una revisión de literatura sobre el uso de DS en este campo, identifican la prevalencia del análisis de cadenas de suministro a nivel macroscópico para soportar decisiones estratégicas.

De las investigaciones revisadas por Rebs, et al.,(2018) se encontró mayor frecuencia de modelos SD deterministas. En general los modelos DS son de naturaleza descriptiva como la simulación, las corridas muestran el desarrollo de variables de estado a lo largo del tiempo en lugar de buscar un óptimo. Sin embargo, también se han logrado investigaciones con modelos DS estocásticos, e híbridos con otras herramientas de programación y modelación matemática.

La DS, es un campo emergente que ha sido de gran interés en la investigación de la administración de cadenas de suministro sostenibles (SSCM); pues ha resultado ser una herramienta útil para analizar las complejas configuraciones de las cadenas de suministro hoy en día; y su comportamiento en el tiempo, apoyando la formulación de políticas y la toma de decisiones para alcanzar un comportamiento deseado del sistema (Rebs et al, 2018). En los modelos DS se puede incorporar fácilmente todo tipo de elementos para la reingeniería de la cadena de suministro sin limitaciones de escala (Akkermans y Dellaert, 2005).

La metodología DS fue establecida por Jay Forrester en problemas de la administración de la cadena de abastecimiento (González y Múgica, 1998), esta herramienta que permite construir modelos de simulación basada en el estudio de las relaciones causales que existen entre las partes del sistema, para tomar decisiones en entornos complejos.

Entre los trabajos de logística inversa que aplican la (DS) para analizar las barreras de entrada, está el de Spengler y Stölting (2002) quienes utilizan DS para evaluar la conveniencia de implementar una cadena de suministros de ciclo cerrado para productos eléctricos; en ella, los componentes de los productos desechados son recuperados para reutilizarse como refacciones, lo que evita que el fabricante tenga que producir y almacenar componentes para productos que pronto saldrán del mercado. El modelo demuestra la favorabilidad de la implementación de esta estrategia sobre la de producción, en términos de costos de recolección versus costos de abastecimiento.

Georgiadis y Vlachos (2004), analizaron a través de un modelo DS el impacto de los problemas ambientales en el comportamiento a largo plazo de una cadena de suministro con circuito cerrado. El modelo permite observar el efecto que tiene la intensificación de las medidas legales de protección del medio ambiente, sobre las tasas de recolección de producto, que a su vez mejora la imagen verde de la organización y esta incide positivamente sobre la demanda del cliente. Los autores recomiendan el modelo propuesto, como una herramienta útil a los políticos y tomadores de decisiones relativas a la gestión estratégica de largo plazo de la logística inversa.

Por su parte Srivastava y Srivastava (2007) utilizan (DS) para incorporar diversos factores que afectan a la tasa de retorno y que debido a su naturaleza cualitativa o “blanda” no pueden estudiarse aplicando métodos cuantitativos o “duros”. En su modelo, los autores analizan el diseño de una red de logística inversa en la India para la recuperación de diversos productos eléctricos y electrónicos. En este caso, la (DS) explicó razonablemente el comportamiento de los volúmenes esperados de retornos considerando diversos factores como la cercanía de los centros de recolección a las poblaciones, las tasas y costos de recolección, así como el reproceso de bienes.

Las decisiones sobre las políticas de planeación de capacidad en las plantas de remanufactura que hacen parte del sistema de la cadena de suministro inversa, son abordadas por Vlachos, Georgiadis, Eleftherios Iakovou, (2007) a través de un modelo

DS basado en la relación de los aspectos económicos, ambientales (tales como la obligación de recuperación impuesta por la legislación) y el efecto “imagen verde” en la demanda de los clientes. El modelo proporciona una herramienta experimental, que se puede utilizar para evaluar las alternativas de planificación de en temimos de capacidad (“qué pasaría si”), como medida de eficacia de la política el profit de toda la cadena de suministro.

Yao, Shen, Tan y Hao (2011) evalúan el comportamiento medioambiental de la gestión de residuos en el sector de la construcción. El estudio introduce los indicadores para medir el rendimiento de sostenibilidad de los proyectos de carreteras e identifica los factores dinámicos que afectan el rendimiento del indicador haciendo referencia a los estudios de viabilidad relevantes de los proyectos de este sector.

Mutigni (2014), en su modelo DS establece políticas y estrategias para traducir la logística inversa en la cadena de suministro verde (GSCM, por sus siglas en inglés) y medir su impacto. En su estudio, identifica las medidas de rendimiento clave para las cadenas de suministro verdes y las relaciones causales entre las variables importantes en una cadena de suministro típica. Los resultados de los análisis de hipótesis en DS indican que a pesar de que los impactos económicos, ambientales y sociales pueden tomar mucho tiempo para realizarse, las ventajas competitivas que obtienen a medio y largo plazo son bastante considerables, desde un punto de vista comercial, por lo tanto, la obtención de la disposición de la alta dirección para invertir en iniciativas de reverdecimiento es esencial, teniendo en cuenta las limitaciones de los recursos disponibles. Wee Kwan Tan y Kumar (2006) Evalúan la rentabilidad de un sistema de Logística inversa de computadores en Asia con un modelo DS, los resultados muestran que para que el sistema sea rentable las piezas refabricadas necesitan mantener un precio de reventa más alto que las piezas nuevas. Por otra parte, la calidad de los procesos selección y recolección evitarán los costos logísticos adicionales debido al transporte y almacenamiento innecesario de chatarra.

El caso particular de la logística inversa de llantas fuera de uso en Colombia, ha sido abordado con: un modelo de programación multi-objetivo con algoritmos genéticos para evaluar el impacto ambiental que representa la producción y recolección del material en las ciudades de Pereira y Dosquebradas, como resultado se identifica que la capacidad óptima de las plantas, en un escenario de recolección del 100%, requiere del apoyo de plantas existentes en otras ciudades, para su adecuada gestión, ya que implementar una planta de mayor capacidad no es viable para la cantidad de residuo que se genera, a su vez, se propone considerar un sistema de tarifas al consumidor para facilitar la recolección del 100% de llantas y buscar mejores alternativas de aprovechamiento, así como hacer una comparación más eficiente de los costos y beneficios de las alternativas (Flórez, Toro y Granada, 2012).

Camargo, Franco, Chud y Osorio (2017), realizan un modelo de (DS) que permite evaluar el impacto ambiental generado por la logística inversa de las llantas para automóviles. Se

utiliza la (DS) para explicar el comportamiento de las emisiones generadas por cuatro procesos: la producción de llantas nuevas, el reencauche, la trituración mecánica y el co-procesamiento. La simulación evidenció que el sistema se encuentra dominado por la demanda de llantas nuevas y exalta la trituración mecánica de llantas usadas como la mejor opción para la disposición final, porque es el proceso que menores impactos ambientales presenta. Este estudio correspondería a la fase de clasificación en un sistema de logística inversa en posterior a la fase de análisis de barreras de entrada.

Por lo anteriormente expuesto y teniendo en cuenta que el objetivo del presente estudio busca responder a la pregunta de: ¿Cuáles son las barreras de entrada que inciden en la participación efectiva de una Pyme en un Sistema de logística Inversa para la recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas de vehículos en la ciudad de Bogotá, D.C.? , es pertinente el uso de la metodología DS la cual permite: identificar el problema, desarrollar hipótesis dinámicas que expliquen las causas del problema, construir un modelo de simulación del sistema que permita analizar la raíz del problema, verificar que el modelo reproduce de forma satisfactoria el comportamiento observado en la realidad, probar en el modelo las diferentes alternativas o políticas que solucionan o mejoren el problema (Sterman, 2000).

1.4.1 Procedimiento

Para el desarrollo del estudio, se establecieron cuatro fases que corresponden a una adaptación de la metodología de DS propuestas por Forrester, Sterman (2000) y Georgiadis y Vlachos (2004) estableciendo: (i) Definición de la situación problemática, (ii) Formulación de la hipótesis dinámica (Diagrama Causal), (iii) Formulación del modelo de simulación (niveles y flujos) y, (iv) Pruebas y análisis de sensibilidad.

La primera parte de la investigación es abordada desde un enfoque cualitativo. En este punto se busca reconocer los componentes más relevantes que representan el sistema: actores involucrados, variables que intervienen y sus límites, los cuales pasan a ser la base del modelo propuesto. A continuación, se describen los instrumentos empleados en esta fase:

Recolección de la información

Se realizó en primera instancia la revisión de literatura asociada a: características de las llantas fuera de uso, procesos de aprovechamiento existentes en el contexto nacional e internacional, normatividad y estudios relacionados a la logística inversa de llantas usadas. Desde el sector productivo, se recolectó información de fuentes primarias (actores vinculados al sistema, definidos en la Resolución 1326 de 2017). La Tabla 1 muestra la estructura de los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas (SRS) vigentes y registrados en la ciudad de Bogotá, (por aspectos de confidencialidad de la información, los nombres reales de los SRS no son mencionados).

Tabla 1. Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas, con cobertura en Bogotá D.C.

Sistema de Recolección Selectiva SRS	Tipo de Sistema	Cobertura (Ciudades)	Rol en el sistema	Cantidad	Actividad	Tipo de Aprovechamiento
SRS -A	Colectivo	Bogotá , Antioquia, Valle del Cauca, Cundinamarca, Santander, Atlántico, Boyacá, Meta, Risaralda, Tolima, Caldas, Bolívar, Huila, Quindío, Cesar, Cauca, Casanare y San Andrés.	Productor	96	Fabricantes e importadores	Trituración Mecánica y Pirolisis
			Gestor	6	Almacenamiento, Aprovechamiento y/o valorización	
			Otros (Apoyo)	4	Recolección y transporte	
			Operador	1	Implementador	
SRS -B	Individual	Bogotá	Productor	1	Importador y Almacenamiento	Trituración Mecánica
			Gestor	1	Aprovechamiento y/o valorización	
SRS -C	Individual	La Estrella (Antioquia), Bogota , Yumbo (Valle)	Productor	1	Importador, implementador	Trituración Mecánica
			Gestor	1	Aprovechamiento y/o valorización	
SRS -D	Individual	Bogotá	Productor	1	Importador/ Comercializador	Trituración Mecánica
			Gestor	1	Aprovechamiento y/o valorización	
SRS -E	Individual	Bogotá , Cali, Bucaramanga, Cúcuta, Medellín, Rionegro, Villavicencio	Productor	1	Importador / comercializador y reencauchadora	Reencauche y trituración Mecánica
			Otros (Apoyo)	2	Transporte	
			Gestor	1	Aprovechamiento y/o valorización	
SRS -F	Colectivo	Cundinamarca, Antioquia, Atlántico, Bolívar, Magdalena y Cesar (Bogotá D.C. , Medellín, Barranquilla, Puerto Colombia, Cartagena, Santa Marta y Valledupar	Productor	9	Importador	Trituración Mecánica Y Pirolisis
			Gestor	1	Implementador, transporte y Aprovechamiento/ valorización	
			Otros (Apoyo)	2	Almacenamiento	
SRS -G	Colectivo	Bogotá D.C. , Medellín, Cali, Bucaramanga, Barranquilla, Marinilla, Palmira, Entrerios, Cúcuta, Villavicencio,	Productor	100	Importador	Trituración Mecánica (TDF)

		Cartagena, Ibagué, Neiva, Pereira, Tunja, Maicao, Girón, Galapa, Tuluá, Cartago, Ocaña, Manizales, Santa Marta, Sabaneta, Valledupar	Gestor	1	Implementador, transporte y Aprovechamiento/valorización	
SRS -H	Individual	2016: Bogotá 2017: Barranquilla	Productor	1	Importador, transporte	Trituración Mecánica (Granulado)
			Gestor	1	Aprovechamiento y/o valorización	
SRS -I	Individual	Bogotá D.C.	Productor	1	Importador	Trituración Mecánica
			Gestor	1	Aprovechamiento y/o valorización	
			Otros (Apoyo)	2	Transporte, Almacenamiento	

Fuente. Autoridad Nacional de Licencias Ambientales- ANLA

Brito y Dekker (2004), clasifican los actores involucrados en la red inversa como: (i) Principales: a los productores y actores responsables de la recuperación del producto, (ii) Especializados: aquellos actores que ejecutan los procesos específicos de la logística inversa tales como: transporte, almacenamiento, recicladores, operadores de reprocesamiento o eliminación del residuo, (iii) Relacionados: aquellas organizaciones gubernamentales y no gubernamentales ambientalistas, entre otras que afectan la logística inversa de la cadena de suministro. Bajo este parámetro se establece un muestreo intencional de 11 actores entrevistados en representación del sistema (ver tabla 2). De acuerdo con Patton,(2002) y Polkinghorne (2005) “Este se aplica cuando los individuos particulares se seleccionan deliberadamente, debido a la importante información que pueden proporcionar a la investigación” (citado en Chacón Vargas y Moreno Mantilla, 2016,p.107).

Tabla 2 Empresas y participantes en las entrevistas semiestructuradas

Empresa	Rol en el sistema	Participantes entrevistados
Empresa A, es una empresa del sector transporte, catalogada como productora de llantas fuera de uso según normatividad legal vigente	Actor Principal	Jefe de operaciones Logísticas y Mantenimiento
Empresa B, es comercializadora de llantas nueva, catalogada como productora de llantas fuera de uso según normatividad legal vigente	Actor Principal	Jefe de Compras
SRS A, Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de llantas usadas de carácter colectivo, con cobertura en la ciudad de Bogotá con más de 90 empresas asociadas	Actor Especializado	Coordinador de Investigación y Desarrollo

SRS B, Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de llantas usadas de carácter colectivo, con cobertura en la ciudad de Bogotá con más de 90 empresas asociadas	Actor Especializado	Gerente
Gestor A: empresa dedicada a disposición final de llantas usadas por proceso de pirólisis; transformándolas en crudo ecológico, carbón negro, chatarra de alambre y negro de humo.	Actor Especializado	Gerente propietario
Gestor B: empresa dedicada a disposición final de llantas usadas por proceso de trituración mecánica; transformándolas en gránulo de caucho reciclado, alambre y fibra textil.	Actor Especializado	Gerente propietario
Gestor C: empresa dedicada a disposición final de llantas usadas por proceso de trituración mecánica; transformándolas en gránulo de caucho reciclado, alambre y fibra textil.	Actor Especializado	Gerente propietario
Gestor D: empresa dedicada a disposición final de llantas usadas por proceso de trituración mecánica; transformándolas Chip TDF para combustión.	Actor Especializado	Gerente
Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos	Actor relacionado	Coordinador de Subdirección de Recolección, Barrido y Limpieza
Secretaría Distrital de Ambiente - Alcaldía Mayor de Bogotá	Actor relacionado	Subdirección de Control Ambiental al Sector Público
Autoridad Nacional de Licencias Ambientales	Actor relacionado	Apoyo administrativo en Subdirección de Instrumentos, Permisos y Trámites Ambientales

Fuente. Elaboración propia

A través de instrumentos como entrevistas semi-estructuradas, se logró identificar la estructura operacional y legal del sistema actual. Al respecto, Chacón Vargas y Moreno Mantilla (2016) mencionan que la entrevista es uno de los métodos más utilizados y útiles en estudios cualitativos para recoger datos primarios. El apéndice 1 relaciona los cuestionarios base sobre los que se desarrollaron las entrevistas, las cuales permitieron tener un acercamiento directo con los entrevistados, aportando flexibilidad para captar sus opiniones y sensaciones frente al tema propuesto.

A partir de la información recolectada, en la fase (ii) se realiza la formulación dinámica del sistema actual desde un enfoque cualitativo, obteniendo como resultado un diagrama causal que representa las variables, parámetros y relaciones existentes entre los actores

involucrados y que pueden llegar a constituir barreras de entrada al sistema. La estructura de un sistema bajo un modelado de DS se describe utilizando bucles causales o diagramas de influencia. Un diagrama causal consiste en variables conectadas por flechas que denotan las influencias causales entre las variables generando ciclos causales, los cuales son: de retroalimentación (refuerzo) o retroalimentación negativa (balance) Georgiadis y Vlachos (2004).

El análisis cualitativo del modelo desarrollado en las fases (i y ii) se desarrollan en el capítulo 2.

La fase (iii) inicia con el análisis cuantitativo del modelo DS, en ella se formula el modelo de simulación de niveles y flujos; las variables de nivel representan los inventarios en el sistema, las variables de tasa representan los flujos y las variables auxiliares alimentan valores al sistema. Este modelo recoge los criterios de decisión previamente definidos, y a través de la formulación matemática permitirá la simulación del sistema. Shannon (1988), define la simulación como el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos para el funcionamiento del sistema.

En la fase 4, Se realizan las pruebas y análisis de sensibilidad del modelo propuesto. A partir de las ecuaciones que componen el modelo matemático, se evalúa el comportamiento o evolución del sistema a lo largo del tiempo incluyendo posibles escenarios de intervención que mejoren la situación problemática identificada. “En la medida en que el modelo es correctamente validado, puede afirmarse que éste representa adecuadamente el comportamiento del sistema, garantizándose de este modo su utilidad como instrumento de ayuda para la gestión del sistema” (González y Múgica, 1998, p.20)

El modelo fue representado y simulado su comportamiento en un periodo de tiempo de 10 años haciendo uso del software de simulación Vensim 7.3. los resultados de las fases cuantitativas (iii y iv) son descritas en el capítulo 3.

2. Capítulo

Sistema de Logística Inversa de Llantas Usadas en la ciudad de Bogotá D.C.

Modelo de Dinámica de Sistemas

Cristina Ramírez¹, Joan Paola Cruz, Enrique Romero
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Abstract—La logística inversa representa una estrategia clave para las compañías que requieren explorar alternativas para recapturar valor de los productos que han quedado fuera de uso en algún punto de su cadena de suministro y a su vez hacer frente a las exigencias gubernamentales y sociales frente al cuidado del medio ambiente. Sin embargo, no es una tarea sencilla de llevar a cabo, pues requiere la sincronización de múltiples factores para canalizar un nuevo flujo en sentido inverso en la cadena. El presente artículo, identifica de manera cualitativa, a través de un modelo de dinámica de sistemas las variables que intervienen en el comportamiento actual del sistema de logística inversa para llantas usadas en la ciudad de Bogotá, en función de reconocer barreras de entrada que puede experimentar una Pyme al participar en él. Finalmente se discuten los comportamientos dominantes del sistema y posibles estrategias para su intervención.

Keywords— dinámica de sistemas, logística inversa, pos-consumo, transporte, llantas fuera de uso, PyMEs.

I. INTRODUCCIÓN

La generación de residuos es una acción ineludible en el desarrollo cotidiano de los seres humanos; el aumento de la densidad poblacional, los hábitos de consumo, el desarrollo económico y tecnológico, guardan una relación directamente proporcional al volumen de basuras generadas.

Según el estudio del Banco Mundial y el Departamento Nacional de Planeación de 2015, citado en el documento

Compes 3874 [1], en Colombia se generan 11,6 millones de toneladas de residuos al año y solo se recicla el 17%. Solo en Bogotá, se generan 7.500 toneladas al día y se reciclan entre 14% y 15%. El diagnóstico revela que la disponibilidad de suelos para efectuar la disposición final no está acorde con la creciente generación de residuos, por tanto: “si se continúa con la misma dinámica de generación de residuos, sin adecuadas medidas para mejorar su aprovechamiento o tratamiento, y con patrones de producción y consumo insostenibles, en el año 2030 tendremos emergencias sanitarias en la mayoría de ciudades del país y una alta generación de emisiones de GEI” [1].

Para hacer frente a esta situación, en Colombia a través del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) [2] se estableció una Política Nacional de pos consumo, con la cual se busca gestionar el retorno de productos fuera de uso (PFU) para su posterior tratamiento, reutilización, aprovechamiento, valorización y reciclaje. En el caso de las llantas fuera de uso: la Ley 2811 de 1974, la Resolución 1326 del 2017 (anterior Resolución 1457 de 2010), la Resolución 6981 de 2011 y Decreto 442 de 2015, establecen la estructuración de mecanismos que den respuesta al problema técnico, económico, ambiental y de salud pública que representa la disposición inadecuada de este producto. Sin embargo, pese a que se cuenta con una amplia legislación en materia ambiental, los resultados no han sido los esperados. Aún

¹ Cristina Ramírez Meneses, Candidata a magister Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia, cristina.ramirez@mail.escuelaing.edu.co
Joan Paola Cruz González, Directora del Centro de Estudios de Sistemas de Gestión, Profesor de Planta. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. joan.cruz@escuelaing.edu.co
Enrique Romero Motta, Profesor. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. e.romero@escuelaing.edu.co

existen empresas que desconocen o no cumplen a cabalidad lo dispuesto en la normatividad.

La implementación de sistemas de logística inversa es considerada a nivel mundial como una ventaja competitiva, dados los beneficios legales, económicos y sociales que representa para la organización [3],[4],[5],[6]. No obstante, en Colombia la implementación de sistemas de logística inversa no es una característica destacada en gran parte de las empresas nacionales. La tendencia, al igual que ha sucedido en Europa, es que a largo plazo la normatividad sea cada vez más rigurosa y contemple más aspectos y sectores; en función de incentivar el desarrollo sostenible y la competitividad [4].

La configuración de sistemas de logística inversa debe ser un ejercicio que alinee los objetivos empresariales con los gubernamentales. Pues existe un alto grado de incertidumbre y riesgo, en el que las empresas deben tomar decisiones enfocadas no solo en función de validar el cumplimiento de la normatividad, sino también reconocer otras variables que generan causas y efectos que impactan en la eficiencia de la cadena de suministro [7].

Es por esto que se hace necesario contar con herramientas para comprender la magnitud del sistema y estudiar su comportamiento en diversos escenarios a través del tiempo. La Dinámica de Sistemas (DS), es una de las metodologías que ha demostrado gran utilidad para el diseño de redes de logística inversa. A través de ella se logra comprender y analizar la evolución de sistemas complejos, no lineales, naturales, técnicos, organizacionales y de gran escala, como el tratado en este estudio [8], [9],[10],[11].

Flórez, Toro, y Granada [12], proponen un modelo de programación multi-objetivo con algoritmos genéticos: *Multi-objective genetic algorithm* (MOGA), para la configuración de la red de logística inversa en las ciudades de Pereira y Dosquebradas evaluando los beneficios económicos, sociales y ambientales. Camargo, Franco, Chud y Osorio [13], realizan un modelo de DS que permite evaluar el impacto ambiental generado por la logística inversa de las llantas para automóviles; en función de las emisiones generadas por la producción de llantas nuevas, el reencauche, la trituración mecánica y el co-procesamiento.

Los resultados de estos estudios inciden en la fase de clasificación; en la que se decide qué hacer con el producto (reparación, canibalización, reutilización, reciclaje, confinación) y cómo recolectarlo [14]. Sin embargo, existe una fase previa en la que la organización debe entender la magnitud del sistema, identificar las barreras de entrada y tomar decisiones del por qué y cómo diseñar o participar en un sistema de logística inversa.

En la revisión de la literatura se encontró que en la mayor parte de los estudios no se explora a profundidad esta fase,

concentrándose principalmente en las alternativas de aprovechamiento, su impacto ambiental y la operación logística de recolección y almacenamiento. Por lo tanto, se detectó la oportunidad para la presente investigación de generar un modelo que facilite a las Pymes la comprensión del sistema real y el diseño de políticas ambientales en sus organizaciones que respondan a criterios de sostenibilidad gubernamentales y la rentabilidad de la organización.

II. LOGISTICA INVERSA

En los últimos años, la estructura y administración de la cadena de suministro (SCM, por sus siglas en inglés) han ido evolucionando y adaptándose a nuevas condiciones del entorno. Los mercados cada vez más globales y competidos, han hecho que los aspectos logísticos en una organización cobren cada vez más importancia [15],[16],[17].

Es así como la concepción tradicional de la cadena de suministro definida como: una red de organizaciones relacionadas de manera directa o indirecta para llevar bienes o servicios desde las fuentes de materia prima hasta el consumidor final, con valor agregado y satisfaciendo los requerimientos establecidos, de la forma más eficaz y eficiente posible [18],[19],[20],[21],[22]; amplía su alcance, cuando surgen interrogantes como: ¿qué sucede cuando un producto ha perdido valor en algún punto de la cadena de suministro?, ¿quiénes son responsables de la correcta disposición de los residuos industriales generados en los procesos desarrollados a lo largo de la cadena de suministros?, ¿es posible recuperar valor de los PFU?. Desde esta perspectiva se evidencia una demanda de bienes y servicios cada vez más ligados al comportamiento medio ambiental de las empresas y el desarrollo sostenible.

En la actualidad factores como: el agotamiento de los recursos naturales, las fluctuaciones en los precios de las materias primas, y la necesidad de proteger el medio ambiente frente a los efectos del cambio climático, están obligando a las empresas a reconsiderar sus modelos comerciales y reestructurar sus cadenas de suministro para ser más sostenibles [23]. Este hecho redefine los parámetros de diseño y análisis de la misma, conduciendo a que se evalué como un conjunto sistémico y no desde procesos individuales. Estudios [24],

[25],[26],[27],[28],[29] señalan que, para lograr soluciones realmente sostenibles, una cadena de suministro debe ser diseñada bajo criterios económicos, ambientales y sociales, tales como: la creación de empleo, el bienestar social, el rendimiento energético o consumo de recursos. A medida que aumenta la preocupación por el medio ambiente, las empresas deben tener más en cuenta los costes externos de la logística asociados

principalmente al cambio climático, la contaminación atmosférica, el ruido, las vibraciones y los accidentes [30]. Los consumidores esperan que los productores implementen sistemas de logística inversa a través de los cuales los PFU sean retornados a la cadena, para su procesamiento, recuperación y/o disposición responsable con el medio ambiente [31].

Desde esta perspectiva la “Logística Verde”, es un concepto que incorpora aspectos ambientales en todas las actividades logísticas tradicionales del productor al consumidor, tales como: el consumo de los recursos naturales no renovables, las emisiones al aire, la congestión y el uso de carreteras, el ruido y la eliminación final de residuos peligrosos y no peligrosos [3]. En términos generales, comprende la planificación, control e implementación de procesos logísticos para entregar productos y servicios de una manera amigable con el medio ambiente, la sociedad y con eficiencia económica [32],[33].

La logística verde es relativa a conceptos como: logística inversa y cadenas de ciclo cerrado, los cuales se concentran en mitigar los daños ambientales a través de la gestión de los flujos de mercancías hacia adelante y hacia atrás entre actores de la cadena de suministro. La logística inversa es la estrategia encargada de “planear, implementar y controlar efectiva y eficientemente el flujo de materias primas, inventario de productos en proceso, productos terminados e información relacionada desde el punto de consumo hacia el punto de origen, con el propósito de recapturar valor o dar una disposición apropiada” [28].

La cadena de suministro de ciclo cerrado se define cuando los bucles de flujo de producto son cerrados reutilizando el producto en sí mismo, sus componentes o sus materiales son devueltos de nuevo a la cadena [35]. Tanto la logística inversa como la cadena de ciclo cerrado tienen un gran impacto para el ambiente reduciendo la eliminación de PFU en vertedero.

A diferencia de la logística verde que se extiende a lo largo del ciclo de vida del producto, la logística inversa enfoca sus procesos al manejo de productos al final de su vida útil o aquellos que son devueltos porque perdieron valor en algún punto de la cadena, y es posible capturar valor de estos o se requiere disponerlos adecuadamente [36]. Sin embargo, esta labor representa un problema complejo y en ocasiones poco atractivo para las organizaciones, dados los altos costos logísticos en los que se incurre para el desarrollo de las operaciones de retorno y disposición final de los PFU [26], no necesariamente todas las prácticas ambientales traerán ahorros de costos, algunas pueden de hecho llegar a aumentarlos, especialmente en el corto plazo [23]. Es así como la logística inversa se convierte en una estrategia de

alineación entre los objetivos gubernamentales y organizacionales.

III. SISTEMA DE LOGISTICA INVERSA DE LLANTAS

La llanta es definida como: “aquel elemento mecánico hecho de caucho, químicos, lonas, acero y otros materiales, el cual cuando está montada en un rin, suministra tracción al vehículo y contiene el aire, gas o fluido que sustenta la carga del vehículo”[37]. Estas a su vez, influyen de manera decisiva en la seguridad, maniobrabilidad, manejo general del vehículo, pues forman parte de los sistemas de suspensión, frenos y dirección, incluso pueden llegar a afectar el consumo de combustible [38].

La fabricación de una llanta requiere de más de 200 componentes diferentes (ver tabla 1), más del 85% del producto está compuesto por: caucho, acero y negro de humo; elementos que representan un objetivo clave en la recuperación de materiales una vez la llanta se convierte en un producto fuera de uso.

Tabla 1. Composición de las Llantas

COMPONENTES	TIPO DE VEHICULO		FUNCIÓN
	Automóviles % en peso	Camiones % en peso	
Caucho	48	45	Estructural, deformación
Negro de humo	22	22	Mejora oxidación
Óxido de Zinc	1.2	2.1	Catalizador
Material textil	5	0	Esqueleto estructural
Acero	15	25	Esqueleto estructural
Azufre	1	1	Vulcanización
Otros	12		Juventud

Fuente: Material y compuestos para la Industria del Neumático (2008)

Con respecto al impacto medioambiental que produce una llanta a lo largo de su ciclo de vida; es importante mencionar, que en la fabricación de este producto se compromete el uso de recursos no renovables como el agua y el petróleo, por ejemplo, para la fabricación de una llanta de camión se requiere de aproximadamente 141.5 litros de petróleo y 7500 litros de agua. El 96% de la huella de carbono de este producto se genera en la etapa de uso, pues las emisiones son producto de la resistencia

a la rodadura, efecto que puede ser controlado a través de acciones de mantenimiento, maniobrabilidad del vehículo y condiciones de infraestructura vial [39].

En Colombia a través del Código Nacional de Tránsito Terrestre - Ley 769 de 2002 (Título II: Régimen Nacional de Tránsito, Capítulo VIII. Revisión art. 50 y art. 51), se establecen las condiciones mecánicas y de seguridad de los vehículos, así como su revisión técnico-mecánica, para garantizar la seguridad de los actores de movilidad en el país [40]. A partir de los parámetros establecidos explícitamente en la NTC 5375 Numeral 6.11, y la Resolución No.3027 del 26 de julio de 2010, por la cual se actualiza la codificación de las normas de tránsito, se adopta el Manual de Infracciones y se establecen otras disposiciones: la profundidad del labrado de la llanta en servicio no puede ser menor a 1.6 mm en vehículos de peso bruto vehicular inferior a 3,5 toneladas y menor a 2 mm para vehículos igual o mayor a 3 toneladas, no debe presentar despegue o rotura en las bandas laterales, protuberancias, deformaciones, despegue o rotura en la banda de rodamiento. De presentarse estas condiciones la llanta es considerada como fuera de uso.

A partir de este momento la llanta se convierte en un residuo de difícil degradación, el cual, sin una adecuada disposición y tratamiento genera efectos negativos al medio ambiente. Este residuo no es considerado un material peligroso, pero sí voluminoso y pesado; lo que hace que los procesos de recolección, almacenamiento y transporte se vuelven más complejos y costosos.

El aprovechamiento de las llantas fuera de uso tiene múltiples aplicaciones a nivel mundial, sin embargo, dependerá del nivel de tecnología e infraestructura con la que se cuente, y el desarrollo del mercado para productos recuperados.

En Bogotá, actualmente existen principalmente tres cadenas de aprovechamiento final del residuo como lo son:

- **Reencauche:** es un proceso mediante el cual se coloca una banda de rodamiento a una carcasa de una llanta usada, generando su reutilización una o más veces. Esta práctica se encuentra regulada mediante la Resolución 0481 de 2009, por la cual se expide el Reglamento Técnico para llantas neumáticas que se fabriquen, importen o se reencauchen y se comercialicen en el país, en ella se exige el cumplimiento al proceso de reencauche de acuerdo con lo establecido en la NTC-5384 [41]. Según la Asociación colombiana de reencauchadores de llantas y afines (ANRE), si el transportador de carga sigue un buen plan de reencauche, puede ahorrar hasta un 48% en costos, comparando la compra de un juego de llantas nuevo [42], pues la llanta reencauchada cuesta menos y rinde lo mismo que una llanta nueva.

El reencauche es una práctica corriente en empresas de transporte de carga y pasajeros, pues dada la estructura en los diferentes tipos de llantas, sólo es posible reencauchar llantas de tipo OTR (Off The Road) para buses y camiones y desde rin 15 de camioneta en llanta radial LT (Light Truck) [43].

- **El aprovechamiento térmico o coprocesamiento:** es una de las opciones más importantes en la cadena, pues demanda mayor cantidad de residuo, con una utilización del residuo de un 71,9% aproximadamente [44]. Este proceso consiste en utilizar en los hornos cementeros el poder calorífico de la llanta para producir energía y en la incorporación del acero en el Clinker obtenido, controlando debidamente las emisiones atmosféricas. (Sistema Verde es una empresa de gestión de este residuo para tales fines).
- **La trituración mecánica:** en este proceso se emplean cuchillas, clasificadores neumáticos y magnéticos para desmenuzarla llanta y lograr separar el caucho, de la fibra textil y el acero presentes en el producto. “La mayor ventaja de este proceso es que se obtienen productos de buena calidad en un reducido número de etapas de proceso; adicionalmente no se requiere de etapas de purificación ya que no se emplean sustancias ajenas a las llantas” [44]. Los productos obtenidos sirven como materias primas para alimentar otras cadenas productivas.

Actores involucrados en la red de logística inversa de llantas usadas

La logística inversa parte de la existencia de una cadena de suministro, en la cual un sistema de logística directa ha puesto a disposición de los actores involucrados productos nuevos, los cuales una vez hayan perdido valor, la logística inversa despliega estrategias de recolección, almacenamiento, transporte, tratamiento o disposición final, con el objetivo recuperar valor de estos materiales, o disponerlos adecuadamente.

En la red de logística inversa, participan diferentes actores con funciones, responsabilidades y niveles estratégicos que permiten lograr sus objetivos, alcanzar beneficios potenciales y ejecutar los diversos procesos involucrados al mínimo costo y con niveles adecuados de desempeño [6].

Dekker [6],[45] clasifica los actores involucrados en la red inversa como: (i) Principales: los productores y actores responsables de la recuperación del producto, (ii) Especializados: aquellos actores que ejecutan los procesos específicos de la logística inversa tales como: transporte, almacenamiento, recicladores, operadores de

reprocesamiento o eliminación del residuo, (iii) Relacionados: son organizaciones gubernamentales y no gubernamentales ambientalistas, entre otras que afectan la logística inversa de la cadena de suministro.

A continuación, se describen los actores involucrados en la red de logística inversa para llantas usadas en la ciudad de Bogotá.

Actores principales

La Resolución 1326 de 2017 del 13 de Julio del 2017 [46], define a los productores de llantas fuera de uso como toda persona natural o jurídica que, con independencia de la técnica de venta utilizada:

“a) Fabrique llantas que sean puestas en el mercado nacional con marca propia.

b) Ponga en el mercado con marca propia, llantas fabricadas por terceros.

c) Importe llantas para poner en el mercado nacional.

d) Importe vehículos con sus llantas, para poner en el mercado nacional.

e) Ensamble vehículos que sean puestos en el mercado nacional siempre y cuando importe las llantas para los mismos.” (Resolución 1326 de 2017, art.4, 4 p.)

Estos actores están obligados a formular, presentar, implementar y mantener actualizado un Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas (SRS) ante la Autoridad de Licencias Ambientales (ANLA), esta acción puede realizarse de manera individual o colectiva, según la estructura orgánica de la(s) empresa(s), estrategias de mercado, mecanismos de distribución y comercialización, cobertura geográfica, entre otros.

Actores especializados

Operadores logísticos de recolección: empresas encargadas de la disposición de vehículos para transportar la llanta fuera de uso de un eslabón de la cadena de suministro inverso a otro. Actualmente en Colombia el transporte de este material es uno de los procesos logísticos que generan mayor costo en la operación de los sistemas debido a su difícil compactación y la descentralización de la operación.

La recolección dependerá de los nodos de almacenamiento, es decir la localización de los depósitos temporales de llantas usadas desechadas por el consumidor, cuya recolección y gestión se encuentren enmarcadas en un SRS, en un lugar acondicionado para tal fin, de manera segura y ambientalmente adecuada. En Bogotá quien desempeña este rol son los centros de venta y servicio mantenimiento de vehículos en donde el cliente realiza el cambio de sus llantas.

Gestores de aprovechamiento y valorización: empresa que lleve a cabo operaciones con llantas fuera de uso y

tiene las autorizaciones administrativas correspondientes por parte de las comunidades autónomas en las que opera cumpliendo con la legislación ambiental vigente, para transformar las llantas usadas en materiales materia prima para la fabricación de nuevos productos, el uso del potencial como fuente alterna de energía o destinarlas a los mismos fines a los que se destinaban originalmente mediante el reencauche.

Actores Relacionados

Entes Reguladores: principalmente el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS y Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA.

Cliente y/o Cadenas emergentes: persona natural o jurídica que realiza la transacción comercial para adquirir los productos generados del aprovechamiento y reciclaje de llantas fuera de uso.

IV. DIAGRAMA CAUSAL DEL SISTEMA DE LOGISTICA INVERSA ACTUAL

El modelo propuesto en la figura 1, muestra la relación entre los factores que intervienen actualmente en la logística inversa de llantas usadas en la ciudad de Bogotá. En este estudio se incluyen únicamente los actores y procesos asociados a llantas de automóviles, camiones, camionetas, buses, busetas y tracto- camiones hasta rin 22,5 pulgadas.

A partir de la revisión literaria y entrevistas desarrolladas a los actores involucrados: productores, recolectores, gestores de aprovechamiento, y entes reguladores, se logró identificar la estructura del sistema desde que se introducen llantas nuevas al mercado, hasta cuando son transformadas en materiales disponibles en mercados para nuevas cadenas productivas.

Para la gestión de este residuo se resalta la legislación vigente con la que se exigen el desarrollo de estrategias por parte de los productores para la recolección selectiva y gestión ambiental del producto. La primera alternativa para la recuperación de valor del producto en el sistema de logística inversa, es el proceso de reencauche, a través de este se logra extender la vida útil de la llanta para que pueda ser incorporada nuevamente a su cadena productiva y cerrar el ciclo. Sin embargo, esta opción tiene un límite de veces que se puede realizar; es por ello, que se articulan otras alternativas de aprovechamiento como: el coprocesamiento, la trituración mecánica, la pirolisis, usos artesanales, entre otros, por medio de las cuales se pueda extraer materiales del producto que sirven como materias primas e insumos en otras cadenas productivas.

No obstante, la dinámica del mercado para productos recuperados no presenta una sincronización con la generación de llantas usadas, situación que condiciona la participación de los gestores en la red inversa.

A continuación, se describe el comportamiento de los ciclos que conforman el modelo, así como los hallazgos resultados de su análisis.

Subsistema de Demanda de Llantas

La movilidad urbana se refiere a la totalidad de desplazamientos que realizan las personas en una ciudad. En Bogotá, según la encuesta de movilidad 2015, en un día hábil se desarrollan 17'251.731 viajes, de los cuales: 32,3 % son realizados a pie y un 67,7% son realizados en medios motorizados (transporte público, vehículo propio, motocicletas y bicicletas) [47]. A medida que las personas requieren más desplazamientos en la ciudad y cuentan con mayor poder adquisitivo, generan un efecto en el crecimiento del parque automotor. En la capital, en el año 2013 se tenían registrados 1.894.674 vehículos y al 2015 el registro ascendió a 2.148.541 vehículos con tendencia al aumento.

La circulación de vehículos guarda una estrecha relación con la dinámica del mercado de llantas, pues son quienes requerirán llantas nuevas, cada vez que estas cumplan su ciclo útil (cada 18 a 24 meses). El ciclo de refuerzo R1 muestra cómo el aumento en la demanda de llantas nuevas genera mayor producción de este producto (importación en la mayoría de los casos en Colombia) los cuales una vez son vendidos y puestos en circulación se convertirán con el tiempo en residuo de llantas fuera de uso.

El precio y la calidad son factores que guardan una estrecha relación con la generación de Llantas fuera de uso; por un lado, las llantas de menor precio resultan atractivas para el cliente en la decisión de compra, pero tienden a tener una menor duración, lo que aumenta la frecuencia del residuo; mientras que las llantas de más duración implican una mayor inversión para el cliente, pero con beneficios adicionales. Actualmente, el mercado presenta una tendencia fuerte hacia productos del segmento económico (marcas de nivel 2 y nivel 3) provenientes principalmente de China, India y Corea. Según cifras de la Dirección de Impuestos y Aduana de Colombia DIAN, en el 2017 ingresaron a Bogotá 2.387.058 llantas de las cuales el 47,3% proceden de estos países, representando una proporción importante en el mercado que compite fuertemente con las marcas de gran reconocimiento y mayor costo (nivel 1).

Con respecto al control de la información de las llantas que ingresan al país, salvo algunas excepciones, estas deben ser declaradas ante la autoridad competente. De acuerdo con lo estipulado en el Decreto 3803 de 2006: toda solicitud de registro y licencia de importación deberá realizarse a través de la Ventanilla Única de Comercio Exterior – VUCE. Esta herramienta permite a las entidades administrativas compartir información para eliminar redundancia de procedimientos e implementar controles eficientes y promover actuaciones administrativas transparentes [48]. La VUCE es la fuente de información principal con la que se realiza la validación y seguimiento a las empresas que deben presentar un SRS para las llantas que ingresan al territorio nacional.

Sin embargo, existe un ingreso de llantas No declarado; bien sea por casos en que la ley lo excluya de registro o licencia de importación, o en el caso más crítico por ingresos que evaden la responsabilidad legal. Este último ha tenido un crecimiento importante, el ciclo de refuerzo R2 muestra cómo el aumento en la demanda de llantas nuevas ha incentivado también que llantas de contrabando y hurtadas, sean vendidas y puestas en circulación, las cuales posteriormente se convertirán en residuos de llantas fuera de uso, sin control en el plan post consumo; según cifras del MADS en Bogotá se generan más de tres millones de llantas usadas anualmente, de las cuales cerca del 30% son dispuesta de manera inadecuada [49].

Subsistema del Rencauche

A medida que se van generando llantas fuera de uso, aumenta la demanda de servicios de rencauche (en Colombia para las llantas utilizadas en vehículos de carga). Esta alternativa permite recuperar el valor de la llanta extendiendo su vida útil hasta 4 veces (dependiendo del estado de la carcasa), obteniendo un producto de igual rendimiento al nuevo, a un menor costo.

Sin embargo, la calidad y seguridad de una llanta rencauchada, únicamente se obtiene de aquellos procesos que han sido certificados para tal fin. La Resolución 0481: 2009, emitida por el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, por el cual se expide el reglamento técnico para llantas neumáticas que se fabriquen, importen o reencauchen y se comercialicen para su uso en vehículos automotores y sus remolques; exige a las empresas rencauchadoras cumplir con los parámetros establecidos en la norma técnica colombiana NTC 5348 [41], pues se trata de un producto que de no ser tratado bajo estrictos

parámetros técnicos pone en riesgo la vida de las personas.

Por lo anterior, se identifica un subsistema del rencauche en el ciclo de demanda de llantas. El ciclo de refuerzo R3 muestra cómo a medida que existen más llantas fuera de uso, aumenta la demanda de servicios de rencauche, y por ende su producción y venta. Sin embargo, al cabo de un tiempo se convierten en residuo nuevamente, pese a que es un proceso que reduce la cantidad de residuo por un tiempo generando un balance B1 temporal.

La demanda de llantas de bajo costo (nivel 2 y 3), genera un impacto negativo, sobre la demanda de servicios de rencauche, pues el cliente tiende a optar por comprar una llanta nueva, en lugar de rencaucharla cuando no percibe ahorros a corto plazo, como se muestra en los ciclos de balance B5 y B6.

No obstante, la demanda de este tipo de procesos ha generado que sitios que no cumplen con los parámetros técnicos, e incluso algunos sitios clandestinos oferten llantas rencauchadas o regrabadas a un menor precio; hecho al que un usuario desconociendo el riesgo al que se expone, termina comprando y fomentando este tipo de productos. Es así como se evidencia efecto paralelo en los ciclos R4 y B2.

En los ciclos de balance B3 y B4, se identifica cómo el rencauche es la primera alternativa para reducir en una proporción la importación masiva de llantas nuevas al país, retrasando de 2 a 3 años la compra del producto nuevo.

Subsistema Generación de Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas (SRS)

Los artículos 79 y 80 de la Constitución Política “consagran el derecho colectivo a gozar de un ambiente sano y el deber del Estado de proteger la diversidad e integridad del ambiente, planificando el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales renovables a fin de garantizar su desarrollo sostenible, conservación, restauración o sustitución y prevenir los factores de deterioro ambiental” [46]. A partir de esto, se establecen políticas públicas que promueven la obligatoriedad y coordinación de actores para llevar a cabo tal fin (artículo 38 del Decreto -ley 2811 de 1974). El MADS, facultado para determinar las normas mínimas y las regulaciones de carácter general sobre medio ambiente (numeral 10 y 14 del artículo 5° de la Ley 99 de 1993), expidió la Resolución 1326 de 2017, por medio de la cual se establece la obligatoriedad de los productores de llantas

de formular, implementar y mantener actualizado un SRS, abalado y vigilado por el ANLA [46]. Este hecho genera una necesidad mayor por parte de los productores de participar en dichos sistemas; bien sea optando por la constitución de un SRS individual o participando en uno colectivo.

En un SRS individual la responsabilidad legal, económica y operativa, recae exclusivamente en el productor; mientras que en un SRS colectivo las empresas asociadas pueden delegar parte de la actividad administrativa sobre una persona jurídica creada con este fin; se establecen acuerdos de participación y ejecución del sistema, haciendo que los costos de recolección y gestión sean menores para el productor por economías de escala, como se muestra en el ciclo de refuerzo R5. Este hecho lo convierte en una alternativa atractiva para los productores que desconocen el potencial de la logística inversa de este producto en su empresa, o no le interesa invertir en un sistema, para el cual no tiene un mercado desarrollado. La contribución que recibe este de un SRS colectivo es una certificación que indica el número de sus llantas que están siendo recolectadas y aprovechadas de manera adecuada.

Por otra parte, los productores que han decidido realizar un SRS individual, con el tiempo pueden percibir mayores beneficios y valor agregado a su negocio con estrategias de integración vertical, teniendo un mayor control en el ciclo de vida de su producto. Existen casos en el que el productor puede generar mejores acuerdos de negociación con su cliente, vende la llanta nueva, presta el servicio de rencauche las veces que sea posible y posteriormente transforma el PFU en materias primas que vende en nuevas cadenas productivas. Sin embargo, los costos del sistema los asume exclusivamente el productor, haciendo menos atractiva esta alternativa cuando no se conoce bien el sector o se cuenta con poco capital para financiar el sistema, como se muestra en el ciclo de balance B7.

Otro aspecto que influye en la participación de los productores en SRS es la imagen corporativa. Si el cliente toma mayor conciencia, frente a la importancia de disponer adecuadamente los PFU y de la Responsabilidad Extendida del Productor, aumentará la exigencia en el momento de tomar la decisión de compra, prefiriendo a aquellos que le garanticen cumplir con lo estipulado en la normatividad y contribuyan al mejoramiento del medio ambiente. Este hecho se traduce en que el productor sienta mayor necesidad de participar en un SRS, mejorando su imagen y participación en el mercado que con el tiempo puede llegar a representar un aumento en la venta de llantas y otros beneficios (ciclos B10 y R8).

Subsistema de Seguimiento y Control

Los datos consignados en VUCE permiten mayor control de la información, con la que el ANLA desarrolla su función de ente de vigilancia y control de los SRS. En el ciclo de balance B8 se muestra que a medida en que más empresas radiquen sus SRS ante el ANLA para que este apruebe su gestión, se podrá contar con más información para realizar el seguimiento y evaluación a las empresas que están obligadas a cumplir con lo estipulado en la Resolución y así desarrollar mayores acciones de control que con el tiempo reducen la evasión en este sector. Sin embargo, un aumento en el número de SRS aprobados, implica un requerimiento mayor en la capacidad operativa del ANLA para vigilarlos (ciclo de balance B10). Por otra parte, tener mayor control de la información, pone en evidencia aquellos productores no vinculados a los SRS (ciclo B9) y aquellos SRS que estén evadiendo su responsabilidad frente a esta problemática. De esta manera se logra ejecutar sanciones por parte de las autoridades competentes que disminuyan la evasión que disminuye la necesidad de participar adecuadamente en un SRS (ciclos R6, R7).

Subsistema de Recolección

En el ciclo B12 se identifica que la recolección de llantas fuera de uso es responsabilidad en primer lugar de los productores de acuerdo con las metas establecidas en la Resolución 1326 de 2017. En sus SRS coordinan la recolección del producto, por diferentes canales y asignan la disposición en puntos de acopio autorizados. Estos tendrán mayor demanda a medida que el cliente tiene más información y conciencia del proceso. En el ciclo R9 se evidencia que, si existen más llantas en dichos puntos, aumenta la tasa de recolección, haciendo que disminuya el número de producto dispuesto en este lugar.

Por otra parte, el aumento de la evasión, y la demanda de servicios de mantenimiento en lugares informales, genera una disposición mayor de este producto en el espacio público y el relleno sanitario (ciclo B13), exigiendo un aumento en la tasa de recolección.

Subsistema Generación de Gestores

Los gestores de llantas usadas son los encargados de recibir las llantas y transformarlas en material útil que venderán en el mercado y en contrapartida al sistema expedirá el certificado de su gestión. El ciclo de refuerzo R10 muestra que el aumento de empresas productoras vinculadas a los SRS genera la necesidad de contar con mayor capacidad de procesamiento de llantas usadas hasta

equilibrar el sistema, abriendo la oportunidad para los gestores de participar en los SRS.

Sin embargo, el aumento en la demanda de este tipo de servicios también exige más requerimientos técnicos y legales por parte de este actor. Al igual que los productores, los gestores están obligados a inscribirse ante la autoridad ambiental competente, para validar que el desarrollo de sus procesos cumpla con los parámetros técnicos y legales requeridos, lo que representa una mayor inversión, pero se garantiza un aumento en el cumplimiento de los parámetros establecidos; y en consecuencia, existirá mayor vinculación de gestores aprobados y se tendrá más capacidad de procesamiento, lo que disminuye la demanda de este servicio (Ciclo de balance B14).

Por otra parte, es clave mencionar que debe existir una motivación por parte del gestor basado en la rentabilidad del negocio para vincularse en un SRS o invertir en ampliar su capacidad productora (ciclo de refuerzo R11).

Subsistema de aprovechamiento

El aprovechamiento de llantas fuera de uso en la ciudad de Bogotá se enmarca principalmente en las alternativas de: trituración mecánica (ciclo R12), pirolisis (ciclo R13), co-procesamiento (ciclo R14), uso en obras civiles (ciclo R15) y algunos usos artesanales.

Estos mercados son promovidos desde la legislación de aprovechamiento de estos materiales, entre las cuales se destacan: la Resolución 6981 de 2011 con la que se dictaron lineamientos para el aprovechamiento de llantas fuera de uso en la ciudad, el Decreto 442 de 2015 con el que se crea el Programa de aprovechamiento y/o valorización de llantas usadas en el Distrito, y la Resolución 1488 del 19 de diciembre de 2003, en la que se establecen los requisitos, condiciones y límites máximos permisibles de emisión, bajo los cuales se debe realizar la disposición final de llantas fuera de uso en hornos de producción de Clinker de plantas cementeras. Estos lineamientos buscan incentivar el aumento en la demanda de productos recuperados de las llantas en los diferentes sectores productivos en los que se valoriza como materia prima los productos que son recuperados de las llantas usadas.

A medida que la alternativa de aprovechamiento tiene mayor demanda habrá más gestores participando de este mercado. Sin embargo, los gestores se encuentran en un mercado muy competido; la participación de productos importados, los productos informales y el producto virgen (caucho, petróleo, carbón y polímeros), hacen que exista

mayor oferta de material recuperado y virgen, bajando el precio del producto (ciclos R12, R13, R14, R15).

La demanda de material reciclado frente a una materia prima virgen fluctúa principalmente en función de características como: el precio y la calidad. Si el material reciclado ofrece el mismo rendimiento a un menor precio, la demanda aumentará para los materiales recuperados; mientras que, si el precio es superior con menor o igual calidad, el cliente optará por seguir demandado material virgen.

El conocimiento del cliente, frente a los beneficios de comprar material recuperado legalmente a nivel nacional fortalece la cultura del uso de materiales reciclados, aumentando las ventas y el fortalecimiento del sector (ciclos R16 y B16). Por otra parte, es evidente la necesidad de invertir en proyectos de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) en búsqueda de nuevas alternativas de aprovechamiento masivo del residuo, que aumente el procesamiento de llantas usadas para tal fin (ciclo B15).

V. DISCUSIÓN

En el diagrama causal expuesto en la figura 1 se logran identificar 16 ciclos de refuerzo y 16 ciclos de balance en 7 grandes subsistemas que estructuran el sistema de logística inversa de llantas fuera de uso en la ciudad de Bogotá, articulando actores desde la producción, recolección, tratamiento, hasta la valorización del residuo.

A continuación, se discute el comportamiento de cada uno de ellos:

Los subsistemas de demanda de llantas y rencauche están compuesto por diez ciclos de realimentación; cuatro de ellos de refuerzo y seis de balance. Los ciclos R1 y R2 reflejan el comportamiento general del consumidor promedio de comprar llantas nuevas cada vez que éstas han finalizado su vida útil, dominando el comportamiento del sistema

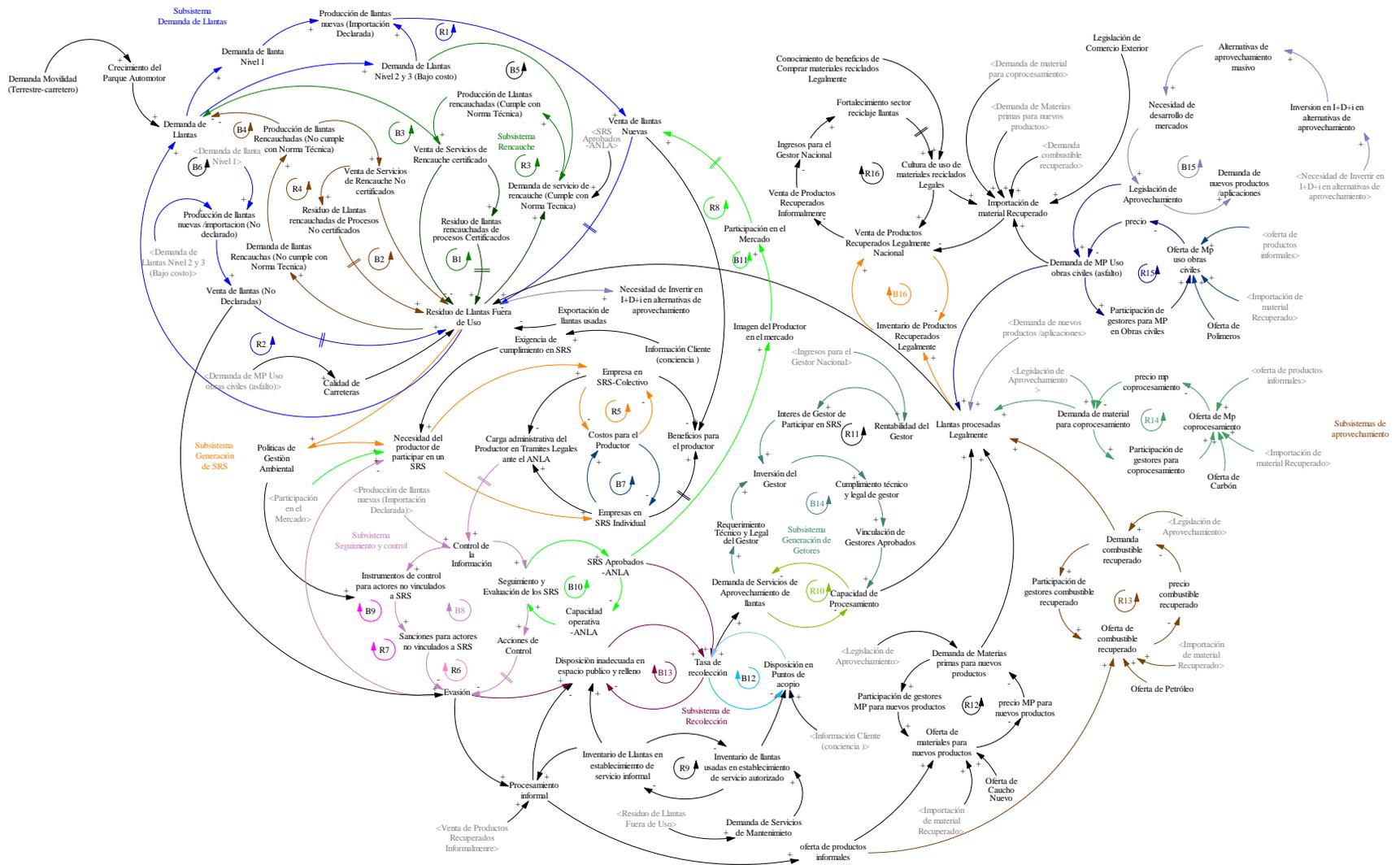


Figura 1. Diagrama causal sistema de logística Inversa de Llantas usadas en la ciudad de Bogotá D.C. Elaboración propia.

Al interior de este subsistema subsisten los ciclos del rencauche R3 y R4 que muestran la producción y venta de este servicio que posibilita prolongar la vida útil de la llanta, visto como la principal alternativa de aprovechamiento del residuo, ya que permite retrasar el ingreso de una parte de llantas nuevas al mercado como muestra los ciclos de balance B3 y B4, y disminuye temporalmente la cantidad de residuo (B1 y B2). No obstante, es importante resaltar que la demanda de servicios de rencauche no se da para todo tipo de llantas, y sumado al crecimiento en los últimos años, de ventas de producto de bajo costo en el país, se evidencia un impacto negativo sobre la demanda de servicios de rencauche (B5 y B6), esta situación refleja una barrera de entrada y permanecía para estos actores en el sistema, sobre la que se propone intervenir a partir de políticas que incentiven a las empresas públicas y privadas a rencauchar sus llantas por lo menos una vez.

- Subsistema de Generación de SRS: a partir de lo anteriormente expuesto, se enlaza el subsistema de SRS, enmarcado en la Resolución 1326 de 2017 descrita anteriormente. En este punto se identifica una barrera de entrada para el productor; pues deberá tomar decisiones en función del costo y la gestión administrativa del sistema, para lograr obtener ingresos a partir de la logística inversa de las llantas que produce. El ciclo de refuerzo R5 refleja cómo cuando un productor que decide hacer un SRS individual, asumirá completamente el costo de recolección, almacenamiento, transporte y gestión del producto, así como su responsabilidad legal y administrativa ante las autoridades competentes. Sin embargo, es quien logra explorar los beneficios de la gestión adecuada de este producto a través de la integración vertical en la cadena de valor. Actualmente la mayor parte de las empresas se inclinan por participar en un SRS colectivo, con el cual logran disminuir sus costos de operación del sistema, participando con un costo fijo por unidad y en algunas ocasiones el transporte hasta las plantas de aprovechamiento, generando el ciclo de balance B7, ciclo que domina el comportamiento del sistema.
- El subsistema de control y seguimiento: permite describir las acciones de seguimiento a los productores inscritos y no inscritos a los SRS. El hecho de dar cumplimiento únicamente a las metas establecidas en la normatividad hace que las empresas vinculadas en SRS colectivo, a futuro sientan ajeno el problema general,

como se muestra en el ciclo de refuerzo R6 el cual domina en el comportamiento del sistema. El obtener el certificado de disposición, le evita sanciones y garantiza que opera correctamente. Sin embargo, esto sólo se hace para un porcentaje del total de producto que puso en el mercado, el restante probablemente es el que queda dispuesto de manera inadecuada en el espacio público y el relleno sanitario. El SRS individual, a futuro podrá ver el sistema más como una fuente de ingresos y beneficios adicionales generando un ciclo de balance B8 al sistema.

Si las autoridades competentes cuentan con más información de los productores vinculados, es posible identificar quiénes aún no participan en los SRS y desplegar acciones pertinentes para disminuir la evasión en este tema y reforzar la necesidad de participar en los ciclos R7 y B9. Sin embargo, la barrera se encuentra en que las acciones de control desplegadas por el ANLA únicamente pueden darse sobre las empresas que declaran llantas (limitada por su capacidad operativa ciclo B10), las demás, deberán ser acciones policivas sobre las que aún no hay claridad.

- Subsistema de recolección: un actor muy importante en el sistema es el distribuidor y comerciante quien está obligado a colaborar en la implementación de los SRS, recibir las llantas usadas, almacenarlas adecuadamente para entregarlas al sistema sin generar ningún costo adicional para el cliente, así como apoyar la gestión de la información, impactando directamente en la eficiencia de la recolección (ciclo B12) cuando las llantas son dispuestas en puntos autorizados para tal fin.

No obstante, este actor debe contar con capacidad de almacenamiento, y condiciones seguras para salvaguardar las llantas usadas mientras son recolectadas, convirtiéndose para algunos en una barrera de entrada al sistema.

Por otra parte, en la ciudad existen lugares como montallantas y centros de servicio no vinculados, a los que el cliente acude para hacer el cambio de sus llantas usadas y que generalmente deja en este lugar (ciclo R9), pasado un tiempo estas llantas son difíciles de almacenar y el establecimiento opta por deshacerse de ellas disponiéndolas de manera inadecuada cuando no conoce la gestión que debe darle a este residuo (ciclo B13), para estos actores se propone una intervención sobre incentivos para que se vinculen a los SRS establecidos .

La recolección es otra barrera de entrada que experimenta una Pyme en el momento de participar en este sistema, pues en primer lugar debe coordinar con el cliente para que entregue las llantas únicamente en puntos autorizados, esta relación está basada en la voluntad de cooperación que tenga el cliente y conocimiento del sistema. Por otra parte, la recolección debe programarse de manera que los vehículos dispuestos para esta actividad sean usados eficientemente en términos de capacidad, pero sin afectar la capacidad de almacenamiento de los establecimientos que las reciben.

- La generación de gestores se basa en la capacidad de aprovechamiento que requieran los SRS como se muestra en el ciclo de refuerzo R10 y el cumplimiento de los requerimientos técnicos y legales que se exigen para su participación formal (ciclo B14). Como se describió en numerales anteriores, el aprovechamiento de llantas está sujeta a la legislación existente, la oferta de producto, la calidad y el precio que refuercen la decisión del cliente de demandar este tipo de productos por encima de los convencionales, como se identifica en los ciclos de refuerzo R12, R13, R14, R15 para las diferentes alternativas existentes.

En Bogotá la mayor parte del material recuperado se destina a la alternativa de coprocesamiento para cementeras, correspondiente al ciclo R14 dominando en el comportamiento, seguido de trituración mecánica en el ciclo R12 para extraer materias primas como caucho y acero para la elaboración de nuevos productos e implementación en obras civiles (ciclo R15). Sin embargo, en los ciclos R16 y B16 se muestra que el desarrollo de una cultura de uso de material reciclado legalmente en el país puede fortalecer o debilitar la participación de los gestores en este sector.

Por último, es importante resaltar el ciclo de balance B15 en el cual se identifica cómo la inversión en I+D+i, es necesaria para el desarrollo e impulso de nuevas alternativas que hagan uso masivo del residuo para aplicaciones en diversos campos. En Colombia no es significativo el apoyo a la investigación focalizada a esta problemática; las aplicaciones existentes son tomadas de modelos tratados en otros países desde hace años. Vale la pena intervenir el sistema a través de la articulación de estrategias entre el Estado, el sector educativo y el sector productivo, para impulsar

proyectos que contribuyan a soluciones más radicales al problema. Estas estrategias pueden aumentar la dominancia de estos ciclos que, aunque están presentes, no logran dominar el comportamiento del sistema, de esta manera se beneficia la ciudad.

VI. CONCLUSIONES

El presente artículo muestra los resultados de la ejecución parcial de un proyecto en curso, en el que se pretende evaluar desde un enfoque de DS las barreras de entrada que experimenta una Pyme en una red de logística inversa de llantas usadas en la ciudad de Bogotá D.C. tanto desde una visión cualitativa como cuantitativa por medio de simulación.

Dada la complejidad que presenta la estructura de la red de logística inversa de las llantas fuera de uso, en el que se tiene un alto grado de incertidumbre y existe una gran cantidad de variables que interactúan determinando causas y efectos de manera no siempre lineal [8],[9],[11],[50],[10]; resulta útil la aplicación de la metodología de DS en este campo, dado que facilita la comprensión del sistema desde una fase preliminar a la de la valorización del residuo (fase en la que ya se han enfocado otros estudios mencionados anteriormente). Por lo tanto, este estudio representa una propuesta innovadora y pertinente para planear acciones de intervención al sistema actual en el que se identifican los roles y/o actores que intervienen en él.

La construcción del diagrama causal descrito anteriormente, permitió identificar desde una visión cualitativa las variables y causalidades que influyen en la configuración de una red de logística inversa de llantas actualmente en la ciudad de Bogotá. Dentro de los aspectos más relevantes se encuentran, el desarrollo e implementación de SRS, basados en la obligatoriedad establecida en la Resolución 1326 de 2017, por lo cual, el productor puede percibir una oportunidad para desarrollar estrategias diferenciadoras y competitivas en el mercado a través de la generación de valor de este producto fuera de uso. Sin embargo, existen variables como el costo de operación del sistema, los requerimientos legales y el desarrollo de mercados atractivos para el material recuperado, que muchas veces son barreras que limitan la participación de la Pyme en el sistema. Como se mencionó anteriormente las empresas tienden a optar por vincularse a SRS colectivos para tercerizar este proceso y obtener como beneficio una constancia de que parte de sus PFU no están siendo dispuestos inadecuadamente.

Implementar y mantener un SRS, requiere de la articulación de varios actores en la red inversa. La recolección es una tarea compleja en la medida que se requiere de la cooperación de distribuidores y establecimientos en los que el cliente retorna la llanta usada. En la actualidad estos actores no tienen un incentivo distinto al de la obligación de apoyar los SRS como lo indica la norma; es por ello, que el productor deberá diseñar estrategias para articular eficientemente estos actores en función del retorno.

La recolección no es la única barrera que presenta el sistema. Una vez la llanta es recuperada, debe tomarse la decisión de qué hacer con ella, qué capacidad y tecnología se requiere para su aprovechamiento y sobre todo lograr equilibrar la tasa de recolección con la tasa de procesamiento jalónada por la demanda del producto recuperado del residuo. Como primera alternativa se halla el rencauche, proceso que permite retornar el producto al sistema productivo para alargar su vida útil varias veces dependiendo del estado de la carcasa. Sin embargo, este proceso no es posible realizarlo a todo tipo de llantas y la demanda de este producto se satisface con un bajo porcentaje del total de residuo generado.

La trituración mecánica, el coprocesamiento y la pirolisis son actualmente las alternativas más implementadas en los SRS, sin embargo, estos mercados son altamente competidos también por productos importados e informales de menor precio, haciendo difícil la permanencia de los gestores formales en el mercado. Este hecho refleja una necesidad de invertir en proyectos de I-D+i que exploren nuevas alternativas de aprovechamiento masivo en búsqueda de equilibrar la generación del residuo con la demanda de materiales recuperados, no solo de la tasa de recolección establecida en la normatividad, sino también fortalecer el sector de reciclaje, para que recolecte las llantas que no son cubiertas por los SRS.

REFERENCIAS

- [1] Conpes 3874, “Política Nacional Para La Gestión De Residuos Sólidos,” Doc. CONPES 3874, p. 73, 2016.
- [2] Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo de Colombia, “Principios De La Gestión De Residuos Posconsumo,” 2017.
- [3] M. P. de Brito and R. Dekker, “A Framework for Reverse Logistics,” *Reverse Logist.*, pp. 3–27, 2004.
- [4] A. Mihi, “Nuevos beneficios de la logística inversa para empresas europeas y colombianas,” *Univ. Empres.*, vol. 6, no. 12, pp. 48–61, 2007.
- [5] D. A. Ramirez Londoño and M. Valencia Tobón, “Modelo de Simulación Continua para la Gestión de la Cadena de Suministros en Productos con Ciclo de Vida Corto,” no. c, pp. 1–46, 2012.
- [6] R. A. G. Montoya, “Logística inversa un proceso de impacto ambiental y productividad,” *Inverse Logist. a Process with Environ. Product. impacts.*, vol. 5, no. 2, pp. 1–14, 2010.
- [7] A. C. Torres, “Importancia de la logística inversa para un desarrollo sostenible en Colombia,” *La Salle*, vol. 6, no. 2, p. 14, 2013.
- [8] H. Akkermans and N. Dellaert, “The rediscovery of industrial dynamics: The contribution of system dynamics to supply chain management in a dynamic and fragmented world,” *Syst. Dyn. Rev.*, vol. 21, no. 3, pp. 173–186, 2005.
- [9] A. Größler, J.-H. Thun, and P. M. Milling, “System Dynamics as a Structural Theory in Operations Management,” *Prod. Oper. Manag.*, vol. 17, no. 3, pp. 373–384, 2008.
- [10] J. D. Sterman, *Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, vol. 6, no. 1, 2000.
- [11] I. Morlán Santa Catalina, “Modelo de Dinámica de Sistemas para la implantación de Tecnologías de la Información en la Gestión Estratégica Universitaria,” p. 396, 2010.
- [12] L. Flórez, E. Toro, and M. Granada, “Diseño de Redes de Logística Inversa: Una Revisión del Estado del Arte y Aplicación Práctica,” *Cienc. E Ing. Neogranadina*, vol. 22, no. 2, pp. 153–177, 2012.
- [13] S. Camargo Rodríguez, J. A. Franco López, V. L. Chud Pantoja, and J. C. Osorio Gómez, “Modelo de simulación dinámica para evaluar el impacto ambiental de la producción y logística inversa de las llantas TT - Dynamic simulation model to evaluate the environmental impact of production and reverse logistics of tire,” *Ing. y Desarro.*, vol. 35, no. 2, pp. 357–381, 2017.
- [14] M. Management, A. Gandolfo, and R. Sbrana, “Reverse Logistics and Market-Driven Management *,” *Emerg. Issue Manag.*, pp. 28–40, 2008.
- [15] M. Christopher, “Logistics and competitive strategy,” *Eur. Manag. J.*, vol. 11, no. 2, pp. 258–261, Jun. 1993.
- [16] J. E. Jiménez and S. Hernández, “Marco conceptual de la cadena de suministro : un

- nuevo enfoque logístico,” *Inst. Mex. del Transp.*, no. 215, pp. 1–272, 2002.
- [17] C. Kirby and N. Brosa, “La logística como factor de competitividad de las Pymes en las Américas,” p. 39, 2011.
- [18] M. Christopher, “Logistics and competitive strategy,” *Eur. Manag. J.*, vol. 11, no. 2, pp. 258–261, 1993.
- [19] S. Chopra and P. Meindl, *Administración de la cadena de suministro - Estrategia, Planeación y Operación*. 2008.
- [20] R. H. Ballou, *Logística Administración de la cadena de suministro*. 2004.
- [21] D. Serra, *La logística empresarial en el nuevo milenio*. Barcelona, 2005.
- [22] D. Servera-Francés, “Concepto y evolución de la función logística,” *Rev. Innovar J. Rev. Ciencias Adm. y Soc.*, vol. 20, no. 38, pp. 217–234, 2010.
- [23] Z. Wu and M. Pagell, “Balancing priorities: Decision-making in sustainable supply chain management,” *J. Oper. Manag.*, vol. 29, no. 6, pp. 577–590, 2011.
- [24] B. M. Beamon, “Supply chain design and analysis: Models and methods,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 55, p. 281 — 294, 1998.
- [25] C. D. R. De Souza and M. D. A. D’Agosto, “Value chain analysis applied to the scrap tire reverse logistics chain: An applied study of co-processing in the cement industry,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 78, pp. 15–25, 2013.
- [26] B. Mota, M. I. Gomes, A. Carvalho, and A. P. Barbosa-Povoa, “Towards supply chain sustainability: Economic, environmental and social design and planning,” *J. Clean. Prod.*, vol. 105, pp. 14–27, 2015.
- [27] S. Matos and J. Hall, “Integrating sustainable development in the supply chain: The case of life cycle assessment in oil and gas and agricultural biotechnology,” *J. Oper. Manag.*, vol. 25, no. 6, pp. 1083–1102, 2007.
- [28] D. J. Garcia and F. You, “Supply chain design and optimization: Challenges and opportunities,” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 81, pp. 153–170, 2015.
- [29] M. Mutingi, “The impact of reverse logistics in green supply chain management: A system dynamics analysis,” *Int. J. Ind. Syst. Eng.*, vol. 17, no. 2, pp. 186–201, 2014.
- [30] A. McKinnon, A. Cullinane, S. Browne, M. Whiteing, “Sustainability : a new priority for logistics managers,” in *Green logistics: Improving the environmental sustainability of logistics*, 2010, pp. 4–30.
- [31] G. Kannan, A. Noorul Haq, and M. Devika, “Analysis of closed loop supply chain using genetic algorithm and particle swarm optimisation,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 47, no. 5, pp. 1175–1200, 2009.
- [32] D. Chhabra, S. K. Garg, and R. K. Singh, “Analyzing alternatives for green logistics in an Indian automotive organization: A case study,” *J. Clean. Prod.*, vol. 167, pp. 962–969, 2018.
- [33] K. hung Lai and C. W. Y. Wong, “Green logistics management and performance: Some empirical evidence from Chinese manufacturing exporters,” *Omega*, vol. 40, no. 3, pp. 267–282, 2012.
- [34] P. Arroyo López, M. Villanueva Bringas, J. Gaytan Iniestra, and M. García Vargas, “Simulación de la tasa de reciclaje de productos electrónicos. Un modelo de dinámica de sistemas,” *Contaduría y Adm.*, vol. 59, no. 1, pp. 9–41, 2014.
- [35] S. Krikke, Harold, le Blanc, Ieke, Van de Velde, “Product Modularity and the Design of Closed-Loop Supply Chains,” *Calif. Manage. Rev.*, vol. 46, no. 2, pp. 23–39, 2004.
- [36] G. Maquera, “Logística verde e Inversa, Responsabilidad Universitaria Socioambiental Corporativa y Productividad,” *Apunt. Univ.*, vol. 2, no. 1, pp. 31–54, 2012.
- [37] ICONTEC, “NORMA TECNICA COLOMBIANA 1304: LLANTAS NEUMÁTICAS. DEFINICIONES, CLASIFICACIÓN Y DESIGNACIÓN,” 2014.
- [38] Comisión Nacional para el Uso Eficiente de, “Guía para el uso eficiente de la energía en el transporte.”
- [39] Tratamiento de Neumáticos Usados TNU, “Reciclar para ser sostenible,” Almansa, España, 2015.
- [40] Congreso de la Republica, “Ley 769 de 2002. Código de Transporte Terrestre.,” p. 71, 2002.
- [41] M. D. E. Comercio, I. Y. Turismo, E. L. M. D. E. Comercio, and I. Y. Turismo, “0481 (4,” vol. 0481, pp. 1–16, 2009.
- [42] Asociación Colombiana de Rencauchadores de Llantas y Afines ANRE, “Rencauche de Llantas,” in *transporte de Carga y Pasajeros*, 2017, p. 12.
- [43] MOTOR, “No Title,” ¿QUÉ TAN REPARABLES SON LAS LLANTAS?, 2018. [Online]. Available: <http://www.motor.com.co/actualidad/industria/reparables-son-llantas-jueves->

- mecanica/30166.
- [44] Cámara de Comercio de Bogotá, “Guía para el manejo de llantas usadas,” Guía para el manejo llantas usadas, vol. I, p. 56, 2006.
 - [45] J. G. Iniestra, “Logística Inversa Una segunda oportunidad de negocio,” 2007.
 - [46] Ministerio de Ambiente and D. Sostenible, “Resolución 1326 de 2017, Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de llantas usadas y se adoptan otras disposiciones.” pp. 1–22, 2017.
 - [47] Departamento Nacional de Planeación, “Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018,” Doc. CONPES 3582 Versión para el Congr., p. 370, 2014.
 - [48] I. Y. T. D. 2006 " MINISTERIO DE COMERCIO, “DECRETO NÚMERO 3803 31 OCT 2006 DE 2006,” pp. 1–5, 2006.
 - [49] DECRETO 442, “Aprovechamiento Y/O Valorización de llantas Usadas,” 2015.
 - [50] S. Oviedo, A. Leiva, and R. Forradellas, “Dinámica de Sistemas : Modelado Flexible en Logística,” pp. 194–205, 2013.

3. Capítulo

EVALUATION OF A SME'S BARRIERS OF ENTRY INTO A REVERSE LOGISTIC NETWORK FOR USED TIRES IN BOGOTÁ D.C, FROM A DYNAMIC SYSTEM APPROACH

Evaluación de las barreras de entrada de PyMEs a una red logística inversa de llantas usadas en la ciudad de Bogotá D.C. desde un enfoque de Dinámica de sistemas Cristina Ramírez Meneses¹ Joan Paola Cruz ¹ Enrique Romero¹

¹ Facultad de Ingeniería, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Autopista Norte AK 45 No 205-59. Bogotá D.C., Colombia

²Resumen— La creciente preocupación que generan los impactos al ambiente resultado de los hábitos de consumo y producción, han convertido a la logística inversa en una importante estrategia para las organizaciones que requieren explorar alternativas para recapturar valor de los productos que han quedado fuera de uso en algún punto de su cadena de suministro y a su vez hacer frente a las exigencias gubernamentales y sociales. Sin embargo, no es una tarea sencilla de llevar a cabo, pues requiere la sincronización de múltiples factores para canalizar un nuevo flujo en sentido inverso en la cadena. El presente artículo, evalúa a través de un modelo de dinámica de sistemas las variables que intervienen en el comportamiento actual del sistema de logística inversa para llantas usadas en la ciudad de Bogotá, con el objeto de identificar las principales barreras de entrada que experimenta una Pyme al participar en él. Finalmente se evalúan posibles escenarios de intervención que modificarían favorablemente la situación actual.

Palabras Clave — Aprovechamiento de recursos, Desarrollo sostenible, Transporte por carretera

1. Introducción

El mundo contemporáneo ha desarrollado modos y ritmos de producción y consumo insostenibles. Si bien, los avances técnicos y tecnológicos han mejorado la calidad de vida de la sociedad; paralelamente han jugado un papel importante en la degradación del medio ambiente, y los efectos del cambio climático [1]. Factores como: el agotamiento de los recursos naturales, las fluctuaciones en los precios de las materias primas, y la responsabilidad legal y social de proteger el medio ambiente, están obligando a las empresas a reconsiderar sus modelos comerciales y reestructurar sus cadenas de suministro gradualmente para ser más sostenibles [2], articulando criterios: económicos, ambientales y sociales, tales como: la creación de empleo, el bienestar social, el rendimiento energético y el consumo de recursos, entre otros [3],[4],[5],[6],[7], [8].

A lo largo de la cadena de suministro surgen productos que quedan fuera de uso (PFU), porque han perdido valor para el cliente cuando no satisfacen los requerimientos iniciales, cuando han cumplido su función esencial o cuando su ciclo de vida útil ha finalizado

¹Cristina Ramírez Meneses, Candidata a magister en Ingeniería Industrial de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia, cristina.ramirez@mail.escuelaing.edu.co
Joan Paola Cruz González, Directora del Centro de Estudios de

Sistemas de Gestión., Profesor de Planta. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. joan.cruz@escuelaing.edu.co
Enrique Romero Motta, Profesor. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. e.romero@escuelaing.edu.co

convirtiéndolo en un residuo, al cual, el cliente espera hoy en día que el productor implemente estrategias para retornarlos a la cadena, para su procesamiento, recuperación y/o disposición responsable con el medio ambiente [9].

La generación de residuos sólidos es una acción ineludible en el desarrollo cotidiano de los seres humanos; el aumento de la densidad poblacional, los hábitos de consumo, el desarrollo económico y tecnológico, guardan una relación directamente proporcional al volumen de basuras generadas [10].

En Colombia actualmente, se generan 11,6 millones de toneladas de residuos al año y solo se recicla el 17%. En Bogotá, se generan 7.500 toneladas al día y se reciclan entre 14% y 15%. Bajo esta dinámica de generación, sin adecuadas medidas para mejorar su aprovechamiento o tratamiento, en el año 2030 existirán emergencias sanitarias en la mayoría de las ciudades del país y una alta generación de emisiones de GEI [11].

Desde esta perspectiva conceptos como: logística verde, logística inversa y cadenas de ciclo cerrado nacen como respuesta a los requerimientos ambientales de las cadenas de suministro. En las actividades logísticas tradicionales del productor al consumidor, la logística verde incorpora aspectos ambientales, tales como: el consumo de los recursos naturales no renovables, las emisiones al aire, la congestión y el uso de carreteras, el ruido y la eliminación final de residuos peligrosos y no peligrosos [12],[13]. Relativo a ello, la logística inversa se concentra en mitigar los daños ambientales a través de la gestión de los flujos de mercancías desde el punto de consumo hacia el punto de origen, con el propósito de recapturar valor o dar una disposición apropiada [14], [15] y la cadena de ciclo cerrado se define cuando los bucles de flujo de producto son cerrados reutilizando el producto en sí mismo, sus componentes o sus materiales son devueltos de nuevo a la cadena [15].

El presente estudio está centrado en el análisis del sistema de logística inversa de llantas usadas en la ciudad de Bogotá, un problema técnico, económico, ambiental y de salud pública [16]. Si bien la logística inversa es considerada a nivel mundial como una estrategia que genera ventaja competitiva, su implementación no es una tarea trivial [8], esta labor representa un problema complejo y en ocasiones poco atractivo para las organizaciones, dados los altos costos logísticos en los que se incurre para el desarrollo de las operaciones de retorno y disposición final de los PFU [8], así como la articulación y cooperación de todos los actores involucrados en la red inversa. No necesariamente todas las prácticas ambientales traerán ahorros de costos, algunas pueden de hecho llegar a aumentarlos, especialmente en el corto plazo [17]. El estudio analiza las barreras de entrada que experimenta una Pyme a la hora de configurar o participar de un sistema de logística inversa para este producto, dados los lineamientos legales establecidos en la Resolución 1326 de 2017 [18] por medio de la cual se obliga a los productores a formular, implementar y mantener sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de las Llantas Fuera de Uso, generando la necesidad para las organizaciones de desplegar estrategias de intervención para configurar relaciones y procesos entre los actores involucrados.

1. Definición del problema

En la configuración de cadenas de suministro hacia adelante y sus sistemas de logística directa, un parámetro clave es el número de eslabones y procesos que deben sincronizarse desde el proveedor de materias primas hasta llegar al usuario final satisfaciendo los requerimientos establecidos a un costo razonable. En las cadenas de suministro inversa es más complejo configurar la gestión de los retornos [19], pues incluyen el desarrollo de operaciones que abordan, entre otros, la recolección, la inspección / separación,

reprocesado (reutilización directa, reciclaje, reparación, refabricación), eliminación y redistribución de los productos, subconjuntos y/o materiales, que pueden entrar directamente en la cadena de suministro hacia adelante en varios puntos o en otras cadenas emergentes [20], no siempre retribuyendo eficientemente el costo de desarrollar dichos procesos.

Actualmente, la gestión de los PFU representa una gran preocupación para las organizaciones al enfrentar las presiones del entorno en relación a la sostenibilidad, obligándolas a tomar decisiones para ejecutar un negocio rentable a corto plazo, que no comprometa negativamente el medio ambiente, ni la sociedad en el futuro; esto, sumado a la falta de investigación sobre cómo incorporar aspectos de sostenibilidad en las cadenas de suministros hace que la tarea sea aún más desafiante, llevando a las empresas a que naveguen por un entorno dinámico, sin una hoja de ruta clara [5].

Para diseñar el sistema de logística inversa en la cadena, se requiere de herramientas para el análisis desde aspectos como las barreras de entrada; en las que se valora si interesa o no el retorno, problemas de localización de instalaciones (puntos de recolección, transferencia y plantas de tratamiento), así como decisiones de carácter operativo relacionadas con problemas de enrutamiento de vehículos asociado al flujo de materiales y gestión de inventario, entre otros aspectos que van más allá del cumplimiento legal y social [6], [21].

En Colombia, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible (MAVDS), desde la Política Nacional de Posconsumo, ha emitido una amplia legislación que busca gestionar el retorno de productos fuera de uso para su posterior tratamiento, reutilización, aprovechamiento, valorización y reciclaje [22]. Sin embargo, aún existen empresas que desconocen o no cumplen a cabalidad lo dispuesto en la normatividad, presentando falencias en la implementación de sistemas de logística inversa.

El manejo de las llantas usadas se encuentra reglamentado con la Ley 2811 de 1974, Resolución 1326 del 2017 (anterior Resolución 1457 de 2010), Resolución 6981 de 2011 y Decreto 442 de 2015, [23], [24], [25], [26] por medio de los cuales se fundamenta la gestión ambiental de este residuo en el país y particularmente en el Distrito Capital. Desde el año 2010 se establecieron las metas mínimas de recolección y tratamiento, que los productores deberían asegurar a través de Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas (SRS) (colectivos o individuales), operando de manera ininterrumpida y progresiva. A partir del año 2012, los SRS deberían asegurar una meta mínima anual del 20% de las llantas usadas, sobre la base del promedio de las llantas puestas en el mercado en los dos años anteriores a la fecha de presentación del Sistema ante el MAVDS y Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA; posteriormente se debería garantizar incrementos anuales mínimos del 5% hasta alcanzar en el año 2024 una meta mínima del 80% (Art. 10°. Res. 1457 de 2010, y artículo 13.1 de la resolución 1326). Sin embargo, en el año 2016, informes de la ANLA en el 2016 evidencian un incumplimiento de dichas metas; lo que deja un rezago en la eficiencia de algunos SRS para dar respuesta a la problemática, considerando el crecimiento del parque automotor.

Por lo anteriormente expuesto, es evidente la necesidad de analizar el sistema de logística inversa para llantas usadas en la ciudad de Bogotá, desde un enfoque sistémico que permita identificar las relaciones y causalidades entre las variables asociadas a la eficiencia del flujo inverso de este producto, en vista que actualmente la cantidad de este residuo es superior a la capacidad de recolección y tratamiento de los actores implicados, generando una problemática insostenible que crece diariamente.

Desde esta perspectiva, la dinámica de sistemas (DS) es una herramienta que permite construir modelos de simulación basada en el estudio de las relaciones causales que existen entre las partes del sistema, para tomar decisiones en entornos complejos. Esta metodología permite: identificar el problema, desarrollar hipótesis dinámicas que expliquen las causas del problema, construir un modelo de simulación que permita analizar la raíz del problema, verificar que el modelo reproduce de forma satisfactoria el comportamiento observado en la realidad para probar en él las diferentes alternativas o políticas de intervención que pueden llevar a una mejor solución [22][23]. Lo que resulta útil para: (i) identificar las barreras de entrada que limitan la participación de las PyMEs en la implementación efectiva de sistemas de logística inversa para llantas fuera de uso en la ciudad de Bogotá D.C., (ii) analizar las perspectivas de las partes involucradas en la toma de decisiones con respecto a las barreras de entrada para la adopción de la logística reversa en la recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas de vehículos en la ciudad de Bogotá, D.C. y (iii) el impacto que generan posibles intervenciones al sistema.

2. La Dinámica de Sistemas (DS) en la logística inversa

La metodología de dinámica de sistemas (DS), establecida por Jay Forrester en problemas de la administración de la cadena de abastecimiento (Forrester, 1958, 1961), es una herramienta que permite construir modelos de simulación basada en el estudio de las relaciones causales que existen entre las partes del sistema, para tomar decisiones en entornos complejos. Esta metodología permite: identificar el problema, desarrollar hipótesis dinámicas que expliquen las causas del problema, construir un modelo de simulación del sistema que permita analizar la raíz del problema, verificar que el modelo reproduce de forma satisfactoria el comportamiento observado en la realidad, probar en el modelo las diferentes alternativas o

políticas que solucionan el problema, e implementar la mejor solución [27].

La DS, ha resultado ser una herramienta útil para analizar las complejas configuraciones de las cadenas de suministro hoy en día; dado que se puede incorporar fácilmente todo tipo de elementos para la reingeniería de la cadena de suministro sin limitaciones de escala [28][29]. Por ejemplo, entre los trabajos de logística inversa que aplican la (DS) para analizar las barreras de entrada, está el de Spengler y Stölting [30] quienes utilizan DS para evaluar la conveniencia de implementar una cadena de suministros inversa para productos eléctricos; en ella, los componentes de los productos desechados son recuperados para re utilizarse como refacciones, lo que evita que el fabricante tenga que producir y almacenar componentes para productos que pronto saldrán del mercado. El modelo demuestra la favorabilidad de la implementación de esta estrategia sobre la de producción, en términos de costos de recolección versus costos de abastecimiento.

Georgiadis y Vlachos [31], analizaron a través de un modelo de simulación dinámica basada en los principios de la metodología DS el impacto de los problemas ambientales en el comportamiento a largo plazo de una cadena de suministro con circuito cerrado. El modelo permite observar el efecto que tiene la intensificación de las medidas legales de protección del medio ambiente, sobre las tasas de recolección de producto, que a su vez mejora la imagen verde de la organización y esta incide positivamente sobre la demanda del cliente. Los autores recomiendan el modelo propuesto, como una herramienta útil a los políticos y tomadores de decisiones relativas a la gestión estratégica de largo plazo de la logística inversa. Finalmente plantean para investigaciones futuras asociar los costes de las operaciones específicas y la búsqueda de políticas óptimas.

Por su parte Srivastava [32] utilizan la metodología de la (DS) para incorporar diversos factores que afectan a la tasa de retorno y que

debido a su naturaleza cualitativa o “blanda” no pueden estudiarse aplicando métodos cuantitativos o “duros”. En su modelo, los autores analizan el diseño de una red de logística inversa en la India para la recuperación de diversos productos eléctricos y electrónicos. En este caso, la (DS) explicó razonablemente el comportamiento de los volúmenes esperados de retornos considerando diversos factores como la cercanía de los centros de recolección a las poblaciones, las tasas y costos de recolección, así como el reproceso de bienes.

Las decisiones sobre las políticas de planeación de capacidad en las plantas de remanufactura que hacen parte del sistema de la cadena de suministro inversa, son abordadas por Vlachos, Georgiadis, Eleftherios Iakovou, [33] a través de un modelo DS basado en la relación de los aspectos económicos, ambientales (tales como la obligación de recuperación impuesta por la legislación) y el efecto “imagen verde” en la demanda de los clientes. El modelo proporciona una herramienta experimental, que se puede utilizar para evaluar las alternativas de planificación de en temimos de capacidad (“qué pasaría si”), como medida de eficacia de la política el profit de toda la cadena de suministro.

Yao, Shen, Tan y Hao [34] evalúan el comportamiento medioambiental de la gestión de residuos en el sector de la construcción. El estudio introduce los indicadores para medir el rendimiento de sostenibilidad de los proyectos de carreteras e identifica los factores dinámicos que afectan el rendimiento del indicador haciendo referencia a los estudios de viabilidad relevantes de los proyectos de este sector.

Mutigni [8], en su modelo DS establece políticas y estrategias para traducir la logística inversa en la cadena de suministro verde (GSCM, por sus siglas en inglés) y medir su impacto. En su estudio, identifica las medidas de rendimiento clave para las cadenas de suministro verdes y las relaciones causales entre las variables importantes en una cadena de suministro típica. Los resultados de los análisis

de hipótesis en DS indican que a pesar de que los impactos económicos, ambientales y sociales pueden tomar mucho tiempo para realizarse, las ventajas competitivas que obtienen a medio y largo plazo son bastante considerables, desde un punto de vista comercial, por lo tanto, la obtención de la disposición de la alta dirección para invertir en iniciativas de reverdecimiento es esencial, teniendo en cuenta las limitaciones de los recursos disponibles. Wee Kwan Tan y Kumar [35] Evalúan la rentabilidad de un sistema de Logística inversa de computadores en Asia con un modelo DS, los resultados muestran que para que el sistema sea rentable las piezas refabricadas necesitan mantener un precio de reventa más alto que las piezas nuevas. Por otra parte, la calidad de los procesos selección y recolección evitarán los costos logísticos adicionales debido al transporte y almacenamiento innecesario de chatarra.

El caso particular de la logística inversa de llantas fuera de uso en Colombia, ha sido abordado con: un modelo de programación multi-objetivo con algoritmos genéticos para evaluar el impacto ambiental que representa la producción y recolección del material en las ciudades de Pereira y Dosquebradas, como resultado se identifica que la capacidad óptima de las plantas, en un escenario de recolección del 100%, requiere del apoyo de plantas existentes en otras ciudades, para su adecuada gestión, ya que implementar una planta de mayor capacidad no es viable para la cantidad de residuo que se genera, a su vez, se propone considerar un sistema de tarifas al consumidor para facilitar la recolección del 100% de llantas y buscar mejores alternativas de aprovechamiento, así como hacer una comparación más eficiente de los costos y beneficios de las alternativas [17].

Camargo, Franco, Chud y Osorio [36], realizan un modelo de (DS) que permite evaluar el impacto ambiental generado por la logística inversa de las llantas para automóviles. Se

utiliza la (DS) para explicar el comportamiento de las emisiones generadas por cuatro procesos: la producción de llantas nuevas, el reencauche, la trituración mecánica y el co-procesamiento. La simulación evidenció que el sistema se encuentra dominado por la demanda de llantas nuevas y la trituración mecánica de los residuos de llantas es la mejor opción para la disposición final, porque es el proceso que menores impactos ambientales presenta.

A partir de la revisión bibliográfica de la aplicación de la DS en el campo de la logística inversa, se resalta la utilidad de la herramienta para analizar la complejidad de los sistemas de flujo inverso, en Colombia se ha utilizado principalmente para la etapa de aprovechamiento, en la que se decide qué hacer con el PFU, lo que muestra un campo abierto para explorar con esta investigación, atendiendo las decisiones que se toman en la fase inicial de la configuración de un sistema de logística inversa, en la que se analizan las barreras de entrada.

3. Metodología

El estudio busca representar y simular el comportamiento del sistema de logística inversa para Llantas Fuera de Uso que actualmente se desarrolla en Bogotá, con lo cual se logra: identificar, comprender y analizar las barreras de entrada que experimenta una Pyme en el momento de implementar y/o participar en un sistema de flujo inverso para este producto; para finalmente plantear algunas alternativas de intervención que proyecten mejoras al sistema. Este estudio se enmarca en la etapa inicial que debe darse en la configuración de un sistema de logística inversa; en la cual se caracteriza y evalúa el contexto del sistema inverso que facilita el diseño de estrategias y procedimientos para participación de los actores en la gestión de los PFU [37], [12],[21].

La metodología de DS se tomó como el lineamiento para la construcción del modelo; se establecieron cuatro fases que corresponden a

una adaptación de la metodología de DS propuestas por Forrester, Sterman [22] y Georgiadis y Vlachos [26] estableciendo: (i) Definición de la situación problemática, (ii) Formulación de la hipótesis dinámica (Diagrama Causal), (iii) Formulación del modelo de simulación (niveles y flujos) y, (iv) Pruebas y análisis de sensibilidad.

La primera parte de la investigación es abordada desde un enfoque cualitativo. Para describir la situación problemática se recolectó información de fuentes primarias (actores vinculados al sistema, definidos en la Resolución 1326 de 2017 del 13 de Julio del 2017)[18] a través de instrumentos como: análisis de contenido -revisión documental y entrevistas semi-estructuradas, con lo cual se logró identificar la estructura operacional y legal del sistema actual. A partir de este punto, se reconocieron los componentes más relevantes que representan el sistema: actores involucrados, variables que intervienen y sus límites, los cuales pasan a ser la base del modelo propuesto.

La estructura de un sistema bajo un modelado de DS se describe utilizando bucles causales o diagramas de influencia. Un diagrama causal consiste en variables conectadas por flechas que denotan las influencias causales entre las variables generando ciclos causales, los cuales son: de retroalimentación (refuerzo) o retroalimentación negativa (balance) [31], con esta herramienta en la primera parte de este proyecto de investigación, Ramírez, Cruz y Romero [38] exploran la situación problemática y realizan la formulación dinámica del sistema actual desde un enfoque cualitativo, obteniendo como resultado un diagrama causal que representa las variables, parámetros y relaciones existentes entre los actores involucrados y que pueden llegar a constituir barreras de entrada al sistema.

En la Figura 1 se muestra el diagrama causal del modelo propuesto. En él, se identifican, 16 ciclos de refuerzo y 16 ciclos de balance; integrados en siete (7) grandes subsistemas que

estructuran el sistema de logística inversa de llantas fuera de uso en Bogotá, los cuales son: demanda de llantas, generación de SRS, rencauche, control y seguimiento, recolección, generación de gestores, y aprovechamiento.

Los resultados de Ramírez, Cruz y Romero [38] establecen que las principales motivaciones de los actores en el sistema están fundadas principalmente en la obligatoriedad legal (establecida en la Resolución 1326 de 2017), y no se percibe como una oportunidad para desarrollar estrategias diferenciadoras y competitivas en el mercado a través de la generación de valor de este PFU.

Existen variables como: el costo de la recolección y el bajo desarrollo de mercados para el material recuperado, que en la mayoría de las veces actúan como barreras que limitan la eficiencia del sistema y vuelven poco atractiva la participación de una Pyme en él.

El presente artículo describe la segunda y última parte de la investigación con el análisis cuantitativo del modelo de dinámica de sistemas. En este, se desarrollan las fases de: formulación del modelo de simulación de niveles y flujos y las pruebas y análisis de sensibilidad, incluyendo posibles escenarios de intervención que mejoren la situación problemática identificada.

Para estas fases se recolectó información cuantitativa de fuentes primarias y secundarias relacionadas con: datos históricos de volúmenes de llantas nuevas y usadas en el sistema, capacidad de procesamiento, tasas de recolección, y costos de operación. A partir del análisis cualitativo del diagrama causal, se construyó el modelo Forrester de niveles y flujos, expresando las relaciones identificadas mediante ecuaciones matemáticas. Finalmente, el modelo fue representado y simulado su comportamiento en un periodo de tiempo de 10 años haciendo uso del software de simulación Vensim 7.3. Los resultados obtenidos se muestran en la sección 5.

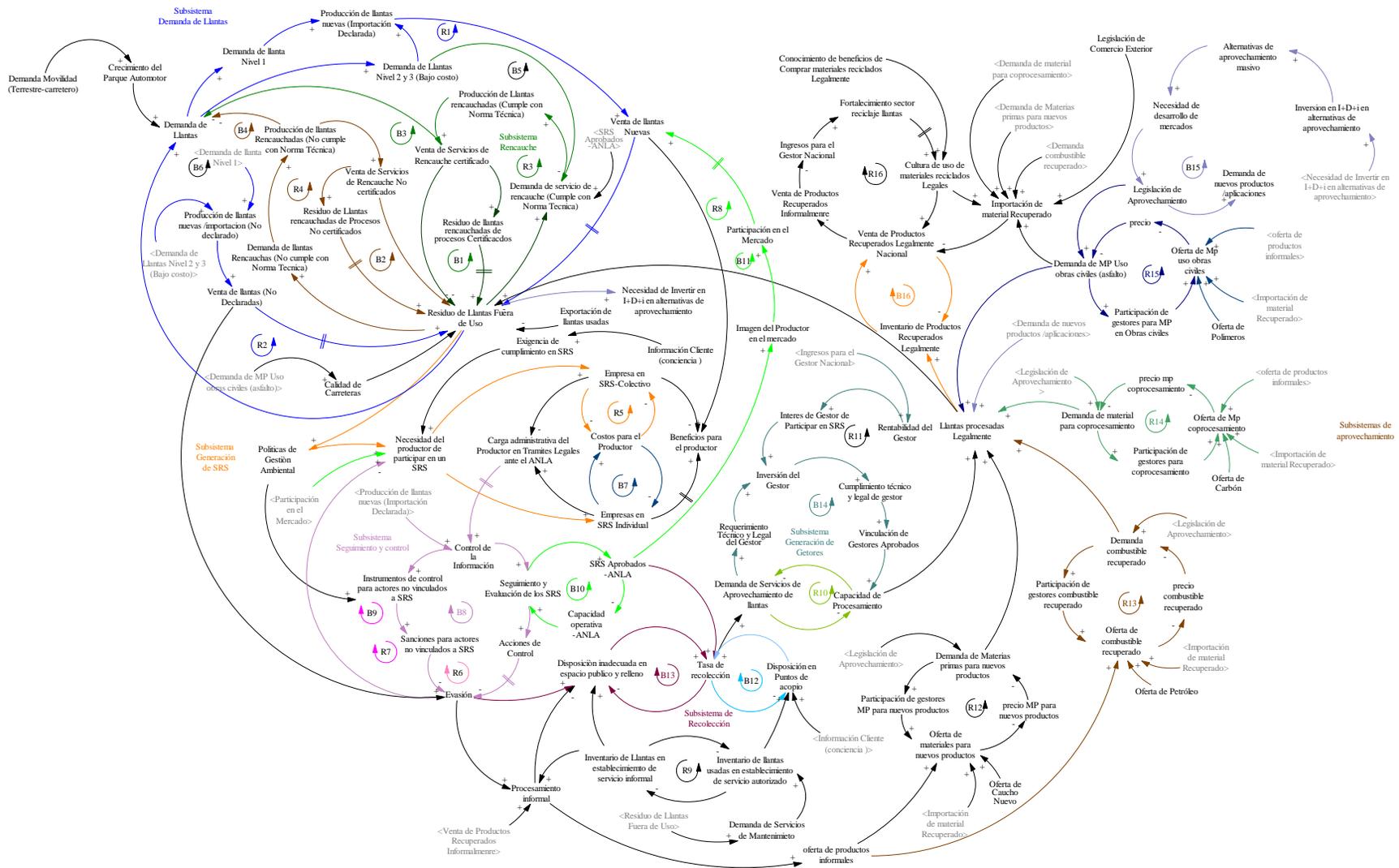


Figura 1. Diagrama causal sistema de logística Inversa de Llantas usadas en la ciudad de Bogotá D.C. Elaboración propia.

4. Resultados y Discusión

En esta sección, se presentan los resultados de la simulación realizada a partir del diagrama causal descrito en la primera parte de la investigación [38], en función de analizar las hipótesis dinámicas que representan las barreras de entrada al sistema:

H1: las motivaciones de una Pyme para participar o implementar un sistema de logística inversa de llantas usadas está influenciada principalmente por requerimientos legales para participar en el mercado ya que no se percibe directamente ningún beneficio económico.

H2: Los costos logísticos asociados a la recolección del producto son poco eficientes comparados con el beneficio económico que pueda generarse en cada una de las alternativas de aprovechamiento disponibles.

H3: La generación de PFU es superior a la capacidad de los sistemas de aprovechamiento disponibles y los mercados desarrollados para la venta de materiales recuperados.

5.1 Formulación matemática del modelo.

El siguiente paso de la metodología de DS incluye el desarrollo del modelo matemático, generalmente presentado como un diagrama de niveles y flujos (diagrama Forrester) que captura la estructura del modelo y las interrelaciones entre las variables [33]. La figura 5 muestra el diagrama de Forrester del modelo, en él se identifican: 18 variables de nivel, conectadas con 30 variables de flujos y 38 variables auxiliares. A cada variable se le han asociado ecuaciones funcionales que permiten la simulación del modelo de acuerdo con características de comportamiento identificables. Por ejemplo, la variable de nivel de la cantidad de llantas nuevas en Bogotá (ver figura 2) se asocia a un modelo de población de tipo:

$$dLINUB(t) / dt = CLIN(t) - LIFU(t)$$

$$CLIN(t) = (LINUB(t) * TCLIN(t)) * (ID - IND)$$

$$LIFU(t) = (LINUB(t) * TLIFU)$$

Donde:

LINUB = Llantas fuera de uso en Bogotá en el periodo t

CLIN = consumo de llantas nuevas

LIFU = llantas Fuera de Uso

TCLIN = tasa de consumo de llantas nuevas

ID= ingresos declarados en VUCE

IND= ingresos no declarados

TLIFU = Tasa de generación de llantas fuera de uso

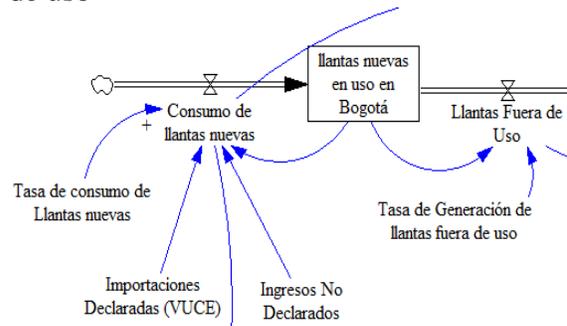


Figura 2. Diagrama de niveles y flujos generación de llantas fuera de uso.

Formulaciones similares representan el comportamiento de variables de nivel de: Inv_llantas fuera de uso, llantas fuera de uso recolectadas por SRS y llantas rencauchadas.

Por otra parte, el modelo dinámico en las plantas de aprovechamiento tiene un comportamiento no lineal. Se reconoció como un modelo de inventarios que depende de la densidad; es decir un modelo logístico donde, el crecimiento de las ventas y producción es exponencial hasta alcanzar la capacidad máxima de procesamiento de los gestores aprobados asociados a esa línea de aprovechamiento.

Para modelar la situación se toma la función lineal $G(y) = 1 - y/K$, donde $K > 0$ es la

capacidad de carga o valor de saturación del modelo. Adoptando la forma:

$$y'(t) = \alpha y (1 - y/K)$$

$$y'(t) = \alpha y - \alpha/K y^2;$$

$$y(0) = y_0$$

Los parámetros α y α/K reciben el nombre de coeficientes vitales de la población.

La ecuación generalizada para simular los niveles de inventario y flujos de producción en los procesos de aprovechamiento disponibles son:

$$LIAP_i(t) = DLIP_i(t) - VLI Pi(t)$$

$$CO Pi(t) = G Pi(t) * CPP_i$$

$$DLIP_i(t) = \alpha * LIAP_i(t)$$

$$VLI Pi(t) = \alpha * LIAP_i(t)^2 / CO Pi(t)$$

Donde:

LIAP_i = Llantas aprovechadas en el proceso i

DLIP_i = Disposición de llantas para proceso i

VLI Pi = Venta de llantas transformadas por proceso i

CO Pi = Capacidad de Oferta de transformación del proceso i

GPi = Gestores disponibles para proceso i

CPP_i = Capacidad promedio de producción de proceso i

α = crecimiento de la demanda

i = Pirólisis, Trituración mecánica para combustión (TDF), Trituración mecánica para Granulo de Caucho Reciclado (GCR), Trituración mecánica de GCR para asfalto, uso artesanal.

En el anexo 4 se muestra la formulación matemática del modelo.

5.1.1 Validación del modelo

Las pruebas al modelo se realizan comparando el comportamiento simulado del modelo con el comportamiento real del sistema. Cada ecuación se verifica en función de la consistencia dimensional. Los modelos

también deben probarse en condiciones extremas, condiciones que no se observan en el mundo real [19],[27].

Los datos recolectados del: Observatorio Ambiental de Bogotá, Secretaría Distrital de Ambiente, Sistema de Inteligencia Comercial Legiscómex, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, fueron procesados con el método de pronóstico regresión lineal simple ($Y = \alpha + \beta x + \epsilon$), para predecir futuras cantidades de llantas en uso en la ciudad, llantas fuera de uso generadas y la cantidad de llanta recolectadas desde el año 2009 hasta el año 2028; al comparar los datos del modelo DS con los datos históricos, se obtuvo Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE o Mean Absolute Percentage Error) del 6 % en las llantas en uso y del 11% en relación a las llantas fuera de uso, con respecto al pronóstico el valor MAPE es del 11% y 15% respectivamente. Por lo tanto, se considera que el modelo DS propuesto es capaz de capturar la complejidad dinámica del largo plazo.

Las cifras generadas por el modelo en la variable de flujo llantas fuera de uso, se ajusta a los datos reportados en el 2015 por el MADS con 2,5 millones de llantas usadas generadas actualmente en la ciudad, de las cuales cerca del 30% son dispuestas de manera inadecuada en el relleno sanitario y espacio público.

A partir de la información recolectada en los gestores de aprovechamiento, se logró estructurar un modelo que refleja sus limitaciones frente al comportamiento del mercado: la variable auxiliar alfa (α), en cada uno de los procesos de aprovechamiento representa los impactos que tiene la demanda en la producción e ingresos económicos percibidos en cada alternativa, los datos obtenidos coinciden con las aproximaciones dadas por los gestores.

5.2 Análisis de los resultados de la simulación

Escenario actual.

El crecimiento del parque automotor en la ciudad genera un efecto creciente en la demanda de llantas nuevas en el sistema. Los datos reportados en el Observatorio Ambiental de Bogotá, el sistema de inteligencia comercial Legiscomex y la Alcaldía Mayor (ver tabla 1), permitieron calcular la tasa de consumo de llantas nuevas en la ciudad (0.469) y tasa de generación de llantas fuera de uso (0.4).

Tabla 1. Crecimiento del parque automotor –generación de llantas nuevas y usadas.

Año	Parque Automotor (Vehículos)	Llantas en Uso	Importación de llantas	Llantas Fuera de Uso
2009	1047317	4266045	4519580	1885820
2010	1139038	4648889	5558095	2050975
2011	1252070	5120684	6239591	2254502
2012	1354697	5549049	5885679	2439295
2013	1457028	5976179	5539405	2623554
2014	1561283	6411339	5390957	2811277
2015	1634077	6715181	5494949	2942352
2016	2178763	8988701	6670955	3923124
2017	2237091	9232162	6516103	4028151

En la figura 3. Se observa el comportamiento del sistema en función de la generación de llantas fuera de uso bajo los actuales parámetros de consumo. Es así, como en el año 2028 se esperaría tener cerca de 16 millones de llantas en circulación, ingresando 7,5 millones de llantas nuevas y generándose 6,5 millones de llantas usadas en ese año.

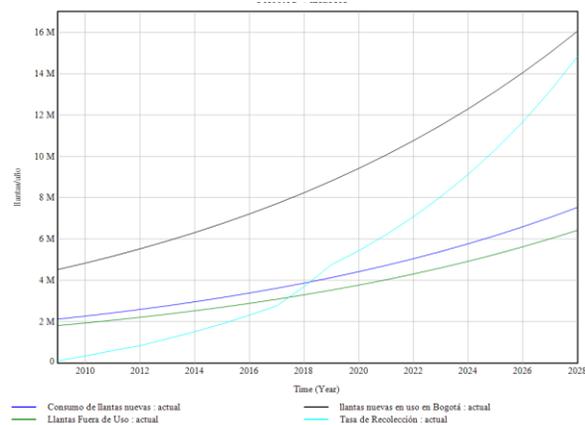


Figura 3. Generación de llantas nuevas y usadas en la ciudad de Bogotá.

De acuerdo con los lineamientos de recolección establecidos en la Resolución 1326 del 2017; a partir del año 2012, los productores (a través de los SRS) deberían asegurar una meta mínima anual del 20% del promedio de las llantas puestas en el mercado en los dos años anteriores, con incrementos anuales mínimos del 5% hasta alcanzar en el año 2024 una meta mínima del 80%, por lo que se espera que en el año 2028 se recolecten alrededor de 14,8 millones de llantas fuera de uso.

Si únicamente se recolectaran las llantas fuera de uso y no se realizaran procesos de aprovechamiento, en el 2028 se alcanzaría un nivel de más de 90 millones de unidades (ver figura 4).

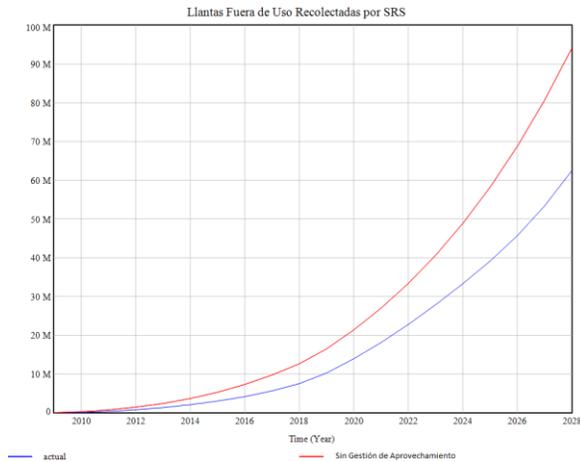


Figura 4. Recolección de llantas usadas

Actualmente para la ciudad de Bogotá, se identificaron en el sistema 11 gestores de aprovechamiento (fuera del rencauche para las llantas de vehículos de carga), los cuales son: Pirólisis (2), Trituración mecánica para combustión (TDF) (1), Trituración mecánica para Granulo de Caucho Reciclado (GCR) (6), Trituración mecánica de GCR para asfalto (1), y uso artesanal (1), los cuales logran atender alrededor del 26% de las llantas recolectadas que deben ser tratadas.

Como primera alternativa de aprovechamiento se tiene el rencauche. Este proceso representa una oportunidad de reutilizar directamente la llanta usada (rencauchada) en la cadena productiva, reduciendo costos de adquisición de este producto hasta en un 48% y con un rendimiento igual al de un producto nuevo [39], [40]. Sin embargo en Colombia esta práctica se destina principalmente para llantas

de vehículo de carga (para buses y camiones desde rin 15 hasta 24.5, y excluyendo aquellas que tengan índice de velocidad inferior a 80 km/h) [34], según ANRE, en Colombia la tasa de rencauche es tan solo del 23% de este tipo de llantas [39]: lo que representa para el sistema, una proporción menor de aprovechamiento con relación a la capacidad instalada en el resto de alternativas disponibles (Pirólisis, Trituración Mecánica para combustión TDF, Trituración mecánica para obtener Granulo de Caucho Reciclado (GCR), Obtención de Granulo para Asfalto y usos artesanales) (ver figura 6). Aún así, sumando la producción de las alternativas disponibles en los mercados desarrollados para estos productos, el proceso es poco eficiente con relación a la demanda de llantas fuera de uso recolectadas a disponer; lo que valida la hipótesis dinámica H3.

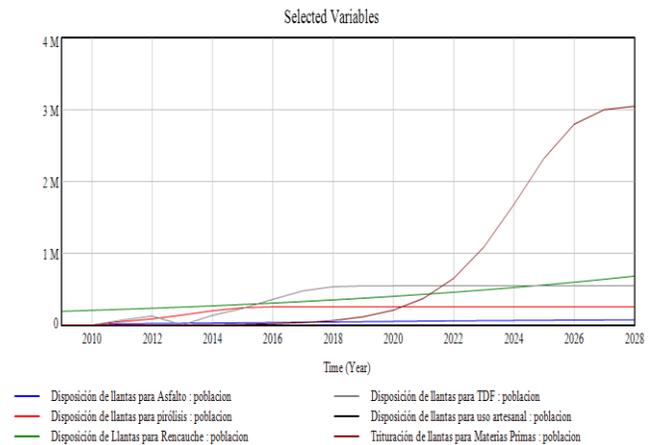


Figura 5. Disposición de llantas para procesos de aprovechamiento.

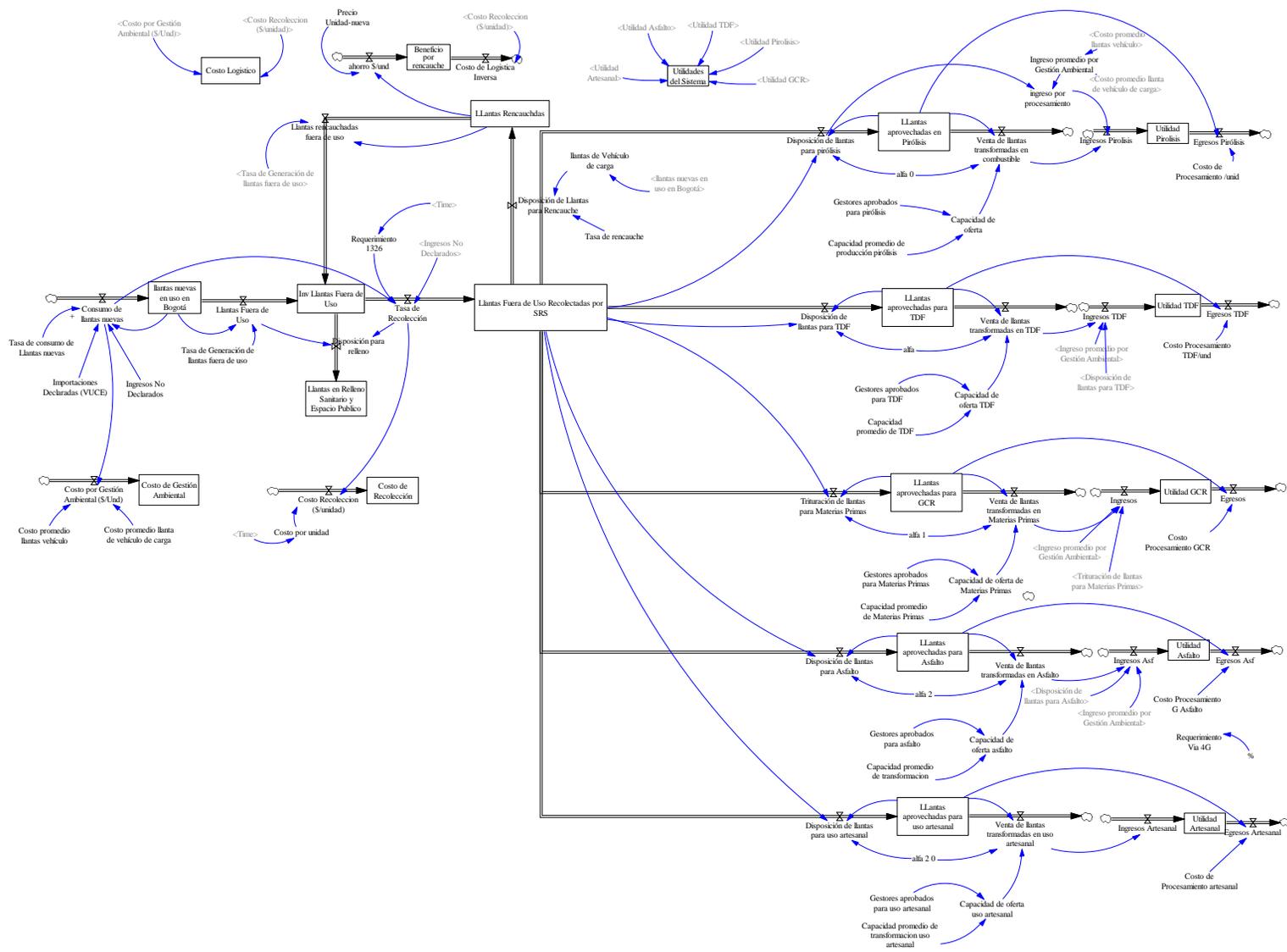


Figura 6. Diagrama Forrester del de logística Inversa de Llantas usadas en la ciudad de Bogotá D.C. Elaboración propia

En términos de eficiencia en el sistema logístico, los costos de recolección, transporte, almacenamiento y gestión ambiental (asumidos por el productor) representan una barrera de entrada; dado que son superiores a los beneficios económicos captados en cualquiera de las alternativas de aprovechamiento disponibles; convirtiendo a la implementación de un sistema de logística inversa de forma individual, en una alternativa menos atractiva para el productor cuando desea recuperar beneficios económicos de esta práctica. Es por esta razón, que el productor opta por vincularse a un SRS colectivo, percibiendo como único beneficio el respaldo documental de que sus llantas serán dispuestas adecuadamente según los requerimientos legales. Lo anterior valida la hipótesis dinámica (H2), ver figura 7 y figura 8.

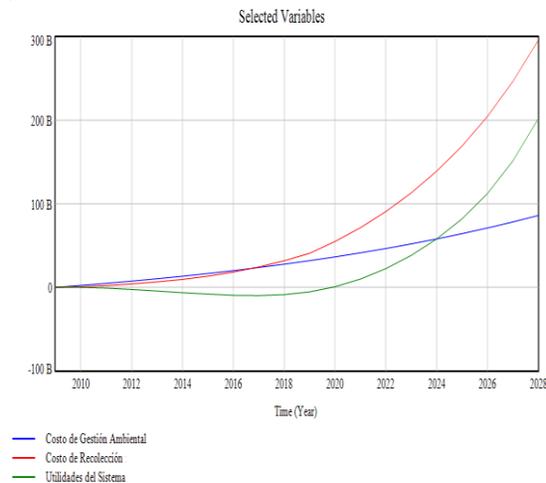


Figura 7. Costos logísticos y utilidades totales del sistema.

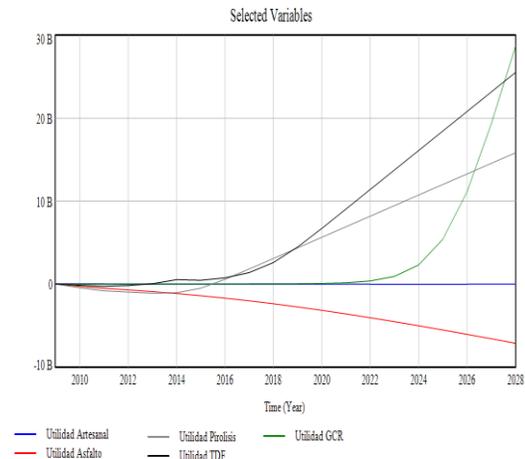


Figura 8. Utilidades por alternativa de aprovechamiento

Las utilidades recibidas por los gestores de aprovechamiento en cada una de las alternativas vinculadas en el modelo se calculan a partir de: ingresos por venta de producto aprovechado + ingresos por recolección y gestión ambiental (\$/unidad) – costo de producción (no se incluye costo de inversión inicial). Los resultados reflejan un esquema en el que la venta de material recuperado genera un impacto de menor proporción sobre las utilidades del proceso, pues el alto costo de producir hace que los precios de estos materiales sean superiores a los productos nuevos o vírgenes que se consiguen en el mercado. Bajo este panorama, los gestores de aprovechamiento solventan parte de los costos en el proceso con los aportes que realiza el productor a los SRS para gestionar y recolectar las llantas.

La figura 9 muestra el comportamiento de las utilidades si no se tuviera en cuenta ingresos por recolección y gestión ambiental por parte del productor. Dentro de las alternativas que tienen mayor demanda y capacidad de procesamiento se identifican: el aprovechamiento para TDF, seguido de la Pirólisis, las cuales muestran una tendencia positiva en sus utilidades después del año

2020, razón por la que son objeto de análisis en los escenarios propuestos de intervención.

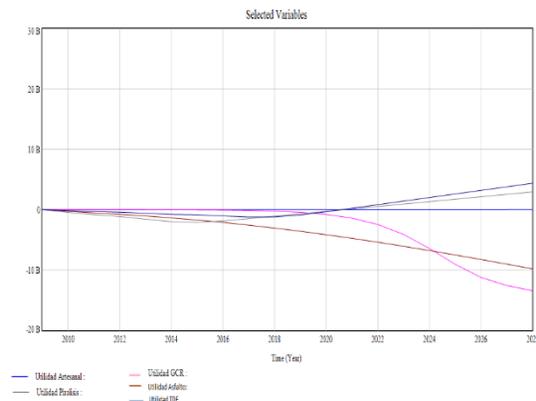


Figura 9. Utilidades por ventas de material recuperado

Escenario propuesto 1

Para el escenario 1, la política de intervención sugiere: redistribuir la capacidad instalada en los procesos de aprovechamiento de TDF y GCR (trituración mecánica), dado que la maquinaria utilizada permite adecuar el proceso para la obtención de estos productos, se aumenta la demanda de productos recuperados (α), y la tasa de rencauche posible, aumenta a 100%, ver tabla 2. Como incentivo al sistema se otorga un subsidio al gestor de aprovechamiento del 5% sobre los costos de producción.

Tabla 2. Ajustes en el modelo propuesto escenario 1

Variable	Escenario inicial		Escenario 1	
	Valor	α	valor	α
Gestores aprobados para asfalto	1	0.2	1	1
Gestores aprobados para GCR	6	0.85	3	0.99
Gestores aprobados para pirólisis	2	0.95	2	0.99
Gestores aprobados para TDF	1	0.9	4	0.9
Gestores aprobados uso artesanal	1	0.6	1	1
Tasa de rencauche	0.23		1	

Los resultados obtenidos con la configuración del escenario 1, reflejan que el inventario de llantas fuera de uso recolectadas por los SRS se reduciría en un 31%, requiriéndose aún disponer cerca de 43 millones de llantas usadas y con tendencia creciente como se observa en la figura 10.



Figura 10. Llantas fuera de uso a disponer por los SRS

El subsidio al gestor de aprovechamiento del 5% de los costos de producción tendrían un

efecto positivo sobre la eficiencia económica del sistema después del 2027 ver figura 11.

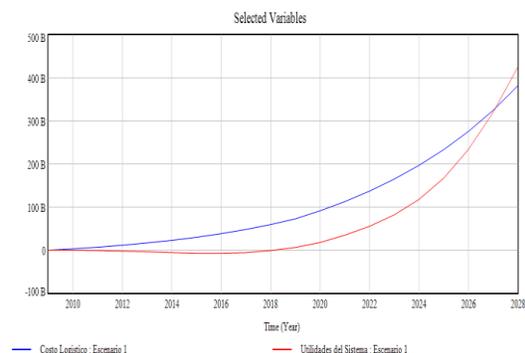


Figura 11. Eficiencia económica del sistema

Escenario propuesto 2

Basados en los ajustes del escenario 1, se incluye una reducción del 15% en el costo de gestión ambiental y recolección, asumido por el productor. La figura 12 muestra cómo, pese a ello, el beneficio económico total del sistema sigue estando por debajo del costo logístico. Esto se debe a que el margen de utilidad que generan los productos recuperados de las llantas fuera de uso es reducido, y depende en gran proporción de ingresos por gestionar y recoger el material. Por lo anterior, pensar en estrategias para mejorar la eficiencia logística del sistema representa principalmente ahorros para los actores de aprovechamiento, dado que, si se transfieren beneficios al productor reduciendo el costo asumido por él, se impacta fuertemente en la rentabilidad de los procesos de aprovechamiento. De manera que, para incentivar al productor, reduciendo el costo de gestión ambiental de sus llantas, se debe contar con ventas de producto superior al 90 % de la capacidad instalada y acompañar la estrategia con un subsidio en los costos de producción que soporte el ingreso y la utilidad del sistema para que esta sea superior.

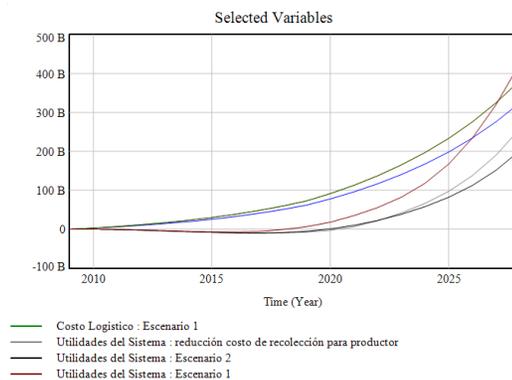


Figura 12. Eficiencia económica del sistema escenario 2

En la figura 13 y la tabla 3 se visualiza la rentabilidad de cada proceso de aprovechamiento de manera individual y el impacto que tienen las estrategias de eficiencia logística en el tiempo.

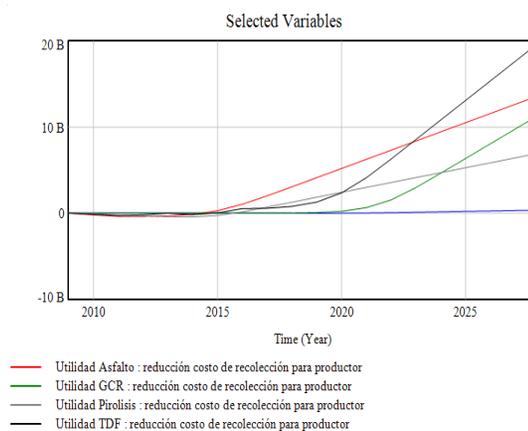


Figura 13. Utilidades de las alternativas de aprovechamiento si se reduce el 15% al productor del costo logístico

Tabla 3. Utilidades por alternativa reduciendo el 15% del costo logístico al Productor

Alternativa de aprovechamiento	Año de utilidad positiva iniciando desde el 2009	Valor positivo \$ COP	Valor 2028 \$ COP
Utilidad Artesanal :1	2021	1,45E+12	3,59E+12
Utilidad Artesanal :2	2021	1,45E+12	3,59E+12
Utilidad Asfalto : 1	2014	6,19E+11	1,62E+15
Utilidad Asfalto : 2	2015	2,83E+12	1,37E+15
Utilidad GCR : 1	2015	2,42E+11	1,38E+15
Utilidad GCR : 2	2017	1,96E+11	1,15E+15
Utilidad Pirolisis : 1	2016	3,22E+13	7,96E+14
Utilidad Pirolisis : 2	2016	1,51E+13	7,00E+14

Utilidad TDF : 1	2015	1,96E+13	2,28E+15
Utilidad TDF : 2	2015	2,80E+12	1,99E+15
1* Sin reducción costo de recolección para productor			
2* con Reducción costo de recolección para productor			

Bajo este panorama las alternativas de mayor potencial en términos de rentabilidad fuera del costo de inversión son las alternativas de combustión TDF y Pirolisis como se muestra en la tabla 3.

5. Conclusiones

La presente investigación permite identificar la estructura de la red inversa de llantas fuera de uso en la ciudad de Bogotá, a través del modelo de DS, se relacionaron las principales variables que influyen en el comportamiento del sistema desde la generación del PFU, la recolección, hasta el aprovechamiento y/o disposición final; con él, se logró validar tres hipótesis dinámicas descritas en la sesión 5, las cuales representan las principales barreras de entrada que experimenta una Pyme a la hora de participar o implementar un sistema de logística inversa para este producto relacionadas con: los costos logísticos de recolección, la capacidad de procesamiento del residuo frente a la generación de este y el desarrollo de un mercado para el material recuperado.

Se establecieron posibles políticas de intervención que fueron validadas satisfactoriamente en el modelo propuesto, encontrando como generalidad que: aún, cuando una llanta puede ser 100 % reciclada [41], la recuperación del valor potencial está limitada por los costos operacionales de la recolección y procesamiento actuales, que impactan en la competitividad del mercado equivalente a satisfacer. En otras palabras, comprender un sistema de logística inversa para PFU requiere: pasar de la vista tradicional basada en actividades individuales, a comprender la relación causal entre múltiples variables que determinan el comportamiento dinámico de un sistema a lo

largo del tiempo, se debe ir más allá de los límites técnicos y operativos y adoptar una perspectiva global del proceso de negocios [42].

El modelo DS propuesto mostró (en el escenario 2), cómo al tratar de resolver de manera aislada un problema de eficiencia logística reduciendo los costos de recolección asumidos por el productor, que permitiera desarrollar una estrategia que motivara al productor a participar, transfiriéndole beneficios económicos a su rol, resultó generando un efecto negativo en la rentabilidad de los procesos de aprovechamiento disponibles en el sistema. Esta situación obliga a concentrar los beneficios económicos en el eslabón de aprovechamiento a través de las exigencias legales para el productor, que estimula la vinculación a estos sistemas SRS.

La única manera en la que el productor percibe un ingreso económico por la logística inversa de este producto es mediante los ahorros que genera el proceso de rencauche, sin embargo, esto no es posible para todo tipo de llanta, representando una barrera para los productores de llantas no aptas para este proceso.

El modelo DS, mostró como barrera la baja rentabilidad de los procesos de aprovechamiento actualmente, por lo cual no se ve un potencial de crecimiento en el sector de reciclaje de llantas. Las alternativas que por volumen y menor dependencia de ingresos por recolección ambiental tienen en el tiempo son: la Trituración mecánica para combustión TDF y la pirólisis; estas empiezan a tener tendencia positiva después del año 2020. Sin embargo, para futuras investigaciones es clave analizar nuevas alternativas de aprovechamiento, fomentar procesos de Investigación, Desarrollo e innovación que busquen aplicaciones de este material en grandes volúmenes, en vista que, aun potenciando la capacidad instalada actual, no se logra procesar eficazmente las

llantas recolectadas en la ciudad, o en su defecto una alternativa es desestimular el consumo de llantas a través de nuevos medios de transporte, con lo cual se logre equilibrar el flujo de entrada de llantas fuera de uso, con la demanda de productos recuperados.

Finalmente cabe resaltar que este tipo de investigaciones ayudan a que los entes gubernamentales, entiendan el comportamiento del sistema y tomen decisiones más acertadas en el direccionamiento de programas, políticas y sanciones para el desarrollo de sistemas de logística inversa.

REFERENCIAS

- [1] J. L. Parada, “estructura organizativa de las empresas Capítulo 3 Logística inversa.”
- [2] Z. Wu and M. Pagell, “Balancing priorities: Decision-making in sustainable supply chain management,” *J. Oper. Manag.*, vol. 29, no. 6, pp. 577–590, 2011.
- [3] B. M. Beamon, “Supply chain design and analysis: Models and methods,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 55, p. 281 — 294, 1998.
- [4] C. D. R. De Souza and M. D. A. D’Agosto, “Value chain analysis applied to the scrap tire reverse logistics chain: An applied study of co-processing in the cement industry,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 78, pp. 15–25, 2013.
- [5] B. Mota, M. I. Gomes, A. Carvalho, and A. P. Barbosa-Povoa, “Towards supply chain sustainability: Economic, environmental and social design and planning,” *J. Clean. Prod.*, vol. 105, pp. 14–27, 2015.
- [6] S. Matos and J. Hall, “Integrating sustainable development in the supply chain: The case of life cycle assessment in oil and gas and agricultural biotechnology,” *J. Oper. Manag.*, vol. 25, no. 6, pp. 1083–1102, 2007.
- [7] D. J. Garcia and F. You, “Supply chain design and optimization: Challenges and opportunities,” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 81, pp. 153–170, 2015.
- [8] M. Mutingi, “The impact of reverse logistics in green supply chain management: a system dynamics analysis,” *Int. J. Ind. Syst. Eng.*, vol. 17, no. 2, p. 186, 2014.
- [9] G. Kannan, A. Noorul Haq, and M. Devika, “Analysis of closed loop supply chain using genetic algorithm and particle swarm optimisation,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 47, no. 5, pp. 1175–1200, 2009.
- [10] A. Fernández Colomina, “La gestion integral de los Residuos Sólidos Urbanos en el desarrollo sostenible local,” *Rev. Cuba. Química*, vol. 17, no. 3, pp. 35–39, 2005.
- [11] Conpes 3874, “Política Nacional Para La Gestión De Residuos Sólidos,” *Doc. CONPES 3874*, p. 73, 2016.
- [12] M. P. de Brito and R. Dekker, “A Framework for Reverse Logistics,” *Reverse Logist.*, pp. 3–27, 2004.
- [13] J. Sarkis, Q. Zhu, and K. H. Lai, “An organizational theoretic review of green supply chain management literature,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 130, no. 1, pp. 1–15, 2011.
- [14] M. Management, A. Gandolfo, and R. Sbrana, “Reverse Logistics and Market-Driven Management *,” *Emerg. Issue Manag.*, pp. 28–40, 2008.
- [15] G. Maquera, “Logística verde e Inversa, Responsabilidad Universitaria Socioambiental Corporativa y Productividad,” *Apunt. Univ.*, vol. 2, no. 1, pp. 31–54, 2012.
- [16] A. Cantanhede and G. Monge, “Estado del arte del manejo de llantas usadas en las américas,” *Div. Salud y Ambiente*, p. 41, 2002.
- [17] L. Flórez, E. Toro, and M. Granada, “Diseño de Redes de Logística Inversa: Una Revisión del Estado del Arte y Aplicación Práctica,” *Cienc. E Ing. Neogranadina*, vol. 22, no. 2, pp. 153–177, 2012.

- [18] Ministerio de Ambiente and D. Sostenible, “Resolución 1326 de 2017, Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de llantas usadas y se adoptan otras disposiciones.” pp. 1–22, 2017.
- [19] D. Vlachos, P. Georgiadis, and E. Iakovou, “A system dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 34, no. 2, pp. 367–394, 2007.
- [20] P. Arroyo López, M. Villanueva Bringas, J. Gaytan Iniestra, and M. García Vargas, “Simulación de la tasa de reciclaje de productos electrónicos. Un modelo de dinámica de sistemas,” *Contaduría y Adm.*, vol. 59, no. 1, pp. 9–41, 2014.
- [21] A. Díaz, M. J. Álvarez, and P. González, “Logística inversa y medio ambiente,” *Editor. Mc Graw-Hill Interam. España*, 2004.
- [22] Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo de Colombia, “Principios De La Gestión De Residuos Posconsumo,” 2017.
- [23] DECRETO 442, “Aprovechamiento Y/O Valorización De Llantas Usadas,” 2015.
- [24] Congreso de la República, “Ley 769 de 2002. Código de Transporte Terrestre,” p. 71, 2002.
- [25] M. D. E. Comercio, I. Y. Turismo, E. L. M. D. E. Comercio, and I. Y. Turismo, “0481 (4,” vol. 0481, pp. 1–16, 2009.
- [26] Cámara de Comercio de Bogotá, “Guía para el manejo de llantas usadas,” *Guía para el manejo llantas usadas*, vol. I, p. 56, 2006.
- [27] J. D. Sterman, *Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, vol. 6, no. 1. 2000.
- [28] I. Morlán Santa Catalina, “Modelo de Dinámica de Sistemas para la implantación de Tecnologías de la Información en la Gestión Estratégica Universitaria,” p. 396, 2010.
- [29] H. Akkermans and N. Dellaert, “The rediscovery of industrial dynamics: The contribution of system dynamics to supply chain management in a dynamic and fragmented world,” *Syst. Dyn. Rev.*, vol. 21, no. 3, pp. 173–186, 2005.
- [30] M. Schröter and T. Spengler, “A system dynamics model for strategic management of spare parts in closed-loop supply chains,” pp. 1–13, 2002.
- [31] P. Georgiadis and D. Vlachos, “Decision making in reverse logistics using system dynamics,” *Yugosl. J. Oper. Res.*, vol. 14, no. 2, pp. 259–272, 2004.
- [32] S. K. Srivastava, “Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review,” *International J. Manag. Rev.*, vol. 9, pp. 53–80, 2007.
- [33] D. Vlachos., P. Georgiadis, , & Iakovou, E.. A system dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains. *Computers & OR*, 34, 367-394. 2007.
- [34] H. Yao, L. Shen, Y. Tan, and J. Hao, “Simulating the impacts of policy scenarios on the sustainability performance of infrastructure projects,” *Autom. Constr.*, vol. 20, no. 8, pp. 1060–1069, 2011.
- [35] A. Wee Kwan Tan and A. Kumar, “A decision-making model for reverse logistics in the computer industry,” *Int. J. Logist. Manag.*, vol. 17, no. 3, pp. 331–354, 2006.
- [36] S. Camargo Rodríguez, J. A. Franco López, V. L. Chud Pantoja, and J. C. Osorio Gómez, “Modelo de simulación dinámica para evaluar el impacto ambiental de la producción y logística inversa de las llantas TT - Dynamic simulation model to evaluate the environmental impact of production and reverse logistics of tire,” *Ing. y Desarro.*, vol. 35, no. 2, pp. 357–381, 2017.
- [37] R. D. and R. S., “Going Backwards : Reverse Logistics Trends and Practices Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices,” 1999.
- [38] C. Ramírez, J. P. Cruz, and E. Romero,

- “Sistema de Logística Inversa de Llantas Usadas en la ciudad de Bogotá D . C . Modelo de Dinámica de Sistemas.”, <https://comunidadcolombianads.com/>, 2018.
- [39] N. Técnica, “2013-03-20 proceso para el renovado de llantas (reencauche),” no. 571, 2013.
- [40] Asociación Colombiana de Rencauchadores de Llantas y Afines ANRE, “Rencauche de Llantas,” in *transporte de Carga y Pasajeros*, 2017, p. 12.
- [41] Tratamiento de Neumáticos Usados TNU, “Reciclar para ser sostenible,” Almansa, España, 2015.
- [42] L. N. Guide, V. D. R., & Van Wassenhove, “OR FORUM—The Evolution of Closed-Loop Supply Chain Research,” *Oper. Res.*, vol. 57, no. 1, pp. 10–18, 2009.

4. Conclusiones y Recomendaciones

La logística inversa está atrayendo la atención de industriales y académicos, debido a los impactos negativos en el ambiente atribuidos a la creciente generación de residuos (Prajapati, Kant, Shankar, 2018). Sin embargo, pese a que la logística inversa es considerada a nivel mundial como una estrategia que genera ventaja competitiva, su implementación no es una tarea trivial (Mutingi, 2014). Las organizaciones incurren en gastos significativos inicialmente, lo que evoca el interés en la administración para responder a la pregunta crítica de qué beneficio se destinarán al medio ambiente, a la sociedad y la organización misma (Gharaei, Naderi y Mohammadi, 2015).

El análisis de las barreras de entrada corresponde a la etapa inicial para la implantación de un sistema de logística inversa, en ella se revisa la conveniencia e interés que se busca con dicho sistema (Kopicki, et al, 1993). Estas barreras pueden representar el poco interés de las organizaciones por procesos de logística inversa cuando centran su atención en el corto plazo considerando netamente los costos en los que incurre la implantación de un sistema de este tipo, sumado al poco compromiso con la responsabilidad extendida de la organización, esto ligado a la rigurosidad con la que establezca el cumplimiento de la normatividad medioambiental, entre otros aspectos (Martí Frías, 2014).

La metodología de Dinámica de Sistemas es un poderoso enfoque para reflejar la interacción compleja y las relaciones dinámicas de múltiples factores causales en cadenas de suministro sostenibles. (Rebs, Brandenburg, Seuring, 2019). En el presente estudio, a través del modelo DS se logró identificar las barreras de entrada que inciden en la participación de una Pyme en un sistema de logística Inversa para la recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas de vehículos en la ciudad de Bogotá, D.C. se halló gran impacto en factores de efectividad del sistema; pues más allá de cumplir con las exigencias legales establecidas para este tipo de productos, se requieren motivaciones económicas y operacionales que faciliten la implementación de estas iniciativas.

De acuerdo con los resultados observados a través del modelo DS, el costo de recolectar, transportar y gestionar ambientalmente la disposición de llantas usadas es alto en comparación con los beneficios económicos que se puedan captar a través de las alternativas de aprovechamiento disponibles actualmente en mercados poco desarrollados para este tipo de materiales. Sin embargo, se resalta el potencial de las alternativas de aprovechamiento como: Trituración mecánica para combustión TDF y la Pírolisis por su alto volumen de procesamiento y demanda constante, los cuales pueden mejorar sus niveles de rentabilidad apoyados en incentivos tributarios que disminuyan sus costos de producción.

La dinámica de consumo de llantas y generación de llantas fuera de uso en la ciudad muestra un comportamiento creciente lineal, generando un complejo reto en función de

la capacidad instalada para recolectar, transportar y tratar el PFU en el tiempo, pues el aprovechamiento debería darse con el mismo ritmo que las metas de recolección para equilibrar los flujos del sistema. Sin embargo, la dinámica del mercado para productos reciclados de estas prácticas limita el crecimiento en la capacidad instalada para el aprovechamiento, restándole efectividad y eficiencia al sistema.

En Colombia, aún hay mucho camino por explorar en materia de logística inversa, la apropiación de este tipo de estrategias en la cadena de suministro recae en un tema de cultura y establecimiento de políticas públicas. Estas últimas se han desdibujado a consecuencia de la incapacidad de consenso entre el sector académico, gubernamental y sectores productivos. Tal como lo describe Arroyave (2010), existen vacíos académicos y técnicos, resultado del poco tiempo que lleva su utilización y los altos grados de empirismo con que se ejecutan. Investigaciones como el presente trabajo de grado, son herramientas puestas sobre la mesa que ayudan a que los entes gubernamentales, entiendan el comportamiento del sistema y tomen decisiones más acertadas en el direccionamiento de programas, políticas y sanciones para el desarrollo de sistemas de logística inversa.

El presente estudio contiene limitaciones como: la consolidación de información base para la formulación matemática del modelo, dado que algunos de los entrevistados en la fase inicial, consideraron datos de: costos de producción, margen de utilidad o volumen de ventas como información confidencial de la empresa, ante ello se sugirieron datos aproximados, que en comparación con la información real y exacta, el modelo DS puede mostrar algunas variaciones en los resultados obtenidos. Por otra parte, se tuvo acceso a información actores vinculados a Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas (SRS) de tipo Colectivo. La percepción de los costos logísticos asociados al sistema puede variar en un SRS individual quien administra toda la red inversa para la cantidad de su producto fuera de uso generado.

Recomendaciones

Para futuras investigaciones, es conveniente explorar el comportamiento del modelo incluyendo nuevas alternativas de aprovechamiento masivo de llantas fuera de uso desarrolladas por proyectos de Investigación, Desarrollo e Innovación que tengan un mercado potencial que atender.

En términos de costos de operación es importante valorar la rentabilidad de las alternativas de aprovechamiento incluyendo los costos de inversión en los que se incurre para implantar una alternativa de aprovechamiento, valorando el retorno a dicha inversión.

Con la presente investigación se logró avanzar de forma innovadora y relevante en las herramientas disponibles para tomar decisiones en torno a sistemas de recolección y

logística inversa. El desarrollo alcanzado en esta investigación es un avance innovador y relevante para el campo de la industria automotriz que abre las puertas para seguir explorando y generando conocimiento en la rama de la logística inversa y de la dinámica de sistemas como herramienta para mejorar la toma de decisiones de entidades gubernamentales.

Bibliografía

- Akkermans, H., & Dellaert, N. (2005). The rediscovery of industrial dynamics: The contribution of system dynamics to supply chain management in a dynamic and fragmented world. *System Dynamics Review*, 21(3), 173–186. <https://doi.org/10.1002/sdr.317>
- Arroyo López, P., Villanueva Bringas, M., Gaytan Iniestra, J., & García Vargas, M. (2014). Simulación de la tasa de reciclaje de productos electrónicos. Un modelo de dinámica de sistemas. *Contaduría y Administración*, 59(1), 9–41. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0186-1042\(14\)71242-2](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0186-1042(14)71242-2)
- Asociación Colombiana de Rencauchadores de Llantas y Afines ANRE. (2017). Rencauche de Llantas. In *transporte de Carga y Pasajeros* (p. 12).
- Ballou, R. H. (2004). *Logística Administración de la cadena de suministro*.
- Beamon, B. M. (1998). Supply chain design and analysis: Models and methods. *Int. J. Production Economics*, 55, 281 — 294. Retrieved from <https://es.scribd.com/document/250217795/Supply-chain-design-and-analysis-pdf>
- Cámara de Comercio de Bogota. (2006). Guía para el manejo de llantas usadas. *Guía Para El Manejo de Llantas Usadas, I*, 56. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Camargo Rodríguez, S., Franco López, J. A., Chud Pantoja, V. L., & Osorio Gómez, J. C. (2017). Modelo de simulación dinámica para evaluar el impacto ambiental de la producción y logística inversa de las llantas TT - Dynamic simulation model to evaluate the environmental impact of production and reverse logistics of tire. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(2), 357–381. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612017000200357&lang=es%0Ahttp://www.scielo.org.co/pdf/inde/v35n2/2145-9371-inde-35-02-00357.pdf
- Cantanhede, A., & Monge, G. (2002). Estado del arte del manejo de llantas usadas en las américas. *Division de Salud y Ambiente*, 41.
- Cely, A. (2013). Importancia de la logística inversa para un desarrollo sostenible en Colombia. *La Salle*, 6(2), 14. Retrieved from <http://revistas.lasalle.edu.co/index.php/gs/article/viewFile/2840/2382>
- CEMPRE Colombia. (2018). CEMPRE (Compromiso Empresarial para el Reciclaje). Retrieved from <https://cempre.org.co/quienes-somos/>
- Chacón Vargas, R., & Moreno Mantilla, E. (2016). Organizational antecedents and capabilities for management in developing Colombian focal firms *. *Cuadernos de Administración*, 29, 101–146. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cao29-53.oacs>.
- Chanintrakul, P., Mondragon, A. E. C., Lalwani, C., & Wong, C. Y. (2009). Int. J. Business Performance and Supply Chain Modelling. *Business*, 1(1), 61–81.
- Chhabra, D., Garg, S. K., & Singh, R. K. (2018). Analyzing alternatives for green logistics in an Indian automotive organization: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 167, 962–969. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.158>
- Chopra, S., & Meindl, P. (2008). *Administración de la cadena de suministro - Estrategia, Planeación y Operación*. Retrieved from <https://alandap.files.wordpress.com/2015/10/administracion-de-la-cadena-de-suministro-estrategia-planeacion-y-operacion-sunil-chopra-peter-meindl.pdf>
- Christopher, M. (1993a). Logistics and competitive strategy. *European Management Journal*, 11(2), 258–261. [https://doi.org/10.1016/0263-2373\(93\)90049-N](https://doi.org/10.1016/0263-2373(93)90049-N)
- Cipolletta, G., Pérez, G., & Sánchez, R. (2010). *Políticas integradas de infraestructura, transporte y logística: experiencias internacionales y propuestas iniciales*. CEPAL Serie Recursos Naturales e Infraestructura. <https://doi.org/10.3989/arbor.2000.i653.1000>

- CISCO. (2018). Sostenibilidad ambiental de la RSE. Retrieved from <https://www.cisco.com/c/en/us/about/csr/impact/environmental-sustainability.html>
- Comercio, M. D. E., Turismo, I. Y., Comercio, E. L. M. D. E., & Turismo, I. Y. (2009). 0481 (4, 0481, 1–16.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de. (n.d.). Guía para el uso eficiente de la energía en el transporte. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/95197/cuidado_de_neumaticos.pdf
- Congreso de la Republica. (2002). Ley 769 de 2002. Código de Transporte Terrestre., 71.
- Conpes 3874. (2016). Política Nacional Para La Gestión De Residuos Sólidos. *Documento CONPES 3874*, 73. Retrieved from <http://www.andi.com.co/Ambiental/SiteAssets/Paginas/default/CONPES3874.pdf>
- D., R., & S., R. (1999). Going Backwards : Reverse Logistics Trends and Practices Going Backwards : Reverse Logistics Trends and Practices.
- de Brito, M. P., & Dekker, R. (2004). A Framework for Reverse Logistics. *Reverse Logistics*, 3–27. https://doi.org/10.1007/978-3-540-24803-3_1
- De Souza, C. D. R., & D’Agosto, M. D. A. (2013). Value chain analysis applied to the scrap tire reverse logistics chain: An applied study of co-processing in the cement industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 78, 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.06.007>
- DECRETO 442. (2015). Aprovechamiento Y/O Valorización Dellantas Usadas.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE. (2016). Cuenta satélite ambiental (CSA). Retrieved from <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/ambientales/cuenta-satelite-ambiental-csa>
- Departamento Nacional de Planeación. (2014). Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018. *Documento CONPES 3582 Versión Para El Congreso*, 370. Retrieved from <https://www.dnp.gov.co/Portals/0/archivos/documentos/Subdireccion/Conpes/3582.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación. (2015). Encuesta Nacional de Logística 2015, 1–108. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Díaz, A., Álvarez, M. J., & González, P. (2004). Logística inversa y medio ambiente. *Editorial: Mc Graw–Hill Interamericana de España*.
- Fabbe-Costes, N., Roussat, C., Colin, J., (2011). Future sustainable supply chains: what should companies scan? *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.* 41 (3), 241.
- Fernández Colomina, A. (2005). La gestión integral de los Residuos Sólidos Urbanos en el desarrollo sostenible local. *Revista Cubana de Química*, 17(3), 35–39. <https://doi.org/10.5944/educxx1.17.1.10708>
- Flórez, L., Toro, E., & Granada, M. (2012). Diseño de Redes de Logística Inversa: Una Revisión del Estado del Arte y Aplicación Práctica. *Ciencia E Ingeniería Neogranadina*, 22(2), 153–177. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2014.23-2.11>
- García, D. J., & You, F. (2015). Supply chain design and optimization: Challenges and opportunities. *Computers and Chemical Engineering*, 81, 153–170. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.03.015>
- Gharaei, A., Naderi, B., & Mohammadi, M. (2015). Optimization of rewards in single machine scheduling in the rewards-driven systems. *Management Science Letters*, 5(6), 629–638.
- Gaytán, J. (2007). Logística Inversa Una segunda oportunidad de negocio.
- Georgiadis, P., & Vlachos, D. (2004). Decision making in reverse logistics using system dynamics. *Yugoslav Journal of Operations Research*, 14(2), 259–272. <https://doi.org/10.2298/YJOR0402259G>

- González, B., Múgica, B. (1998). La Dinámica De Sistemas Como Metodología Para La Elaboración De Modelos De Simulación. recuperado de:https://econo.uniovi.es/c/document_library/get_file?uuid=0e924324-4aae-4cc7-ad77-d8561bd29457&groupId=746637
- Green, K. W., Whitten, D., & Inman, R. A. (2008). The impact of logistics performance on organizational performance in a supply chain context. *Supply Chain Management*, 13(4), 317–327. <https://doi.org/10.1108/13598540810882206>
- Größler, A., Thun, J.-H., & Milling, P. M. (2008). System Dynamics as a Structural Theory in Operations Management. *Production and Operations Management*, 17(3), 373–384. <https://doi.org/10.3401/poms.1080.0023>
- Guide, V. D. R., & Van Wassenhove, L. N. (2009). OR FORUM—The Evolution of Closed-Loop Supply Chain Research. *Operations Research*, 57(1), 10–18. <https://doi.org/10.1287/opre.1080.0628>
- Hall, J., & Vredenburg, H. (2003). The Challenges of Innovating for Sustainable Development. *MIT Sloan Management Review*, 45(ISSN 1532-9194), 61–68.
- ICONTEC. (2014). NORMA TECNICA COLOMBIANA 1304: LLANTAS NEUMÁTICAS. DEFINICIONES, CLASIFICACIÓN Y DESIGNACIÓN.
- Jiménez, J. E., & Hernández, S. (2002). Marco conceptual de la cadena de suministro : un nuevo enfoque logístico. *Instituto Mexicano Del Transporte*, (215), 1–272. Retrieved from <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt215.pdf>
- Kannan, G., Noorul Haq, A., & Devika, M. (2009). Analysis of closed loop supply chain using genetic algorithm and particle swarm optimisation. *International Journal of Production Research*, 47(5), 1175–1200. <https://doi.org/10.1080/00207540701543585>
- Kirby, C., & Brosa, N. (2011). La logística como factor de competitividad de las PyMEs en las Américas, 39. Retrieved from file:///C:/Users/JuanPC/Downloads/Kirby_Brosa_final_Logistics-as-a-Competitiveness-Factor-for-SMEs-spanish.pdf%0Ahttps://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/5089/La%20logística%20como%20factor%20de%20competitividad%20de%20las%20PyMEs%20en%20las%20Américas.pdf?sequence
- Kopicki, R., Berg, M. ., & Legg, L. (1993). *Reuse and recycling - reverse logistics opportunities*. United States. Estados Unidos.
- Krikke, Harold, le Blanc, Ieke, Van de Velde, S. (2004). Product Modularity and the Design of Closed-Loop Supply Chains. *California Management Review*, 46(2), 23–39.
- Lai, K. hung, & Wong, C. W. Y. (2012). Green logistics management and performance: Some empirical evidence from Chinese manufacturing exporters. *Omega*, 40(3), 267–282. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2011.07.002>
- Larson, P. & Halldorsson, A. (2004) Logistics Versus Supply Chain Management: An International Survey. *International Journal of Logistics: Research and Applications* Vol. 7, No. 1, 17-31. DOI: 10.1080/13675560310001619240
- Management, M., Gandolfo, A., & Sbrana, R. (2008). Reverse Logistics and Market-Driven Management *. *Emerging Issue in Management*, 28–40.
- Maquera, G. (2012). Logística verde e Inversa, Responsabilidad Universitaria Socioambiental Corporativa y Productividad. *Apuntes Universitarios*, 2(1), 31–54. <https://doi.org/10.17162/AU.V0I1.16.G13>
- Martí Frías, B. (2014). La Logística Inversa: Gestión De RAEss. Valencia, España.
- Matos, S., & Hall, J. (2007). Integrating sustainable development in the supply chain: The case of life cycle assessment in oil and gas and agricultural biotechnology. *Journal of Operations Management*, 25(6), 1083–1102. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2007.01.013>
- McKinnon, A, Cullinane, S, Browne, M, Whiteing, A. (2010). Sustainability : a new priority for logistics

- managers. In *Green logistics: Improving the environmental sustainability of logistics* (pp. 4–30).
- Mesa sectorial de logística, & SENA. (2014). Caracterización del sector de la logística en Colombia 2014. *Igarss 2014*, (1), 1–5. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Michellin. (2018). Renoboy. Retrieved from <http://renoboy.com/pensando-en-reencauchar/>
- Mihi, A. (2007). Nuevos beneficios de la logística inversa para empresas europeas y colombianas. *Universidad & Empresa*, 6(12), 48–61.
- Ministerio de Ambiente, & Sostenible, D. (2017). Resolución 1326 de 2017, Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de llantas usadas y se adoptan otras disposiciones.
- MINISTERIO DE COMERCIO, I. Y. T. D. 2006 ". (2006). DECRETO NÚMERO 3803 31 OCT 2006 DE 2006, 1–5. Retrieved from <http://www.miPyMEs.gov.co>
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo de Colombia. (2017). Principios De La Gestión De Residuos Posconsumo. Retrieved from http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Programa_y_consumo_sostenible/programas_posconsumo_2017/Boletin_posconsumo_2017/001.pdf
- Montoya, R. A. G. (2010). Logística inversa un proceso de impacto ambiental y productividad. *Inverse Logistics a Process with Environmental and Productivity Impacts. (English)*, 5(2), 1–14. <https://doi.org/10.4304/jcp.7.11.2765-2772>
- Morlán Santa Catalina, I. (2010). Modelo de Dinámica de Sistemas para la implantación de Tecnologías de la Información en la Gestión Estratégica Universitaria, 396. Retrieved from <http://www.ehu.es/i.morlan/tesis/memoria/TesisIM04.pdf>
- Mota, B., Gomes, M. I., Carvalho, A., & Barbosa-Povoa, A. P. (2015). Towards supply chain sustainability: Economic, environmental and social design and planning. *Journal of Cleaner Production*, 105, 14–27. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.052>
- MOTOR. (2018). No Title. Retrieved from <http://www.motor.com.co/actualidad/industria/reparables-son-llantas-jueves-mecanica/30166>
- Mutingi, M. (2014). The impact of reverse logistics in green supply chain management: A system dynamics analysis. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 17(2), 186–201. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2014.061993>
- Nuss, C., Sahamie, R., & Stindt, D. (2015). The Reverse Supply Chain Planning Matrix: A Classification Scheme for Planning Problems in Reverse Logistics. *International Journal of Management Reviews*, 17(4), 413–436. <https://doi.org/10.1111/ijmr.12046>
- OECD POLICY HIGHLIGHTS. (2016). Extended Producer Responsibility. <https://doi.org/10.1787/9789264256385-en>
- Oviedo, S., Leiva, A., & Forradellas, R. (2013). Dinámica de Sistemas : Modelado Flexible en Logística, 194–205.
- Parada, J. L. (n.d.). estructura organizativa de las empresas Capítulo 3 Logística inversa.
- Prajapati H., Kant, R., Shankar, R. (2018). Bequeath life to death: State-of-art review on reverse logistics, *Journal of Cleaner Production*, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.187
- Rachih, H., Mhada, F. Z., & Chiheb, R. (2019). Meta-heuristics for reverse logistics: A literature review and perspectives. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 45–62. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.058>
- Ramírez, C., Cruz, J. P., & Romero, E. (n.d.). Sistema de Logística Inversa de Llantas Usadas en la ciudad de Bogotá D . C . Modelo de Dinámica de Sistemas.
- Ramirez Londoño, D. A., & Valencia Tobón, M. (2012). Modelo de Simulación Continua para la Gestión

- de la Cadena de Suministros en Productos con Ciclo de Vida Corto, (c), 1–46.
- Rebs, T., Brandenburg, M., y Seuring, S. (2018). System dynamics modeling for sustainable supply chain management: A literature review and systems thinking approach, *Journal of Cleaner Production* (2018), doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.100
- Rogers, D.S., Tibben Lembke, R. . (1998). *Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices. Reverse Logistics Executive Council, Tesis Doctoral. Reno Center for Logistics Management. University of Nevada.*
- Sarkis, J., Zhu, Q., & Lai, K. H. (2011). An organizational theoretic review of green supply chain management literature. *International Journal of Production Economics*, 130(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.11.010>
- Schröter, M., & Spengler, T. (2002). A system dynamics model for strategic management of spare parts in closed-loop supply chains, 1–13.
- Serra, D. (2005). *La logística empresarial en el nuevo milenio*. (G. P. (GBS), Ed.). Barcelona.
- Servera-Francés, D. (2010). Concepto y evolución de la función logística. *Revista Innovar Journal Revista de Ciencias Administrativas y Sociales*, 20(38), 217–234. Retrieved from <https://revistas.unal.edu.co/index.php/innovar/article/view/22403/34728>
- Shannon, R. E. (1988). *Simulación de sistemas: diseño, desarrollo e implementación* (1a. ed.). México.
- Srivastava, S. K. (2007). Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. *International Journal of Management Reviews*, 9, 53–80. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2370.2007.00202.x>
- Sterman, J. D. (2000). *Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Management* (Vol. 6). <https://doi.org/10.1108/13673270210417646>
- Técnica, N. (2013). 2013-03-20 proceso para el renovado de llantas (reencauche), (571).
- Tratamiento de Neumáticos Usados TNU. (2015). *Reciclar para ser sostenible*. Almansa, España. Retrieved from www.tnu.es
- Vlachos, D., Georgiadis, P., & Iakovou, E. (2007). A system dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains. *Computers and Operations Research*, 34(2), 367–394. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.03.005>
- Wee Kwan Tan, A., & Kumar, A. (2006). A decision-making model for reverse logistics in the computer industry. *The International Journal of Logistics Management*, 17(3), 331–354. <https://doi.org/10.1108/09574090610717518>
- Wu, Z., & Pagell, M. (2011). Balancing priorities: Decision-making in sustainable supply chain management. *Journal of Operations Management*, 29(6), 577–590. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2010.10.001>
- Yao, H., Shen, L., Tan, Y., & Hao, J. (2011). Simulating the impacts of policy scenarios on the sustainability performance of infrastructure projects. *Automation in Construction*, 20(8), 1060–1069. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.04.007>

Abreviaciones

ANLA Autoridad Nacional de Licencias Ambientales

DS Dinámica de Sistemas

MADS Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

SRS Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas

Apéndices

1. Entrevistas semiestructuradas

ENTREVISTA

Fecha: _____

Entrevistador: Cristina Ramírez Meneses

Formato de entrevista semi-estructurada	
<p>Esta entrevista fue diseñada y realizada por la ingeniera Cristina Ramírez Meneses, candidata a Magíster en Ingeniería Industrial con énfasis en Logística, de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.</p> <p>El objetivo de esta entrevista es poder obtener información sobre la percepción de las empresas, con relación a las barreras de entrada que experimenta una Pymes en una red logística inversa de llantas usadas en la ciudad de Bogotá D.C, abordando sistémicamente factores: económicos, legales, operativos y sociales .</p> <p>La encuesta consta de 8 preguntas dirigidas a directores y o gerentes logísticos. <i>El origen de la información obtenida será completamente confidencial y no comprometerá de ninguna manera a las personas o empresas que participen.</i></p>	
Rol en el sistema: (Según Resolución 1326 de 2017)	Productor de Llantas Usadas
Nivel:	Estratégico - Táctico
<ol style="list-style-type: none">1. ¿La empresa tiene o hace parte de un Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas?2. En promedio ¿Qué cantidad y con qué frecuencia su empresa genera llantas fuera de uso?3. ¿Qué hace con las llantas fuera de uso generadas en la operación?4. ¿La empresa paga algún valor al gestor del sistema para realizar los procesos de recolección y disposición final de llantas usadas?, en caso de que si considera que el monto es razonable frente al servicio prestado?5. ¿Cuáles son las principales motivaciones que tiene su empresa para implementar un sistema de logística inversa con este producto?6. ¿Cuáles son las limitaciones que puede tener una empresa en el contexto colombiano para el manejo de llantas usadas?7. ¿Cuáles son los aspectos que podrían mejorar en el sistema actual?8. ¿Considera que la gestión de llantas usadas genera alguna ventaja competitiva para las organizaciones que participan en esta cadena de suministro? <p><i>Deseas anexar algo más referente al tema de estudio?</i> <i>¿Las preguntas fueron claras?, ¿Considera que puedo mejorar algo para el desarrollo de esta entrevista?</i></p>	

ENTREVISTA

Fecha: _____

Entrevistador: Cristina Ramírez Meneses

Formato de entrevista semi-estructurada	
<p>Esta entrevista fue diseñada y realizada por la ingeniera Cristina Ramírez Meneses, candidata a Magíster en Ingeniería Industrial con énfasis en Logística, de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.</p> <p>El objetivo de esta entrevista es poder obtener información sobre la percepción de las empresas, con relación a las barreras de entrada que experimenta una Pymes en una red logística inversa de llantas usadas en la ciudad de Bogotá D.C, abordando sistémicamente factores: económicos, legales, operativos y sociales .</p> <p>La encuesta consta de 7 preguntas dirigidas a directores y o gerentes logísticos. <i>El origen de la información obtenida será completamente confidencial y no comprometerá de ninguna manera a las personas o empresas que participen.</i></p>	
Rol en el sistema: (Según Resolución 1326 de 2017)	Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas
Nivel:	Estratégico - Táctico
<ol style="list-style-type: none">1. ¿Cómo está estructurado su Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas?2. ¿Cuál es el procedimiento para que una empresa pueda hacer parte de su Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas?3. ¿Es posible operar sin generarle costos al consumidor al momento de la entrega de las llantas usadas? ¿qué se necesita para lograrlo?4. ¿Cuáles de las alternativas de aprovechamiento y/o valorización de su sistema considera que es la que genera mayor rentabilidad?5. ¿Por qué no todas las empresas están asociadas a su Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas?6. ¿Cuáles considera que son las barreras que tiene una Pyme en Colombia para asociarse a un sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas?7. ¿Cuáles han sido las principales dificultades presentadas para dar cumplimiento a las metas establecidas en la Resolución 1326 de 2017?	

ENTREVISTA

Fecha: _____

Entrevistador: Cristina Ramírez Meneses

Formato de entrevista semi-estructurada	
<p>Esta entrevista fue diseñada y realizada por la ingeniera Cristina Ramírez Meneses, candidata a Magíster en Ingeniería Industrial con énfasis en Logística, de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.</p> <p>El objetivo de esta entrevista es poder obtener información sobre la percepción de las empresas, con relación a las barreras de entrada que experimenta una Pymes en una red logística inversa de llantas usadas en la ciudad de Bogotá D.C, abordando sistémicamente factores: económicos, legales, operativos y sociales .</p> <p>La encuesta consta de 8 preguntas dirigidas a directores y o gerentes logísticos. <i>El origen de la información obtenida será completamente confidencial y no comprometerá de ninguna manera a las personas o empresas que participen.</i></p>	
Rol en el sistema: (Según Resolución 1326 de 2017)	Gestor de aprovechamiento
Nivel:	Estratégico - Táctico
<ol style="list-style-type: none">1. ¿Cómo es el proceso para que una llanta usada llegue a su empresa?2. ¿Cómo captura valor nuevamente de las llantas usadas?3. ¿considera que su modelo de negocio es rentable? ¿qué se necesita para lograrlo?4. ¿Cuál es la ventaja de los productos recuperados de las llantas usadas en el mercado en comparación de productos nuevos o sustitutos?5. ¿Qué características tiene el mercado colombiano para los productos recuperados de llantas usadas?6. ¿Cuál es su capacidad de producción anual?7. ¿Cuáles son los aspectos que podrían mejorar en el sistema actual?8. ¿Considera que la gestión de llantas usadas genera alguna ventaja competitiva para las organizaciones que participan en esta cadena de suministro?	

1. cifras del Parque automotor y generación de llantas

Año	Parque Automotor Bogotá				Llantas en uso en Bogotá			Tasa de Consumo de llantas	Importaciones de llantas	Tasa de Importación de Llantas Nuevas
	Vehículos Particulares (NVP)	Vehículos de Servicio Público Colectivo (NVTPC)	Vehículos de Transporte Público Individual (NVTPI)	Vehículos de Transporte aptos para Rencauche (2,9%)	Vehículos x4 llantas (NVP)	Vehículos x 6 llantas (NVP)	Total Llantas en Uso			
Columna	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Formula	-	-	-	$(A+B+C)*2,9\%$	$((A+B+C)-D)*4$	$D*6$	$E+F$	G/G_{t-1}		(G/I)
2007	839251	18482	51370	26364	3530956	158184	3.689.139			
2008	915647	17536	51502	28556	3833284	171335	4.004.619	1,086		
2009	978613	16963	51741	30372	4083812	182233	4.266.045	1,065	4.519.580	1,06
2010	1070572	16668	51798	33032	4450696	198193	4.648.888	1,090	5.558.095	1,20
2011	1184387	16047	51636	36310	4902824	217860	5.120.684	1,101	6.239.591	1,22
2012	1289495	13588	51614	39286	5313332	235717	5.549.049	1,084	5.885.679	1,06
2013	1389531	16011	51486	42254	5722656	253523	5.976.178	1,077	5.539.405	0,93
2014	1492483	16440	52360	45277	6139676	271663	6.411.339	1,073	5.390.957	0,84
2015	1567155	14532	52390	47388	6430852	284329	6.715.181	1,047	5.494.949	0,82
2016	2103725	24440	50598	63184	8609596	379105	8.988.700	1,339	6.670.955	0,74
2017	2182578	4734	49779	64876	8842908	389254	9.232.161	1,027	6.516.103	0,71

Fuente: Encuesta Distrital de Movilidad 2015

<http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/temas?v=6&p=21>

Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Santa Fe de Bogotá:

<http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/0/Llantas.pdf>

Secretaría Distrital de Ambiente, Observatorio Ambiental de Bogotá

<http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/temas?v=6&p=21>

Sistema de Inteligencia Comercial- Legiscomex, <https://www.legiscomex.com/>

2. Comparación Cifras Modelos DS, con Pronóstico y Datos Históricos

Año	Cifras históricas de Llantas en Uso Unidades	Pronóstico llantas en Uso $Y=\alpha+\beta x+\epsilon$		Modelo DS	Error Porcentual Absoluto Medio Modelo Vr Histórico	Error Porcentual Absoluto Medio Modelo Vr Pronóstico
		α	-1,08E+09			
		β	539811			
2007	3689140	3173852	0,139677072			
2008	4004619	3713663	0,072655162			
2009	4266045	4253474	0,002946746	4519580	0,059430873	0,062561972
2010	4648889	4793286	0,031060515	4831430	0,039265586	0,007957895
2011	5120684	5333097	0,041481289	5164800	0,00861521	0,031557052
2012	5549049	5872908	0,058362927	5521170	0,005024163	0,059891639
2013	5976179	6412719	0,07304675	5902130	0,012390681	0,079621349
2014	6411339	6952531	0,084411592	6309380	0,015902963	0,092505978
2015	6715181	7492342	0,115731865	6744730	0,004400261	0,099783477
2016	8988701	8032153	0,10641667	7210110	0,19786962	0,102344064
2017	9232162	8571964	0,071510597	7707610	0,165134874	0,100835052
2018		9111776	(MAPE)= 7,2%	8239440	(MAPE)= 6%	0,095737185
2019		9651587		8807960		0,087408116
2020		10191398		9415710		0,076112059
2021		10731210		10065400		0,062044226
2022		11271021		10759900		0,045348232
2023		11810832		11502300		0,026122812
2024		12350643		1229600		0,900442434
2025		12890455		13144400		0,019700259
2026		13430266		14051400		0,046248825
2027		13970077		15020900		0,075219537
2028		14509889	16057400	0,106652195		
					(MAPE)=	11%

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{|A_t - F_t|}{|A_t|}}{n}$$

Año	Llantas fuera de uso/año Cifras Históricas	Tasa de Generación de Llantas Fuera de Uso	Pronóstico de generación de Llantas Usadas	Modelo DS	Error Porcentual Absoluto Medio Modelo Vr Histórico	Error Porcentual Absoluto Medio Modelo Vr pronóstico
2007	1636949,044	0,44372104	1622544,064			
2008	1773043,505	0,44274958	1761297,003			
2009	1885819,937	0,44205343	1876276,417	1807830	0,0414	0,0365
2010	2050974,604	0,44117525	2044657,226	1932570	0,0577	0,0548
2011	2254502,283	0,44027364	2252160,629	2065920	0,0836	0,0827
2012	2439294,512	0,43958782	2440562,601	2208470	0,0946	0,0951
2013	2623553,757	0,43900188	2628421,179	2660850	0,0142	0,0123
2014	2811277,395	0,4384852	2819811,823	2523750	0,1023	0,1050
2015	2942351,728	0,43816414	2953446,57	2697890	0,0831	0,0865
2016	3923124,233	0,43645064	3953377,549	2884040	0,2649	0,2705
2017	4028150,796	0,43631718	4060455,708	3083040	0,2346	0,2407
	Tasa=	0,43981635	4007507,921	3295770	(MAPE)=	0,1776
			4244925,745	3523180	11%	0,1700
			4482343,569	3766280		0,1598
			4719761,392	4026160		0,1470
			4957179,216	4303960		0,1318
			5194597,04	4600930		0,1143
			5432014,863	491840		0,9095
			5669432,687	5257770		0,0726
			5906850,511	5620550		0,0485
			6144268,334	6008370		0,0221
			6381686,158	6422950		0,0065
					(MAPE)=	15%

3. Capacidad de procesos de aprovechamiento disponibles

Proceso	Capacidad de procesamiento	unidad	Número de Gestores vinculados	Capacidad de procesamiento anual Unidades
Pirólisis	14	Ton/día	2	270000
	0,037333333	peso de llantas (ton)		
	375	llantas/día		
	11250	llantas/mes		
	135000	llantas/año		
	475	Crudo ecológico Gl/día		
	2	Carbón activado		
	1,266666667	Crudo ecológico Gl/día *und		
	0,005333333	Carbón activado *und		
	5000	\$/gal		
	250	\$/kilo		
	7666,666667	ingreso \$/llanta		
	6133,333333	Costo Fabricación		
Trituración Mecánica para combustión TDF	32	Ton/día	1	501120
	0,023	peso de llantas (ton)		
	1392	llantas/día		
	41760	llantas/mes		
	501120	llantas/año		
	0,0207	ton/unidad		
	190000	\$/ton		
	3933	ingreso \$/llanta		
	2359,8	Costo de Fabricación		
Trituración mecánica para Granulo de Caucho Reciclado (GCR)	15	Ton/día	6	3600720
	0,009	peso de llantas (ton)		
	1667	llantas/día		
	50010	llantas/mes		
	600120	llantas/año		
	0,003787879	Tn de GCR produce 1 llanta		
	780000	\$/ton GCR		
	2954,545455	ingreso \$/llanta		
	2704,545455	Costo de procesamiento		
Granulo para Asfalto	10	Ton/día	1	400320
	0,009	peso de llantas (ton)		
	1112	llantas/día		
	33360	llantas/mes		

400320	llantas/año
0,004	Tn de GCR produce 1 llanta
900000	\$/ton GCR
3600	ingreso \$/llanta
2856	Costo de procesamiento

4. Modelo matemático

PROCESO	TIPO DE VARIABLE	NOMBRE	ECUACIÓN	UNIDADES	FUENTE
PRODUCCIÓN DE LLANTAS USADAS	NIVEL	LLANTAS NUEVAS EN USO EN BOGOTÁ	INTEG [Consumo de llantas nuevas-Llantas Fuera de Uso] I0= 4519580 llantas en uso en el 2009	Units: llantas/año	Observatorio Ambiental de Bogotá: http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/temas?v=6&p=21 Encuesta Distrital de Movilidad 2015
	FLUJO	CONSUMO DE LLANTAS	[llantas nuevas en uso en Bogotá*Tasa de consumo de Llantas nuevas]*["Importaciones Declaradas (VUCE)" +Ingresos No Declarados]	Units: llantas/año	Tasa calculada Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas
	AUXILIAR	TASA DE CONSUMO	0.469	1/año	Tasa calculada
	FLUJO	LLANTAS FUERA DE USO	llantas nuevas en uso en Bogotá*Tasa de Generación de llantas fuera de uso	Units: llantas/año	Tasa calculada Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Santa Fe de Bogotá : http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/0/Llantas.pdf
	AUXILIAR	TASA DE GENERACION DE LLANTAS FUERA DE USO	0.4	1/año	Tasa calculada Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Santa Fe de Bogotá : http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/0/Llantas.pdf
	NIVEL	INV LLANTAS FUERA DE USO	INTEG ((Llantas Fuera de Uso+Llantas rencauchadas fuera de uso)-Tasa de Recolección-Disposición para relleno) I0= 5.29581e+06 en el año 2009	Units: llantas/año	Tasa calculada Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Santa Fe de Bogotá : http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/0/Llantas.pdf

RECOLECCIÓN DE LLANTAS USADAS	NIVEL	LLANTAS FUERA DE USO RECOLECTADAS POR SRS	INTEG (IF THEN ELSE((Tasa de Recolección-Disposición de llantas para Asfalto-Disposición de llantas para pirólisis -Disposición de Llantas para Rencauche-Disposición de llantas para TDF-Disposición de llantas para uso artesanal - Trituración de llantas para Materias Primas)<=0,0,Tasa de Recolección-Disposición de llantas para Asfalto - Disposición de llantas para pirólisis-Disposición de Llantas para Rencauche - Disposición de llantas para TDF-Disposición de llantas para uso artesanal - Trituración de llantas para Materias Primas))	Llantas/año	Resolución 1326 de 2017 http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d9-res%201326%20de%202017.pdf http://www.minambiente.gov.co/images/AstuntosAmbientalesySectorialyUrbana/pdf/Programa_posconsumo_existente/RESOLUCION_1457_de_2010_llantas.pdf
	FLUJO	TASA DE RECOLECCIÓN	(Consumo de llantas nuevas*Requerimiento 1326)+(Consumo de llantas nuevas *Ingresos No Declarados)	Llantas/año	Resolución 1326 de 2017 http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d9-res%201326%20de%202017.pdf http://www.minambiente.gov.co/images/AstuntosAmbientalesySectorialyUrbana/pdf/Programa_posconsumo_existente/RESOLUCION_1457_de_2010_llantas.pdf
	AUXILIAR	REQUERIMIENTO 1326	Requerimiento 1326 = WITH LOOKUP (Time,(((2009,0)-(2030,1)),(2009,0.029),(2010,0.0697),(2011,0.1165),(2013,0.158),(2014,0.198),(2015,0.239),(2016,0.28),(2017,0.321),(2018,0.358),(2019,0.54),(2020,0.577),(2021,0.617),(2022,0.658),(2023,0.7),(2024,0.742),(2025,0.786),(2026,0.83),(2027,0.876),(2028,0.924),(2029,0.926),(2030,0.93)))	1/año	Tasa calculada
	FLUJO	DISPOSICIÓN PARA RELLENO	(Llantas Fuera de Uso-Tasa de Recolección) *0.32	Llantas/año	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
	NIVEL	LLANTAS EN RELLENO SANITARIO Y ESPACIO PÚBLICO	INTEG (Disposición para relleno)	1/año	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
	AUXILIAR	Gestión ambiental COSTO PROMEDIO LLANTAS VEHÍCULO	960	\$/unidad	Cifra aproximada dada por gestor de aprovechamiento
	AUXILIAR	Gestión ambiental COSTO PROMEDIO LLANTAS VEHÍCULO CARGA	5850	\$/unidad	Cifra aproximada dada por gestor de aprovechamiento
	AUXILIAR	COSTO /UNIDAD RECOLECCION	WITH LOOKUP (Time,(((2009,3500)-(2028,8000)),(2009,4000),(2010,4600),(2011,4700),(2012,4800),(2013,4900),(2014,5100),(2015,5200),(2016,5300),(2017,5400),(2018,5550),(2024,6500),(2028,7800)))	\$/unidad	Cifra aproximada dada por gestor de aprovechamiento

RECAUCHE DE LAS LLANTAS	NIVEL	LLANTAS RENCAUCHADAS	INTEG (Disposición de Llantas para Rencauche- Llantas rencauchadas fuera de uso)	Llantas/año	ASOCIACION COLOMBIANA DE RENCAUCHADORES , 23% de las llantas son rencauchadas http://anrecol.blogspot.com/
	FLUJO	DISPOSICIÓN DE LLANTAS PARA RENCAUCHE	llantas de Vehículo de carga*Tasa de rencauche	Llantas/año	ASOCIACION COLOMBIANA DE RENCAUCHADORES , 23% de las llantas son rencauchadas http://anrecol.blogspot.com/
	AUXILIAR	TASA DE RENCAUCHE	0.23	1/año	ASOCIACION COLOMBIANA DE RENCAUCHADORES , 23% de las llantas son rencauchadas http://anrecol.blogspot.com/
	AUXILIAR	LLANTAS DE VEHÍCULO DE CARGA	0.0425*Llantas nuevas en uso en Bogotá	Llantas/año	
	FLUJO	LLANTAS REENCAUCHADAS FUERA DE USO	LLantas Rencauchdas*Tasa de Generación de Llantas fuera de uso	Llantas/año	ASOCIACION COLOMBIANA DE RENCAUCHADORES , 23% de las llantas son rencauchadas http://anrecol.blogspot.com/
CICLO DE APROVECHAMIENTO Pirólisis	NIVEL	LLANTAS APROVECHADAS EN PIRÓLISIS	INTEG (Disposición de llantas para pirólisis-Venta de llantas transformadas en combustible)	Llantas/año	Datos recolectados a través de Entrevistas semiestructuradas a Gestor de Aprovechamiento especializado en Pirólisis Consulta en MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE
	FLUJO	DISPOSICIÓN DE LLANTAS PARA PIRÓLISIS	IF THEN ELSE(Llantas Fuera de Uso Recolectadas por SRS>(alfa 0*Llantas aprovechadas en Pirólisis),alfa 0*Llantas aprovechadas en Pirólisis,0)	Llantas/año	
	AUXILIAR	ALFA	0.95	Llantas/año	
	AUXILIAR	CAPACIDAD DE OFERTA DE PROCESO PIROLISIS	(Capacidad promedio de producción pirólisis*Gestores aprobados para pirólisis)	Llantas/año	
	AUXILIAR	GESTORES APROBADOS PARA PIRÓLISIS	2	Gestores de aprovechamiento	
	AUXILIAR	CAPACIDAD PROMEDIO DE PRODUCCION DEL PROCESO PIRÓLISIS	135000	Llantas/año	
	FLUJO	VENTA DE LLANTAS TRANSFORMADAS EN PROCESO PIRÓLISIS	(alfa 0*(Llantas aprovechadas en Pirólisis^2))/Capacidad de oferta)	Llantas/año	
	AUXILIAR	INGRESOS POR PROCESAMIENTO GESTIÓN AMBIENTAL	Disposición de llantas para pirólisis*Ingreso promedio por Gestión Ambiental	\$/año	
	AUXILIAR	INGRESO PROMEDIO POR GESTIÓN AMBIENTAL	(Costo promedio llanta de vehiculo de carga+Costo promedio llantas vehículo)/2	\$/año	
	FLUJO	INGRESO POR PIRÓLISIS	((9948*Venta de llantas transformadas en combustible)+ingreso por procesamiento)	\$/año	
	NIVEL	UTILIDAD	INTEG (Ingresos Piroalisis-Egresos Pirólisis)	\$/año	
	FLUJO	EGRESOS POR PROCESO	"Costo de Procesamiento /unid"*Llantas aprovechadas en Pirólisis	\$/año	
	AUXILIAR	COSTO DE PROCESAMIENTO	7960	\$/año	

CICLO DE APROVECHAMIENTO Trituración Mecánica para combustión TDF	NIVEL	LLANTAS APROVECHADAS PARA TDF	INTEG (Disposición de llantas para TDF-Venta de llantas transformadas en TDF)	Llantas/año	Datos recolectados a través de Entrevistas semiestructuradas a Gestor de Aprovechamiento especializado en Trituración Mecánica para combustión TDF Consulta en MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE
	FLUJO	DISPOSICIÓN DE LLANTAS PARA TDF	IF THEN ELSE(Llantas Fuera de Uso Recolectadas por SRS>(alfa 0*Llantas aprovechadas para TDF),alfa 0*Llantas aprovechadas en TDF,0)	Llantas/año	
	AUXILIAR	ALFA	0.9	Llantas/año	
	AUXILIAR	CAPACIDAD DE OFERTA DE PROCESO PARA TDF	(Capacidad promedio de producción TDF*Gestores aprobados para TDF)	Llantas/año	
	AUXILIAR	GESTORES APROBADOS PARA TDF	1	Gestores de aprovechamiento	
	AUXILIAR	CAPACIDAD PROMEDIO DE PRODUCCION DEL PROCESO PARA TDF	501120	Llantas/año	
	FLUJO	VENTA DE LLANTAS TRANSFORMADAS EN PROCESO PARA TDF	(alfa 0*(Llantas aprovechadas en TDF^2))/Capacidad de oferta)	Llantas/año	
	AUXILIAR	INGRESOS POR PROCESAMIENTO GESTIÓN AMBIENTAL	Disposición de llantas para TDF*Ingreso promedio por Gestión Ambiental	\$/año	
	AUXILIAR	INGRESO PROMEDIO POR GESTIÓN AMBIENTAL	(Costo promedio llanta de vehículo de carga+Costo promedio llantas vehículo)/2	\$/año	
	FLUJO	INGRESO POR TDF	((3420*Venta de llantas transformadas en TDF)+ingreso por procesamiento)	\$/año	
	NIVEL	UTILIDAD	INTEG (IngresosTDF-Egresos TDF)	\$/año	
	FLUJO	EGRESOS POR PROCESO DE TDF	"Costo de Procesamiento /unidad"*Llantas aprovechadas en TDF	\$/año	
	AUXILIAR	COSTO DE PROCESAMIENTO	2052	\$/unidad	
CICLO DE APROVECHAMIENTO Trituración mecánica para Granulo de Caucho Reciclado (GCR)	NIVEL	LLANTAS APROVECHADAS PARA GCR	INTEG (Disposición de llantas para GCR-Venta de llantas transformadas en GCR)	Llantas/año	Datos recolectados a través de Entrevistas semiestructuradas a Gestor de Aprovechamiento especializado en Trituración Mecánica para GCR Consulta en MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE
	FLUJO	DISPOSICIÓN DE LLANTAS PARA GCR	IF THEN ELSE(Llantas Fuera de Uso Recolectadas por SRS>(alfa 0*Llantas aprovechadas para GCR),alfa 0*Llantas aprovechadas en GCR,0)	Llantas/año	
	AUXILIAR	ALFA	0.85	Llantas/año	
	AUXILIAR	CAPACIDAD DE OFERTA DE PROCESO PARA GCR	(Capacidad promedio de producción GCR*Gestores aprobados para GCR)	Llantas/año	

	AUXILIAR	GESTORES APROBADOS PARA GCR	6	Gestores de aprovechamiento	
	AUXILIAR	CAPACIDAD PROMEDIO DE PRODUCCION DEL PROCESO PARA GCR	600120	Llantas/año	
	FLUJO	VENTA DE LLANTAS TRANSFORMADAS EN PROCESO PARA GCR	(alfa 0*(Llantas aprovechadas en GCR^2))/Capacidad de oferta)	Llantas/año	
	AUXILIAR	INGRESOS POR PROCESAMIENTO GESTIÓN AMBIENTAL	Disposición de llantas para GCR*Ingreso promedio por Gestión Ambiental	\$/año	
	AUXILIAR	INGRESO PROMEDIO POR GESTIÓN AMBIENTAL	(Costo promedio llanta de vehículo de carga+Costo promedio llantas vehículo)/2	\$/año	
	FLUJO	INGRESO POR GCR	((2954*Venta de llantas transformadas en GCR)+ingreso por procesamiento)	\$/año	
	NIVEL	UTILIDAD	INTEG (Ingresos por GCR-Egresos GCR)	\$/año	
	FLUJO	EGRESOS POR PROCESO DE GCR	"Costo de Procesamiento /unidad"*Llantas aprovechadas por GCR	\$/año	
	AUXILIAR	COSTO DE PROCESAMIENTO	2704	\$/año	
CICLO DE APROVECHAMIENTO Trituración mecánica para Granulo de Caucho Reciclado (GCR) para Asfalto	NIVEL	LLANTAS APROVECHADAS PARA ASFALTO	INTEG (Disposición de llantas para GCR para Asfalto-Venta de llantas transformadas en GCR para Asfalto)	Llantas/año	Datos recolectados a través de Entrevistas semiestructuradas a Gestor de Aprovechamiento especializado en Trituración Mecánica para combustión TDF Consulta en MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE
	FLUJO	DISPOSICIÓN DE LLANTAS PARA GCR PARA ASFALTO	IF THEN ELSE(Llantas Fuera de Uso Recolectadas por SRS>(alfa 0*LLantas aprovechadas para GCR para Asfalto),alfa 0*LLantas aprovechadas en GCR para Asfalto,0)	Llantas/año	
	AUXILIAR	ALFA	0.20	Llantas/año	
	AUXILIAR	CAPACIDAD DE OFERTA DE PROCESO PARA GCR PARA ASFALTO	(Capacidad promedio de producción GCR para Asfalto*Gestores aprobados para GCR para Asfalto)	Llantas/año	
	AUXILIAR	GESTORES APROBADOS PARA GCR PARA ASFALTO	1	Gestores de aprovechamiento	
	AUXILIAR	CAPACIDAD PROMEDIO DE PRODUCCION DEL PROCESO PARA GCR PARA ASFALTO	400320	Llantas/año	
	FLUJO	VENTA DE LLANTAS TRANSFORMADAS EN PROCESO PARA GCR	(alfa 0*(Llantas aprovechadas en GCR para Asfalto^2))/Capacidad de oferta para Asfalto)	Llantas/año	

	AUXILIAR	INGRESOS POR PROCESAMIENTO GESTIÓN AMBIENTAL	Disposición de llantas para GCR para Asfalto*Ingreso promedio por Gestión Ambiental	\$/año	
	AUXILIAR	INGRESO PROMEDIO POR GESTIÓN AMBIENTAL	(Costo promedio llanta de vehículo de carga+Costo promedio llantas vehículo)/2	\$/año	
	FLUJO	INGRESO POR GCR PARA ASFALTO	((3600*Venta de llantas transformadas en GCR para Asfalto)+ingreso por procesamiento)	\$/año	
	NIVEL	UTILIDAD	INTEG (Ingresos por GCR para Asfalto-Egresos GCR para Asfalto)	\$/año	
	FLUJO	EGRESOS POR PROCESO DE GCR	"Costo de Procesamiento /unidad"*Llantas aprovechadas por GCR para Asfalto	\$/año	
	AUXILIAR	COSTO DE PROCESAMIENTO	2854	\$/año	
CICLO DE APROVECHAMIENTO Para uso Artesanal	NIVEL	LLANTAS APROVECHADAS PARA USO ARTESANAL	INTEG (Disposición de llantas para GCR Para uso Artesanal-Venta de llantas transformadas en artesanías)	Llantas/año	Datos recolectados a través de Entrevistas semiestructuradas a Gestor de Aprovechamiento especializado en Trituración Mecánica para combustión TDF Consulta en MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE
	FLUJO	DISPOSICIÓN DE LLANTAS PARA USO ARTESANAL	IF THEN ELSE(LLantas Fuera de Uso Recolectadas por SRS>(alfa 0*LLantas aprovechadas para uso Artesanal),alfa 0*LLantas aprovechadas en artesanías,0)	Llantas/año	
	AUXILIAR	ALFA	0.60	Llantas/año	
	AUXILIAR	CAPACIDAD DE OFERTA DE PROCESO PARA USO ARTESANAL	(Capacidad promedio de producción Para uso Artesanal*Gestores aprobados Para uso Artesanal)	Llantas/año	
	AUXILIAR	GESTORES APROBADOS PARA USO ARTESANAL	1	Gestores de aprovechamiento	
	AUXILIAR	CAPACIDAD PROMEDIO DE PRODUCCION DEL PROCESO PARA USO ARTESANAL	750	Llantas/año	
	FLUJO	VENTA DE LLANTAS TRANSFORMADAS PARA USO ARTESANAL	(alfa 0*(LLantas aprovechadas en uso Artesanal^2))/Capacidad de oferta Para uso Artesanal)	Llantas/año	
	AUXILIAR	INGRESOS POR PROCESAMIENTO GESTIÓN AMBIENTAL	Disposición de llantas Para uso Artesanal*Ingreso promedio por Gestión Ambiental	\$/año	
	AUXILIAR	INGRESO PROMEDIO POR GESTIÓN AMBIENTAL	(Costo promedio llanta de vehículo de carga+Costo promedio llantas vehículo)/2	\$/año	

FLUJO	INGRESO POR USO ARTESANAL	((120000*Venta de llantas transformadas en uso Artesanal)+ingreso por procesamiento Para uso Artesanal)	\$/año
NIVEL	UTILIDAD	INTEG (Ingresos por uso Artesanal-Egresos Para uso Artesanal)	\$/año
FLUJO	EGRESOS POR PROCESO DE GCR	"Costo de Procesamiento /unid"*LLantas aprovechadas por GCR para Asfalto	\$/año
AUXILIAR	COSTO DE PROCESAMIENTO	50000	\$/año