



Diseño y Optimización de una Red de Logística Inversa de Grandes Llantas Residuales en el Sector Minero Colombiano

Jorge Armando Oyola Cervantes

Universidad del Norte

Departamento de Ingeniería Industrial

División de Ingenierías

Barranquilla, Colombia

2018

Diseño y Optimización de una Red de Logística Inversa de Grandes Llantas Residuales en el Sector Minero Colombiano

Jorge Armando Oyola Cervantes

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Ingeniería Industrial

Director:

René Amaya Mier, Ph.D.

Línea de Investigación:

Gestión de Operaciones

Grupo de Investigación:

Productividad y Competitividad

Universidad del Norte
Departamento de Ingeniería Industrial
División de Ingenierías
Barranquilla, Colombia

2018

Aprobado por el profesorado de la División de Ingenierías en cumplimiento de los requisitos exigidos para otorgar el título de Magister en Ingeniería Industrial.

Ing. René Amaya Mier
Director

Ing. Alcides Santander Mercado
Jurado

Ing. Rita Peña-Baena Niebles
Jurado

Barranquilla, 18 de enero de 2019

Contenido

Resumen.....	XVII
1. Generalidades del Proyecto.....	1
1.1. Planteamiento del Problema de Investigación.....	1
1.2. Justificación.....	5
1.2.1. Justificación Teórica.....	5
1.2.2. Justificación Práctica.....	7
1.3. Objetivos.....	9
1.3.1. Objetivo General.....	9
1.3.2. Objetivos Específicos.....	9
1.4. Metodología Propuesta.....	9
2. Estado del Arte.....	11
2.1. Logística Inversa.....	11
2.2. Disposición de Llantas de Desecho.....	13
2.3. Cadenas de Suministro de Ciclo Cerrado de las Llantas de Desecho.....	15
2.4. Reglamentación en el Manejo de Llantas de Desecho.....	18
2.5. Responsabilidad Extendida del Productor (REP).....	21
2.6. Modelos de Transporte y de Asignación.....	22
2.7. Programación Entera - Mixta.....	23
2.8. Problemas de Scheduling.....	24

2.9. Conclusiones de la Revisión del Estado del Arte	27
3. Modelación y Desarrollo del Problema.....	29
3.1. Estado Actual de los Procesos de Logística Inversa en el Sector Minero Colombiano	29
3.2. Caracterización del Servicio y Producto	30
3.2.1. Usos y Especificaciones.....	30
3.2.2. Atributos Diferenciadores	31
3.2.3. Mercado Objetivo	32
3.3. Análisis de Oferta y Demanda de la Planta	33
3.4. Proceso de Corte y Trituración de Llantas OTR.....	34
3.4.1. Corte Inicial.....	35
3.4.2. Proceso de Triturado.....	36
3.5. Posibles Ubicaciones de la Planta	37
3.6. Posibles Rutas de Minas a Planta.....	39
3.6.1. Férreo	40
3.6.2. Terrestre	41
3.6.3. Fluvial	46
3.7. Diseño del Modelo Matemático de la Red de Logística Inversa de Llantas Residuales.....	46
3.7.1. Supuestos del Modelo.....	47
3.7.2. Subíndices	48
3.7.3. Parámetros.....	48
3.7.4. Variables	49
3.7.5. Función Objetivo	49

3.7.6. Restricciones	50
3.8. Conclusiones de la Modelación y el Desarrollo del Problema	52
4. Aplicación y Resultados del Modelo	53
4.1. Caso de Estudio.....	53
4.1.1. Subíndices del Modelo	53
4.1.2. Costos de Transporte de Llantas Trituradas.....	54
4.1.3. Capacidad Máxima de Transporte de Llantas Trituradas	55
4.1.4. Inventario Inicial y Tasas de Desecho de Llantas de las Minas.....	56
4.1.5. Costos de Transportar las Trituradoras entre Minas.....	56
4.1.6. Costo Fijo de Operar el Recurso de Trituradoras.....	57
4.1.7. Costos de Apertura de Planta	57
4.1.8. Costos de Operación de la Planta	58
4.1.9. Límites de Demanda de la Planta	58
4.1.10. Metas de Recolección de Llantas Exigidas Legalmente.....	59
4.2. Estrategia de Solución	60
4.3. Resultados del Caso 1: Minimización de Costos	62
4.4. Resultados del Caso 2: Maximización de Utilidades	65
4.5. Análisis de Sensibilidad	70
4.6. Análisis de Viabilidad del Diseño	71
4.6.1. Evaluación Técnica	71
4.6.2. Evaluación Financiera	73
4.7. Conclusiones de la Aplicación y Resultados del Modelo	76
Conclusiones Finales	79

Lista de figuras

Figura 2-1. Una forma genérica de logística directa / inversa.....	16
Figura 2-2. Representación de red de cadena de suministro de ciclo cerrado (CSCC) con múltiples opciones de recuperación para llantas al final de su vida útil.	17
Figura 3-1. Etapas del proceso de reducción de tamaño de llantas residuales OTR ..	35
Figura 3-2. Cizalla para excavadora Kinshofer DRS-75-A	36
Figura 3-3. Reducción de dimensiones por corte de llantas OTR.....	36
Figura 3-4. Trituradora portable PD1000TIF.....	37
Figura 3-5. Ubicación de las minas y posibles ubicaciones de la planta	39
Figura 3-6. Ruta férrea FENOCO.....	40
Figura 3-7. Rutas férreas desde las Minas P y D hasta las posibles plantas ubicadas en Barranquilla y Santa Marta.....	41
Figura 3-8. Rutas fluviales con ubicaciones de las minas y plantas generadoras.	46
Figura 4-1. Cumplimiento de reducción de inventario en las minas – Caso 1.....	64
Figura 4-2. Cumplimiento de reducción de inventario en las minas – Caso 2.....	69
Figura 4-3. Valor presente neto (\$) para diferentes tasas de descuento (%).....	75

Lista de tablas

Tabla 3-1. Capacidad de trituración.....	34
Tabla 3-2. Rutas desde las minas hasta la posible planta ubicada en la Mina G.....	42
Tabla 3-3. Rutas desde las minas hasta la posible planta ubicada en El Paso, Cesar .	43
Tabla 3-4. Rutas desde las minas hasta la posible planta ubicada en Barranquilla	44
Tabla 3-5. Rutas desde las minas hasta la posible planta ubicada en Santa Marta	45
Tabla 3-6. Subíndices del modelo con posibles valores	48
Tabla 3-7. Parámetros del modelo con descripciones.....	48
Tabla 3-8. Variables de decisión y auxiliares para el modelo con descripciones	49
Tabla 3-9. Restricciones del modelo.....	50
Tabla 4-1. Subíndices del modelo para el caso de estudio.....	54
Tabla 4-2. Costos de transporte de llantas trituradas en el modo férreo, Cijt1	55
Tabla 4-3. Costos de transporte de llantas trituradas en el modo terrestre, Cijt2.....	55
Tabla 4-4. Costos de transporte de llantas trituradas en el modo fluvial, Cijt3	55
Tabla 4-5. Capacidad máxima de transporte de llantas trituradas, Ttim +	56
Tabla 4-6. Inventario inicial de las minas, I0i.....	56
Tabla 4-7. Tasa semestral de desecho de llantas de las minas, Tit.....	56
Tabla 4-8. Costos de transportar las trituradoras entre minas, CSiht.....	57
Tabla 4-9. Costo fijo de operar el recurso de trituradoras, FAh	57
Tabla 4-10. Costos de apertura de planta, PSjt.....	58
Tabla 4-11. Costos de operación de la planta, FOjt y VOjt.....	58
Tabla 4-12. Límites de demanda de la planta generadora de energía, Djt – y Djt + .	59
Tabla 4-13. Porcentajes de reducción de inventario mínimo requerido por ley, MRt	59
Tabla 4-14. Cronograma de asignación de las máquinas trituradoras – Caso 1.....	62

Tabla 4-15. Toneladas de llanta enviadas a la planta por transporte terrestre – Caso 1	63
Tabla 4-16. Desglose de los componentes de la función objetivo – Caso 1	65
Tabla 4-17. Cronograma de asignación de las máquinas trituradoras – Caso 2.....	67
Tabla 4-18. Toneladas de llanta enviadas a la planta por transporte terrestre – Caso 2	67
Tabla 4-19. Desglose de los componentes de la función objetivo – Caso 2	69
Tabla 4-20. Análisis de sensibilidad para el inventario inicial de llantas en las minas	70
Tabla 4-21. Análisis de sensibilidad para restricción de capacidad de triturado.....	70
Tabla 4-22. Fragmento del flujo de caja del proyecto	73

Glosario

LI (RL): Logística Inversa (Reverse Logistics). Es un proceso dentro de la administración de la cadena de suministro que permite gestionar los retornos de los clientes y de paso impacta en el servicio y la recuperación del valor del producto, su adecuada disposición final y el desarrollo de prácticas amigables con el medio ambiente.

Llantas OTR: Llantas Off-the-Road. Son aquellas llantas que se utilizan para transitar en terrenos no pavimentados, lo que hace que tengan estructuras más complejas que las llantas regulares y, por ende, sean más difíciles de disponer adecuadamente al final de su vida útil.

CSCC (CLSC): Cadenas de Suministro de Ciclo Cerrado (Closed Loop Supply Chain). Son aquellas cadenas de suministro que combinan las dos direcciones en los flujos que se presentan entre sus eslabones, clásica (hacia adelante) e inversa (hacia atrás). Es decir, son redes resultantes de la combinación de cadenas de suministro directas e inversas.

REP (EPR): Responsabilidad Extendida del Productor (Extended Producer Responsibility). Es una estrategia de protección ambiental que busca promover el reciclaje de productos al final de su vida útil, al hacer que el fabricante del producto sea responsable de todo el ciclo de vida del producto y especialmente de la recuperación, el reciclaje y la disposición final del producto.

AMPL: Es un lenguaje de programación matemático (A Mathematical Programming Language). El sistema AMPL es una herramienta de modelado sofisticada que admite todo el ciclo de vida del modelado de optimización: desarrollo, pruebas,

implementación y mantenimiento. AMPL integra un lenguaje de modelado para describir datos de optimización, variables, objetivos y restricciones; un lenguaje de comando para navegar por modelos y analizar resultados; y un lenguaje de scripting para recopilar y manipular datos y para implementar esquemas de optimización iterativos.

CPLEX: Es un solucionador de programación matemática de alto rendimiento para programación lineal, programación de enteros mixtos y programación cuadrática que permite la optimización de decisiones para mejorar la eficiencia, reducir costos y aumentar la rentabilidad.

Resumen

En la industria de neumáticos, se ha venido presentando una problemática con respecto a la disposición de las llantas al final de su vida útil, causada por la utilización de materiales sofisticados que complican y aumentan los costos de los procesos de recuperación. Esta industria global y creciente, genera anualmente aproximadamente un billón de neumáticos nuevos alrededor de todo el mundo, de los cuales sólo un bajo porcentaje es reutilizado (Kumar & Saravanan, 2014).

La necesidad de reintroducir las llantas residuales al ciclo productivo y reaprovechar sus componentes ha sido planteada por diversos autores a lo largo de los años (De Souza & D'Agosto, 2013; Debo & Van Wassenhove, 2005; Govindan, Soleimani, & Kannan, 2015; Lebreton & Tuma, 2006; Martinez-Alvaro & Herrero-Del-Barrio, 2009; Panagiotidou & Tagaras, 2005; Sasikumar, Kannan, & Haq, 2010; Subulan, Taşan, & Baykasoğlu, 2015), aunque otros también han afirmado que la implementación de alternativas de solución al problema debe ir de la mano con los entes gubernamentales (Park, Díaz-Posada, & Mejía-Dugand, 2018).

Tradicionalmente, las empresas involucradas en la cadena de suministro de las llantas, tienden a disponer de ellas enviándolas a un vertedero debido a que, en el corto plazo, les parece la opción más económica y menos compleja. Sin embargo, esta alternativa de disposición es causante de diversos efectos e impactos ambientales, sociales y económicos. Cantanhede & Monge (2002) explican que el apilamiento de llantas provoca condiciones favorables para la creación de enfermedades como el dengue y fiebre amarilla, específicamente en lugares de clima cálido donde la población se ve afectada en mayor proporción debido a la acumulación de agua en el interior de los neumáticos; y a pesar de esto, es el método

históricamente usado en una gran variedad países industrializados y en vías de desarrollo.

Esta investigación pretende abordar la problemática de la falta de alternativas de correcta disposición de llantas residuales, enfocándose inicialmente en un segmento en particular: el sector minero. Las llantas utilizadas en operaciones mineras son especiales para tránsito fuera de carretera y se conocen como llantas *Off-the-Road* (OTR). Este segmento representa el 1% de la industria de llantas en volumen unitario, pero del 15 al 20% en peso total (Sheerin, 2017), con llantas cuyas dimensiones pueden alcanzar hasta 4 metros de diámetro con pesos de más de 3 toneladas (Goodyear, 2017), las cuáles conllevan a dificultades logísticas para su recolección y transporte.

Las alternativas de recuperación de llantas residuales pueden ser abordadas desde la perspectiva de la logística inversa (LI), la cual es un proceso que permite gestionar dentro de la cadena de suministro los retornos de los clientes con el propósito de recuperar su valor o darles una disposición adecuada (Agarwal, Govindan, Darbari, & Jha, 2016). Para esto es necesario el diseño de redes de logística inversa que apoyen la toma de decisiones en los procesos de recolección y disposición adecuada de dichas llantas. Sin embargo, este diseño es complicado, tal como lo explican (Ayvaz, Bolat, & Aydin, 2015), debido a que se necesita probar y clasificar los productos de devolución; por la incertidumbre de estos productos en términos de cantidad, calidad y tiempo de suministro, así como por la integración y coordinación de los diferentes flujos directos e inversos.

Considerando todo lo anterior, esta investigación tiene como propósito diseñar y optimizar una red de logística inversa de llantas residuales de gran tamaño (OTR), provenientes de la industria minera, que minimice los costos logísticos asociados al manejo y disposición final de estas llantas. Para tal propósito, se trazará en primer lugar una hoja de ruta que permita considerar los diferentes aspectos y generalidades del problema, y seguidamente revisar el estado del arte en búsqueda de brechas y

alternativas no investigadas o exploradas. Luego se realizará el diseño de la red logística y de un modelo matemático que la represente. Posteriormente se validará el diseño, aplicándolo a un caso de estudio; se realizará un análisis de sensibilidad a la solución y se evaluarán las condiciones necesarias para la viabilidad de su implementación. Aunque se esperan contribuciones de tipo ambiental y social, la motivación principal de esta investigación es de índole económico, pues busca solucionar una problemática que presentan las operaciones mineras mediante una operación rentable. La parte ambiental no se considerará en la función objetivo y sólo se tendrá en cuenta como una restricción del problema, con el fin de lograr en las minas unas reducciones de inventario de llantas de desecho que cumplan con las legislaciones ambientales vigentes.

1. Generalidades del Proyecto

Este capítulo tiene como propósito fijar el mapa de ruta y el horizonte de la investigación, para lo cual se presentarán los antecedentes del problema, se definirá la pregunta de investigación, las contribuciones al estado del arte y se fijarán los objetivos. A nivel general, el capítulo presenta el problema, su contexto y la pregunta de investigación en la sección 1.1. Seguidamente se presenta la justificación de la investigación, su importancia y contribuciones en la sección 1.2. Los objetivos se presentan en la sección 1.3 y posteriormente se definen las acciones a desarrollar para alcanzar dichos objetivos en la metodología detallada en la sección 1.4.

1.1. Planteamiento del Problema de Investigación

La industria de neumáticos es una industria global y creciente, en la que cada año se genera alrededor de todo el mundo aproximadamente un billón de neumáticos nuevos (Kumar & Saravanan, 2014), de los cuales un bajo porcentaje son reutilizados para un futuro. Además de la recuperación de productos, temas como la logística inversa, la re-manufacturación y la reutilización han recibido creciente atención gracias a la creciente preocupación ambiental, la reducción de recursos, el agotamiento de las capacidades de los vertederos en muchos países y la promulgación de obligaciones por parte de los gobiernos para recuperar los productos al final de su ciclo de vida (Kannan, Diabat, Alrefaei, Govindan, & Yong, 2012). Cuando las empresas involucradas en la cadena de suministro de llantas planean una disposición final a éstas, tienden a deshacerse de los neumáticos enviándolos a un vertedero debido a que en el corto plazo es la opción que aparece como la más económica y menos

compleja, aunque causante de diversos efectos e impactos ambientales, sociales y económicos.

El apilamiento de llantas es el método históricamente usado en una gran variedad de países industrializados y en vías de desarrollo. Esta metodología provoca condiciones favorables para la creación de enfermedades como el dengue y fiebre amarilla, específicamente en lugares de clima cálido donde la población se ve afectada en mayor proporción debido a la acumulación de agua en el interior de los neumáticos (Cantanhede & Monge, 2002). La acumulación de llantas también genera un riesgo cuando se producen incendios (intencionados o no), ya que ante su exposición al fuego el caucho genera químicos que contaminan la atmósfera y el suelo, lo cual genera problemas de salud pública y destrucción de los ecosistemas.

De acuerdo con Mihi (2007), en Colombia se está ampliando la normativa de medio ambiente, con el fin de preservar el entorno natural. Es posible destacar las siguientes (Ministerio de Medio Ambiente, 2007):

- Ley 9ª de 1979, de protección del medio ambiente.
- Decreto 0459 93, por el cual se aprueba el acuerdo número 007 del 10 de febrero de 1993, emanado en la junta directiva del Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química – Ingeominas.
- Ley 99 de 1993, que regula el Sistema Nacional Ambiental (SINA).
- Decreto 1933 94, que reglamenta la creación del Ministerio del Medio Ambiente.
- Decreto 0883 97, por el que se regulan actividades y se definen los instrumentos administrativos para la prevención o el control de los factores de deterioro ambiental.
- Ley 430 de 1998, sobre desechos peligrosos.

El no cumplimiento de estas leyes acarreará sanciones a las partes involucradas, sin embargo, en el nivel nacional, la normatividad actual no plantea una Política Ambiental seria de post-consumo y responsabilidad extendida del productor que

incorpore a todos los actores y los obligue a cada uno a asumir su responsabilidad, por lo cual es necesario implementar una Política de Gestión Integral de Residuos contextualizada y pertinente (Gulfo & Reyes, 2015). El sector minero siempre ha tenido una participación considerable en las exportaciones realizadas en el país. En promedio, la mitad de las exportaciones de Colombia son minerales (DANE, 2017), dentro de los cuales se tienen en mayor proporción el carbón y el ferróníquel. En las minas donde se explotan estos minerales, se utilizan maquinarias pesadas y los niveles de actividad son considerablemente altos, para poder suplir las grandes cantidades que se exportan, por lo tanto, el desgaste en las llantas utilizadas por las maquinarias es mayor al normal y esto conlleva a que la generación de llantas residuales se presente en altas tasas.

De otra parte, buena parte de las llantas usadas en contextos mineros en Colombia son importadas. De acuerdo con Doku (2016), “las llantas que llegan a Colombia para ser comercializadas están en el orden de 5,3 millones de unidades al año, cifra que se mantiene desde 2014, de acuerdo con un reciente estudio de la Importadora Nacional de Llantas IMLLA”. En Colombia, en el caso de tener negociaciones con proveedores referentes a la devolución de productos extranjeros al final de su vida útil, ésta se encontrará truncada debido a que la gestión de devolución puede ser más costosa que las multas establecidas por los entes de control (Mihi, 2007). Adicionalmente, los proveedores de llantas en Colombia no son hechos responsables (o parcialmente responsables, al menos) por la disposición final de sus productos. Según Noticias Caracol (2015), “desde 2010 existe una reglamentación aplicada a los productores de llantas, en el cual se comprometen a recogerlas cuando sean desechadas y encargarse del tratamiento ambiental. Sin embargo, más de 150 personas, naturales o jurídicas, que no lo hacen”

Ante este panorama, el reciclaje juega un papel clave, ya que permite la reutilización de llantas de desecho en nuevos ciclos de producción, lo que minimiza el consumo de materias primas no renovables y extiende la vida útil de los vertederos (De Souza & D’Agosto, 2013). Además, los problemas de recuperación de productos tales como

logística inversa, re-fabricación y reutilización han recibido una atención creciente debido a la creciente preocupación ambiental, la reducción de recursos, el agotamiento de la capacidad de vertederos en muchos países y la obligación de los gobiernos de retirar los productos al final de su vida útil (Kannan et al., 2012). Una de las soluciones que se han encontrado es la de Flórez, Toro, & Granada (2012), en la cual evalúan las estrategias y los mecanismos de gestión para el establecimiento de una red de logística inversa alrededor del aprovechamiento de llantas y neumáticos fuera de uso, para las ciudades de Pereira y Dosquebradas (Colombia). Todos estos inconvenientes relacionados con el manejo de las llantas residuales, han creado una necesidad de darle un mejor manejo a este residuo sólido del que se le ha venido dando hasta el momento. Esta propuesta se centra en el contexto de la industria minera, un segmento de mercado significativo para la industria de llantas *Off-the-Road* (OTR), pero aún más significativo en cuanto a la proporción de llantas desechadas en peso, debido a sus grandes dimensiones, que se genera como una externalidad de las operaciones mineras (Sheerin, 2017). Además, considerando que en este sector se ha ignorado la situación de desperdicios, desbordada con operaciones que han dado inicio medio siglo atrás y que, hasta el momento, no presenta disposiciones adecuadas de sus llantas usadas.

Para el caso de Colombia, el sector minero ha representado históricamente la mayor participación de las exportaciones que realiza el país. En la ventana de tiempo más reciente, corriendo desde el 2010 hasta la fecha, la cuota de participación está en un promedio de 51.6% (DANE, 2017). Es decir que, más de la mitad de las exportaciones de Colombia son minerales, dentro de los cuales destacan el carbón y el ferróníquel. Para alcanzar estos niveles de actividad, las minas suelen operar intensivamente; por ejemplo, El Cerrejón es una mina que funciona 364 días al año durante las 24 horas, produciendo 100 mil toneladas de carbón diarias (Portafolio, 2016). Estas operaciones intensivas conllevan a un desgaste mayor en las llantas OTR utilizadas por la maquinaria, las cuales según Portafolio (2016) tienen una vida útil de

6 a 10 meses, lo que conlleva a tener unas altas tasas de generación de llantas residuales.

Por lo tanto, surge la necesidad del diseño de una red de logística inversa de llantas OTR residuales en el sector minero de Colombia, que permita minimizar los costos logísticos asociados al manejo y disposición final de las llantas utilizadas en la actividad minera, determinando la forma en que estas deben ser dispuestas una vez concluye su ciclo de vida. Sin embargo, dada la cantidad de actores que las generan, una apuesta inicial se concentra en mitigar la situación actual del manejo de las llantas usadas en las principales minas de Colombia, así como reducir los considerablemente altos niveles de inventario actuales en un horizonte de tiempo mediano y generar un modelo de negocio que permita sosteniblemente encontrar un nuevo uso para las llantas que se dispongan de estas minas.

La motivación principal de esta investigación es lograr una operación rentable que solucione la problemática mencionada. Aunque se esperan contribuciones de tipo ambiental y social, estas no se incluyen en la función objetivo y sólo se tendrá en cuenta la parte ambiental como una restricción del problema, que permita reducciones de inventario de llantas de desecho para que las minas cumplan con las legislaciones ambientales vigentes. Dentro de las principales minas de carbón y ferroníquel de Colombia resaltan 4 operaciones: Cerrejón, Prodeco, Cerro Matoso y Drummond. Las mencionadas se encuentran ubicadas en la región Caribe, por lo que la solución inicial tendría un alcance subregional. Teniendo en cuenta todo lo expuesto anteriormente, se presenta la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el diseño económico de una red de logística inversa de llantas de gran tamaño (OTR), como residuo de operaciones mineras subregionalmente espaciadas, que satisface la legislación ambiental?

1.2. Justificación

1.2.1. Justificación Teórica

En términos teóricos, el problema de distribución de productos se relaciona con un problema de optimización logístico que involucra la asignación de puntos de transformación y recolección desde los centros de generación de llantas usadas, asignación de modos de transporte, programación del proceso de trituración, análisis de cadena de suministro e incluso análisis de localización, entre otros. Estos problemas normalmente manejan variables enteras y además son problemas catalogados como NP-Hard, debido a la alta dificultad para obtener su solución a través de un algoritmo que lo resuelva óptimamente en un tiempo polinomial. Para la solución de estos problemas existen métodos exactos aplicables a problemas pequeños y métodos que ayudan a buscar soluciones aproximadas. Entre los métodos de solución exacta está el método de ramificación y acotamiento, relajación Lagrangeana, entre otros. Por otro lado, también se han aplicado métodos heurísticos o metaheurísticos que proporcionan buenas soluciones en un tiempo razonable, pero no necesariamente se obtienen los óptimos globales.

Además de esto, las redes logísticas se caracterizan por no ser estáticas en sus consideraciones y parámetros, sobre todo cuando son complejas; por tal motivo, suelen requerir de herramientas de simulación dinámica que permitan evaluar diferentes cambios en los escenarios a través del tiempo. De ahí la importancia de modelar la red propuesta mediante este tipo de herramientas, que además sirva para encontrar indicadores precisos y útiles en la evaluación de factibilidad técnica y económica de la misma.

La contribución de esta investigación tiene alcances tanto de orden práctico, ambiental, social, que se discuten en la siguiente sección, como científicos. A nivel científico se tiene el diseño óptimo de una red de logística inversa para llantas OTR residuales de gran tamaño, que novedosamente incorpora la secuenciación de un recurso de corte compartido entre minas. Este tema no ha sido cubierto en la literatura, pues las investigaciones previas no suelen considerar las dificultades logísticas derivadas de los grandes tamaños de estas llantas en contextos espaciales

dispersos propios de los entornos mineros. La óptica de diseño óptimo de redes de acopio de llantas grandes basada en procesos de reducción de dimensiones que pretende abordar la investigación actual, en el mejor conocimiento de los autores, no ha sido previamente abordada. Además, se incorpora el cumplimiento a las regulaciones legales impuestas a las minas por parte de los gobiernos para la correcta disposición de llantas residuales, dándole un elemento diferencial adicional a la investigación.

1.2.2. Justificación Práctica

En el proceso de recolección de llantas residuales, se toman decisiones importantes como la asignación de puntos de recolección inicial, modos de transporte, puntos de trituración, aperturas de puntos de acopios e incluso de plantas generadoras de energía, las cuales pueden ser complicadas de tomar debido al gran número de combinaciones posibles y escenarios que pueden presentarse. Por medio de esta investigación se busca establecer un modelo de corte operacional y estratégico que permita tomar esas decisiones sobre los flujos de llantas a lo largo del tiempo que se pretende recolectar y darle una disposición final a las llantas diferente a la que tienen actualmente (apilamiento).

La contribución práctica de esta investigación radica en que permitirá solucionar un problema que afecta económicamente a las operaciones mineras, pues para estas, las llantas OTR tienen un valor residual negativo. Además, están sujetas a regulaciones en la correcta disposición de este residuo, por lo cual podrán evitar multas acarreadas por el incumplimiento de dichas regulaciones. De otra parte, las empresas recolectoras de llantas podrán tener una herramienta de toma de decisiones que les ayudará a tener una operación rentable y así podrán brindar un servicio que busca suplir una necesidad urgente en su segmento de mercado. Además, hay una gran oportunidad en cuanto a la generación de energía que se puede dar usando como materia prima las llantas residuales trituradas, con lo cual se pueden abrir una o varias plantas generadoras y así crear empleos para las zonas donde se decidan abrir.

El impacto de esta solución también está relacionado con componentes medio ambientales y sociales, a través la reducción en la proliferación de enfermedades provocada por vectores como mosquitos y roedores que nacen debido al estancamiento de las aguas y la inaccesibilidad de zonas de almacenamiento; situación que ocasiona problemas de salubridad. Estos efectos fueron explorados por Chaparro et al. (2018), explicando que las llantas residuales indebidamente dispuestas pueden convertirse en un lugar propicio para el depósito de larvas de mosquito en presencia de agua estancada y luz solar abundante, capaces de proliferar brotes de enfermedades como el dengue, fiebre amarilla o encefalitis. Además, se mitigan los problemas de salud que puedan producirse debido a las sustancias nocivas emitidas por la quema (voluntaria o no) de llantas, tales como material particulado y dióxido de azufre.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Diseñar y optimizar una red de logística inversa de llantas residuales de gran tamaño (OTR), provenientes de la industria minera, que minimice los costos logísticos asociados al manejo y disposición final de estas llantas.

1.3.2. Objetivos Específicos

- ✓ Determinar los parámetros de la red de logística inversa de llantas residuales de gran tamaño de las operaciones mineras mediante la caracterización del proceso de recuperación de llantas.
- ✓ Diseñar un modelo matemático para la red de logística inversa (LI) que permita tomar decisiones en diferentes momentos de tiempo sobre la disposición final de las llantas residuales OTR.
- ✓ Optimizar el modelo matemático aplicado al caso de estudio de las 4 principales minas de cielo abierto de la Región Caribe colombiana, con propósitos de validación.
- ✓ Realizar análisis de sensibilidad para evaluar la respuesta del modelo frente a diferentes escenarios.
- ✓ Evaluar la factibilidad económica del diseño de la red a lo largo del tiempo.

1.4. Metodología Propuesta

El proceso metodológico que permitirá el cumplimiento de los objetivos planteados en la tesis consiste en las siguientes etapas:

Etapas **1.** Caracterizar el proceso de recuperación de llantas residuales de gran tamaño, para diseñar la red de logística inversa de las mismas

Etapas **2.** Desarrollar el modelo matemático considerando las condiciones del problema que involucran la ubicación de las máquinas trituradoras, la apertura de la

planta de generación de energía, y las cantidades de llantas a triturar en las minas y a transportar a la planta generadora, así como los supuestos que se consideren necesarios.

Etapa 3. Optimizar el modelo matemático mediante su aplicación en el caso de estudio de las 4 principales minas de cielo abierto de la Región Caribe de Colombia. Para esto se deben determinar todos los parámetros de la red logística que sean propios de la red del caso de estudio y determinar una estrategia de solución para el modelo.

Etapa 4. Realizar un análisis de sensibilidad para evaluar el comportamiento de la solución en diferentes escenarios y realizar una evaluación de la factibilidad económica de la red. Para esto se usarán las herramientas de análisis de sensibilidad del software escogido para la optimización y se realizarán flujos de caja que permitan evaluar en qué condiciones sería viable la implementación de la solución para la red.

2. Estado del Arte

En este capítulo se desarrolla la revisión de literatura de la temática involucrada en el problema del diseño de redes de logística inversa para las llantas residuales de gran tamaño (OTR), los modelos de optimización que se utilizan para estos propósitos, así como las legislaciones que regulan las responsabilidades en el manejo de este tipo de llantas. Esta revisión se hace con el propósito de tener un panorama claro con respecto a las temáticas relacionadas con la investigación y así, poder encontrar brechas que permitan puedan ser cubiertas a través del desarrollo de esta investigación. En vista de que el objetivo principal es diseñar una red de logística inversa para llantas OTR residuales, se empieza este capítulo discutiendo los hallazgos encontrados sobre logística inversa, y posteriormente se van desarrollando e interconectando los demás temas de interés, tales como la disposición de llantas de desecho, la representación a través de cadenas de suministro de ciclo cerrado, las reglamentaciones en el manejo de llantas residuales y los modelos utilizados para diseño de este tipo de redes logísticas.

2.1. Logística Inversa

Agarwal et al. (2016) hacen referencia sobre la logística inversa (LI) como “el proceso de planificación, implementación y control del flujo eficaz y rentable de las materias primas, en el inventario de procesos, bienes terminados e información relacionada desde el punto de consumo hasta el punto de origen para el propósito de recuperar el valor o la eliminación adecuada”. Es decir, es un proceso dentro de la administración de la cadena de suministro que permite gestionar los retornos de los clientes y de paso impacta en el servicio y la recuperación del valor del producto, su

adecuada disposición final y el desarrollo de prácticas amigables con el medio ambiente, como similarmente hacen referencia en la literatura diversos autores (Moritz Fleischmann, Beullens, Bloemhof-Ruwaard, & Van Wassenhove, 2001; Mutha & Pokharel, 2009; Rogers & Tibben-Lembke, 1999; Srivastava, 2006; Thierry, Salomon, Van Nunen, & Van Wassenhove, 1995).

Según Dowlatshahi (2005), la logística inversa (LI) es un proceso sistemático que gestiona el flujo de productos / partes desde el punto de consumo hasta el punto de fabricación para posible reciclaje, re-fabricación o disposición. De acuerdo con Beullens (2004), el origen de la competencia en la re-manufactura a menudo recae en la cadena de logística inversa, en la cual los agentes de la cadena son responsables de reunir los artículos usados, clasificarlos y segregarlos, y finalmente transportarlos al fabricante. Incluso, llegan a realizar algunas de las actividades de re-fabricación como el desmontaje y la limpieza. Para Gómez Montoya, Correa Espinal, & Herrera Vázquez (2012), la logística inversa comprende el flujo de productos, información y dinero desde el punto de uso hasta el de origen o reproceso, siendo contrario a la dirección tradicional de la cadena de suministro que comprende desde el punto de origen (empresa - proveedor) hasta el punto final (distribuidores - clientes).

Otro enfoque de la logística inversa es considerarla como un conjunto de procesos encargados de recibir, evaluar, registrar y transformar o tratar los productos retornados por los clientes, para reutilizarlos en el medio industrial o disponerlos adecuadamente para reducir los impactos en el medio ambiente, la comunidad y generar beneficios económicos (Barker & Zabinsky, 2008). Chiou, Chen, Yu, & Yeh (2012) afirman que la logística inversa se ha convertido en una fuente importante de oportunidades para que las empresas mejoren la visibilidad y la rentabilidad y reduzcan los costos en toda la cadena de suministro. Por esto, cada vez más empresas ahora consideran la logística inversa como una actividad estratégica porque puede crear valor.

Mollenkopf & Closs (2005) demostraron que las empresas pueden gestionar el flujo de bienes de vuelta a través de su cadena de suministro y tendrán muchos más beneficios, tales como crear ingresos adicionales, reducir los costos operativos y minimizar los costos de oportunidad de productos defectuosos o desactualizados. Govindan et al. (2012) concuerdan con esto, afirmando que las empresas que compran asistencia logística inversa de proveedores externos pueden reducir hasta el 10% de los costos anuales de logística de su empresa. Pero de otro lado, Ayvaz, Bolat, & Aydin, (2015) afirman que el diseño de redes de logística inversa (RLND, por sus siglas en inglés) se complica por las necesidades de prueba y clasificación de los productos de devolución, teniendo que abordar la incertidumbre de los productos de devolución en términos de cantidad, calidad y tiempo de suministro, así como integrar y coordinar diferentes flujos de avance y retroceso.

2.2. Disposición de Llantas de Desecho

En palabras de Beckman et al. (1974), la disposición de llantas de desecho ha estado con la industria del caucho desde que el uso de llantas se volvió significativo. Inicialmente, la industria del caucho recuperaba la llanta de desecho, sin embargo, a medida que esta desarrolló elastómeros sintéticos, los procesos de recuperación se volvieron más complejos y costosos. “El desarrollo de neumáticos más seguros y duraderos, aunque dificulta el trabajo de los recicladores, también permite reencauchar más neumáticos debido a la calidad duradera de los cuerpos de los neumáticos actuales. De hecho, las flotas de vehículos comerciales y las aerolíneas aprovechan la durabilidad de los cuerpos de los neumáticos para rutinariamente reencauchar sus neumáticos” (Beckman et al., 1974).

Malcolm Pirnie Inc. (1991) concluyó que las llantas de desecho deberían considerarse un recurso en lugar de un material de desecho; que estas llantas en una condición triturada, astillada o completa han sido quemadas de una manera ambientalmente racional; y que tienen un contenido de calor significativo, y bajo condiciones controladas este calor puede extraerse para un uso beneficioso. A pesar de esto,

también afirman que se deben abordar varios otros asuntos relacionados con el uso de llantas de desecho para recuperación de calor, los cuales incluyen problemas de confiabilidad de la tecnología de trituración, revisión de la regulación, uniformidad de los datos de emisiones al aire, metodologías de prueba y características de la ceniza. De Souza & D'Agosto (2013) concluyeron que a pesar de que las llantas de desecho generalmente se consideran productos de valor negativo que no generan ingresos cuando se reintroducen en el ciclo de producción, al aprovechar las aplicaciones cruzadas, es posible utilizar llantas de desecho como sustituto del coque de petróleo para co-procesamiento en plantas de cemento. Con este método, se remunera a los elementos de la cadena, excepto en situaciones extremas en las que el coque de petróleo alcanza un valor mínimo. Además, el uso adecuado de llantas de desecho reduce los costos de salud pública al minimizar el potencial de criaderos de insectos y roedores, que a menudo conducen al desarrollo de enfermedades, como la fiebre de la dengue, la fiebre amarilla, la leptospirosis y la malaria (De Souza & D'Agosto, 2013).

El manejo que se le da a la disposición final de las llantas de desecho ha sido ampliamente explorado en la literatura, sin embargo, existen dos tipos de llantas de desecho, las llantas regulares que se usan en los automóviles y las llantas fuera de carretera, también llamadas llantas OTR. Sheerin (2017) afirma que las llantas OTR representan solo el 1% de la industria de llantas en volumen unitario, pero del 15 al 20% en peso total, así que la industria del reciclaje de llantas está abordando el desafío de administrar este flujo de llantas para recuperar y reciclar el importante volumen de caucho de alta calidad y las toneladas de acero con alto contenido de carbono que se encuentran en este tipo de llantas. En el mundo, el manejo en cantidades masivas de llantas descartadas de la actividad minera, ha representado un desafío económico, ambiental y social. A nivel económico, las dificultades logísticas en el transporte de llantas OTR desde lugares remotos donde suelen encontrarse las minas a cualquier ubicación dada se presenta debido a sus enormes dimensiones: los diámetros de estos neumáticos oscilan entre 2 y 3 metros, pero pueden alcanzar hasta 4 metros con pesos de más de 3 toneladas (Goodyear, 2017).

Un paso inicial para poder transportar y posteriormente reciclar estas llantas es reducir su tamaño, lo cual también plantea desafíos técnicos y económicos importantes, debido a que se requieren inversiones importantes en cizallas de gran tamaño para trabajo pesado. Esto con el fin de que las llantas se corten en piezas lo suficientemente pequeñas como para caber en una trituradora grande y luego en sistemas de pulverización de molienda mecánica. Las alternativas ecológicas de conversión de llantas OTR, comienzan con la trituración de los neumáticos, y posteriormente pasan a diferentes procesos, los cuales conforman una cadena de suministro inversa con diferentes rutas, pero que finalmente hace parte de la gran cadena de suministro de ciclo cerrado de las llantas.

2.3. Cadenas de Suministro de Ciclo Cerrado de las Llantas de Desecho

Si consideramos simultáneamente las cadenas de suministro directa e inversa, la red resultante construirá una cadena de suministro de ciclo cerrado (Govindan et al., 2015). Según Krapp, Nebel, & Sahamie (2013), las cadenas de suministro de ciclo cerrado (CSCC) son sistemas económicos en los que se reciclan productos o componentes devueltos. Estas cadenas son conocidas también bajo el término CLSC (Closed Loop Supply Chain). “Las CLSC se centran en recibir de vuelta los productos de los clientes y recuperar valor agregado mediante la reutilización de todo el producto, y / o algunos de sus módulos, componentes y partes” (D. Guide & Van Wassenhove, 2009). La Figura 2-1 ilustra una forma de cadena de suministro genérica para logística directa e inversa, donde ambas cadenas de suministro, clásica (hacia adelante) e inversa se presentan mediante líneas continuas y guiones, respectivamente. En Subulan et al. (2015) hacen una representación de la cadena de suministro de ciclo cerrado para las llantas al final de su vida útil (llantas residuales), considerando múltiples opciones de recuperación. En la Figura 2-2 se muestra que las llantas de desecho se pueden usar de cinco formas alternativas: reutilización directa, reencauchado, reciclaje, recuperación de energía y eliminación (vertido e incineración).

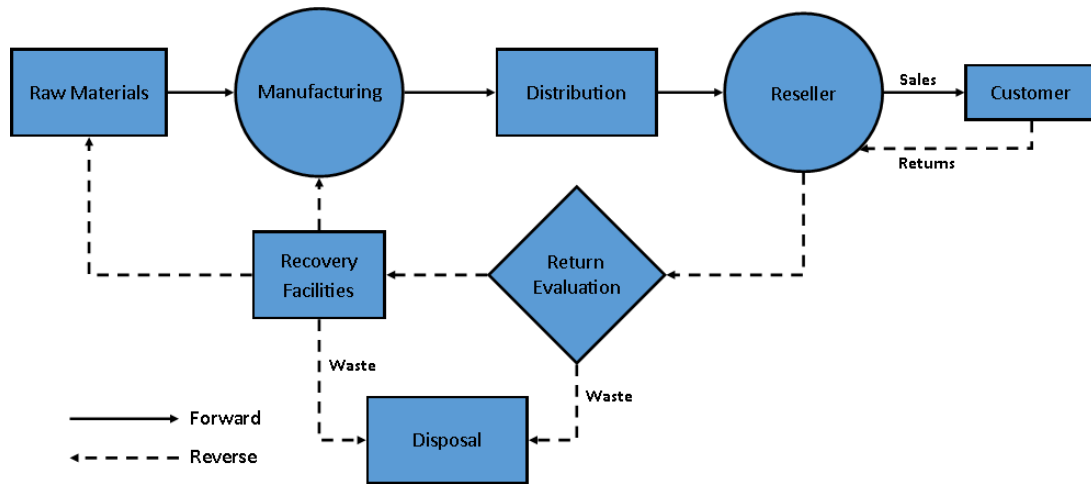


Figura 2-1. Una forma genérica de logística directa / inversa.

Adaptada de Govindan et al. (2015)

La reutilización directa es la alternativa más ambientalmente amigable desde todos los puntos de vista, sin embargo, sólo una pequeña fracción de las llantas usadas se puede revender en mercados secundarios (Martinez-Alvaro & Herrero-Del-Barrio, 2009; Panagiotidou & Tagaras, 2005). Con respecto al reencauchado, este se puede realizar reemplazando el caucho desgastado y la capa externa de un neumático con una nueva capa de caucho. El proceso de reencauchado ahorra hasta el 80% del costo del material de un neumático (Debo & Van Wassenhove, 2005), contribuyendo también con la conservación de los recursos materiales y con la reducción de CO2 durante los procesos de producción (Bridgestone, 2010). Los neumáticos reencauchados tienen casi el mismo rendimiento que los neumáticos nuevos, pero se venden con descuentos del 30-50% en los mercados secundarios (Lebreton & Tuma, 2006; Sasikumar et al., 2010).

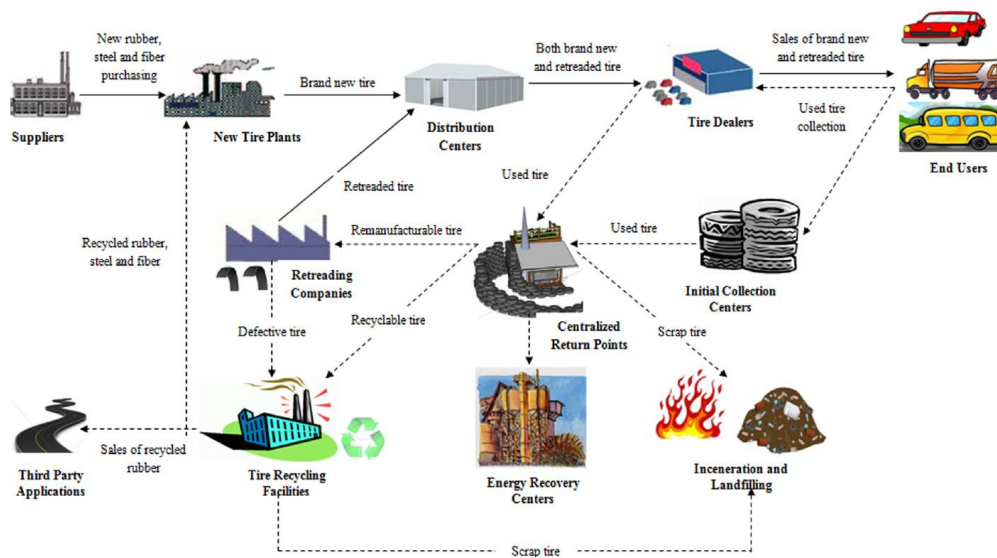


Figura 2-2. Representación de red de cadena de suministro de ciclo cerrado (CSCC) con múltiples opciones de recuperación para llantas al final de su vida útil.

Tomada de Subulan et al. (2015)

En el reciclaje se recuperan los materiales de los neumáticos triturados o granulados (Panagiotidou & Tagaras, 2005). Los materiales recuperados, tales como polvo de hule, alambres de acero y fibras que se separan durante la fase de reciclaje del material, así como el granulado del neumático se pueden reutilizar en las capas de asfalto superior de las carreteras, así como en varias otras aplicaciones, como se mencionó anteriormente. Aunque, de acuerdo con Waste Management World (2003), la reutilización de caucho o granulado de neumáticos para su propósito original es la alternativa preferida debido a sus beneficios ambientales y económicos. Ferrão et al. (2008) también enfatizaron que el reciclaje de neumáticos tiene un beneficio ambiental porque evita la producción de materiales de sus fuentes primarias.

Subulan et al. (2015) afirma que las llantas tienen un alto contenido de energía en comparación con otros tipos de desechos sólidos y combustibles fósiles y por lo tanto, pueden usarse para la generación de electricidad por incineración y como un sustituto de combustible en plantas termoeléctricas, hornos de cemento y fábricas de papel. Además, este combustible tiene un costo bajo en comparación con los combustibles

clásicos (Bridgestone, 2013; Lebreton, 2007). Por lo tanto se puede recuperar energía de las llantas residuales a través de esta opción de recuperación (Lebreton & Tuma, 2006; Panagiotidou & Tagaras, 2005; Sasikumar et al., 2010). Arrojar a vertederos es la opción menos recomendable para la gestión de llantas de desecho, puesto que cuando se usa esta opción, las llantas deben ser cuarteadas, divididas o trituradas para reducir el potencial de resurgimiento de los neumáticos (New Hampshire Department of Environmental Services, 2011) y aunque triturar los neumáticos evita los problemas descritos anteriormente, incurre en altos costos de procesamiento. Además, las llantas de desecho ocupan grandes cantidades de espacio en los vertederos y permanecen intactas durante mucho tiempo (Ferrão et al., 2008). La incineración de neumáticos enteros en hornos industriales es ambientalmente segura en comparación con los incendios de neumáticos no controlados, que crean contaminación del aire y del suelo (Waste Management World, 2003).

2.4. Reglamentación en el Manejo de Llantas de Desecho

En el manejo de residuos sólidos, una de las grandes barreras en su implementación es la toma de decisiones para la recolección de los residuos desde los puntos donde se generan hasta el punto de disposición final. En particular, el problema de la gestión de llantas residuales requiere un amplio uso de la logística inversa para poder tener una red que permita darle un uso amigable con el medio ambiente a estos residuos, que aunque no se consideren en Colombia como un residuo peligroso, sí requieren ser devueltas a los productores para favorecer el reciclaje, aprovechamiento como agregado asfáltico o el reencauche, así como evitar que sean quemadas en espacios a cielo abierto y como combustible en actividades informales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017). La definición de logística inversa (LI) ha evolucionado a lo largo de los años a medida que la investigación sobre este tema ha ido avanzando. La definición más ampliamente aceptada es que “la logística inversa es el proceso de planificación, implementación y control del flujo eficaz y rentable de las materias primas, en el inventario de procesos, bienes terminados e información

relacionada desde el punto de consumo hasta el punto de origen para el propósito de recuperar el valor o la eliminación adecuada” (Rogers & Tibben-Lembke, 1999). Sin embargo, tal definición ha estado cambiando con el tiempo y ampliando su alcance con el interés de los investigadores.

La logística inversa es un tema que en los últimos años ha tenido un amplio desarrollo en múltiples áreas, debido al creciente interés por la identificación y el diseño de procesos eficientes que permitan el reúso, recuperación, reciclaje o eliminación de los productos después de que cumplen su ciclo de vida o productos que no cumplieron las especificaciones del cliente con el fin de minimizar los impactos ambientales y maximizar los beneficios económico de la empresa (Gómez et al., 2012). Según enuncian Amin & Zhang (2012), la logística inversa analiza el flujo de los materiales o productos en sentido contrario de la cadena de suministro, con el fin de revalorizarlo y sacarle beneficios económicos. Además estos autores presentan una distinción entre los diferentes usos que se le puede dar al material dependiendo de la etapa en que se encuentren según su ciclo de vida; ellos en su trabajo plantean un modelo por medio de programación lineal mixta entera (MILP), para una cadena de suministro con logística inversa, en la que desean encontrar el óptimo número de puntos de acopio de material que fluye en sentido contrario, y a su vez encontrar el número de centros en los que se dividiría el material después de clasificado.

Kannan, Diabat & Shankar (2014) hacen una revisión literaria de la cual identifican y menciona cuales son los diferentes factores o elementos que se tienen en cuenta o que se influyen directamente en la construcción de un modelo de logística inversa para el final del ciclo de vida de las llantas. Por su parte, Fleischmann, Krikke, Dekker, & Flapper (2000) en sus estudios presentan las diferentes definiciones y características de una red de logística inversa para la recuperación de elementos que han cumplido su función o que su ciclo de uso o de vida ha terminado. Hablan de las etapas de recolección del material a ser reutilizados y hacen énfasis en el proceso de inspección/reparación dónde se clasifica el material que debe ser manufacturado, él

debe ser reciclado y el que debe ir a su disposición final debido a que su valor no puede ser recuperado. Akçalı, Çetinkaya, & Üster (2009) también hacen una revisión literaria sobre la construcción de redes de logística inversa para la recuperación de materiales, la preocupación de su investigación nace de que históricamente sólo se le daba importancia a los elementos que iban hacia adelante en la cadena, y debido a los impactos globales todas las actividades hacia atrás han cobrado relevancia. Además, presenta la diferencia entre una cadena de suministro en reversa, la cual incluye toda la colección, separación, y re-manufacturación / reciclaje del material, y la cadena de suministro cerrada, que se dedica al estudio de las actividades tanto en sentido hacia adelante en la cadena como las actividades en reversa de esta.

Un aporte para tener en cuenta ha sido el de Flórez et al. (2012), en su artículo estos logran, además de hacer una revisión literaria sobre técnicas de solución al tema de diseño de redes de logística inversa, realizar una aplicación a un caso particular sobre esta temática. Este artículo es de especial relevancia ya que el caso de aplicación se hace sobre la gestión de llantas en desuso en las ciudades de Pereira y Dosquebradas, al interior de nuestro país colombiano. Sin embargo, la información del análisis y conclusiones de este artículo no son contundentes. Recientemente Barraza, Fuentes, Guarín, Silvera, & Amaya (2016) presentaron una solución a la problemática presentada por la mala disposición de llantas utilizadas en el sector minero, que incluye un modelo por programación lineal para minimizar los costos de la recolección y disposición final de las llantas recolectadas en las principales minas de carbón de Colombia. El modelo que minimiza el costo de la red de abastecimiento de llantas residuales de una planta generadora de energía, la cual tenía una función de autoconsumo. Sin embargo, esta solución solo aborda el ámbito económico y no considera la parte medioambiental ni social que esta problemática acarrea. Esto está relacionado con la carga de responsabilidad que tienen los actores de la cadena de suministro de la industria de las llantas con respecto a la recolección y recuperación de las mismas una vez cumplen su ciclo de vida, lo cual se explicará en mayor detalle a continuación.

2.5. Responsabilidad Extendida del Productor (REP)

La responsabilidad extendida del productor (REP), conocida por sus siglas en inglés como EPR (Extended Producer Responsibility), fue definida por Lindhqvist (1992) como una estrategia de protección ambiental para alcanzar un menor impacto ambiental total de un producto, al hacer que el fabricante del producto sea responsable de todo el ciclo de vida del producto y especialmente de la recuperación, el reciclaje y la disposición final del producto. Lindhqvist (2000) explica que este principio se implementó especialmente en Europa, y se basó en la legislación europea que promueve el reciclaje de productos al final de su vida útil. Según Driedger (2002), los modelos de EPR contribuyeron a promover reducciones en la eliminación de desechos de los consumidores y se basan en el principio de “quien contamina paga” (polluter-pays principle). Su objetivo es que las externalidades ambientales relacionadas con la disposición final del producto sean internalizadas por las empresas, proporcionando incentivos para evitar la generación de residuos, fomentar el diseño ecológico de los productos y apoyar las operaciones de reciclaje y gestión de residuos.

De acuerdo con Park et al. (2018), en América Latina, uno de los primeros en adoptar la EPR fue Colombia, donde se introdujo en 2007, con el fin de administrar varios productos al final de su vida útil, tales como contenedores de plaguicidas, medicamentos, baterías de ácido sólido, bombillas, baterías pequeñas, computadoras y llantas. Sin embargo, Park et al. (2018) también encontraron que el modelo de gobierno colombiano de EPR impone responsabilidades financieras y operativas completas a los productores e importadores de neumáticos, mientras que no incentiva a otros actores en la cadena de productos a llevar a cabo sus tareas y responsabilidades asignadas. Como consecuencia de esto, en el caso de las llantas de desecho, este sistema de EPR ha aumentado la cantidad de llantas recolectadas en los últimos cinco años, pero el nivel es bajo en comparación con otros países desarrollados, y más importante aún, no promueve completamente la recuperación de los valores del desperdicio de llantas. Dulce Romero (2016) recopila que “Si bien la

resolución 1457 de 2010 exige a los productores recolectar anualmente, por lo menos, el 35% de llantas usadas del total que venden en dos años, [...] en la resolución no se incluyen las llantas de motos, bicicletas, montacargas y maquinaria para minería”. Es decir, hay una resolución que intenta regular el manejo de llantas usadas, pero aún le falta ser más exhaustiva en cuanto a la consideración de los actores que las generan.

2.6. Modelos de Transporte y de Asignación

Para el modelado de redes de logística inversa de llantas de desecho, los modelos de programación lineal tienen un rol importante, siendo especialmente significativos los modelos de transporte y asignación. Estos reciben dichos nombres porque sus aplicaciones involucran cómo determinar la manera óptima de transportar bienes y la asignación de personas a tareas, aunque también son usados en programación de la producción (Hillier & Lieberman, 2010). Aunque los usos del problema de asignación parecen diferir de los del problema de transporte, los primeros se pueden considerar un caso especial del problema de transporte cuando la oferta y la demanda tienen capacidad fija de 1.

Según Hillier & Lieberman (2010) “el problema general de transporte se refiere a la distribución de cualquier mercancía desde cualquier grupo de centros de suministro, llamados orígenes, a cualquier grupo de centros de recepción, llamados destinos, de tal manera que se minimicen los costos totales de distribución”. Debido a que este modelo puede ajustarse a problemas que muchas veces no involucran el transporte, lo convierte en un tipo especial de problema y de los más importantes en la programación lineal. Este problema de transporte también puede tener aplicación en problemas enteros y si los parámetros del modelo no son enteros, podrían aumentar la complejidad al momento de obtener la solución exacta del problema usando técnicas de programación lineal. El problema de distribución, está evidentemente relacionado con la logística inversa debido a que el problema principal de esta consiste en la recolección de productos de los diferentes orígenes donde se generan los productos residuales a los posibles destinos para la disposición final de los mismos. Aquí se

consideran además las capacidades de las ofertas en los puntos de orígenes y las demandas en los puntos de destino. En el caso de que se involucre algún punto intermedio, ya sea relacionado con apertura de plantas o de centros de acopio, se pueden utilizar variables binarias, con lo cual el problema clásico de transporte pasa a ser un problema de programación entera – mixta. En este caso, las llantas residuales podrán pasar o no por puntos intermedios antes de ser llevadas a su destino final.

2.7. Programación Entera - Mixta

En el área de Investigación de Operaciones, se encuentra la rama de la optimización que permite maximizar o minimizar una función objetivo que se encuentra sujeta a una serie de restricciones, las cuales pueden ser ecuaciones o inecuaciones que definen si hay o no una región factible. De acuerdo con Hillier & Lieberman (2010), de los distintos problemas que se pueden encontrar, existen problemas con espacio de solución continuas o discretas. Los problemas con espacios de soluciones continuas son conocidos, como problemas de programación lineal (LP: Linear Programs) y pueden ser resueltos por métodos exactos, como el algoritmo Simplex; mientras que los problemas con espacios de soluciones discretos son problemas que tienen una mayor complejidad y, por ende, han sido objeto de gran cantidad de investigaciones. Estos pueden ser clasificados como:

- Programas Enteros Mixtos (MIP: Mixed Integer Programs): Este tipo de problemas están compuestos por variables enteras y variables continuas.
- Programas Enteros (IP: Integer Programs): Están compuestos únicamente por variables enteras
- Programas Binarios (BIP: Binary Integer Programs): Todas las variables son enteras restringidas a valores 0 – 1

Jayaraman (2006) propuso un modelo de programación lineal para la planificación de producción en una red de logística inversa de ciclo cerrado con niveles de calidad predefinidos y tiempos de entrega cero. Además, Das & Chowdhury (2012) utilizaron

un modelo MIP para la planificación de producción de logística inversa con decisiones de diseño de producto y consideraciones de calidad. Mahapatra, Pal, & Narasimhan (2012) también examinaron el efecto de la calidad de retorno heterogénea y la cantidad de retorno no uniforme en redes de logística inversa integradas utilizando un modelo MILP.

En la línea de investigación similar, Nenes & Nikolaidis (2012) propusieron un modelo de período múltiple basado en MILP con demanda determinística y cantidades de retorno. Supusieron que los sitios de recolección de terceros tenían disponibles lotes de productos devueltos que la instalación de recuperación podría elegir adquirir o ignorar. Además, tenía la opción de usar una determinada parte de los lotes adquiridos. En este modelo, se conocía la cantidad de productos que pertenecen a un determinado nivel de calidad para cada lote particular. El problema en cuestión de esta investigación puede utilizar variables con características discretas (binarias y enteras), por lo cual es posible que sea necesario el uso métodos de solución para problemas de programación entera.

Y por otra parte, Pishvaei, Kianfar, & Karimi (2010) realizaron el diseño de una red de logística inversa cuya modelación fue realizada a través de un modelo MILP para minimizar los costos de transporte y apertura fijos en una red de logística inversa de múltiples etapas. Dicha red logística incluye zonas de clientes, centros de recolección, inspección, recuperación y disposición final, con capacidades limitadas; y su modelo propuesto es capaz de encontrar ubicaciones, números de centros de recolección / inspección y también la cantidad de transporte entre las instalaciones.

2.8. Problemas de Scheduling

Considerando que el recurso de trituradoras es móvil y este deberá ser secuenciado a lo largo del tiempo en las diferentes ubicaciones donde se encuentran las operaciones mineras, las variables de decisión de la red están relacionadas con los problemas de programación (scheduling). M. Fleischmann et al. (1997) hacen mención de la

relación del scheduling en entornos de recuperación de productos, la cual es la base de la logística inversa. B. Fleischmann (1990) afirma que el problema discreto del tamaño del lote y la programación consiste en programar varios productos en una sola máquina para cumplir con la demanda dinámica conocida y minimizar la suma del inventario y el costo de instalación; el intervalo de planificación se divide en fases en muchos períodos cortos, ej. turnos o días, y los alistamientos pueden ocurrir solo al comienzo de un período.

Uno de los problemas de scheduling más antiguos es el problema de programación de lotes económicos (ELSP). Elmaghraby (1978) lo define como el problema de acomodar los patrones de producción cíclica que se basan en cálculos de “cantidad de fabricación económica” (EMQ) para artículos individuales en una sola instalación de producción. Variaciones más complejas como la relación de precedencia difusa es desarrollada por Ishii & Tada (1995). Esta precedencia difusa significa que se relaja la restricción tradicional de precedencia en la que el trabajo j , precedido por el trabajo i , no puede ser iniciado hasta que se complete el trabajo i . Los enfoques que se han propuesto para la resolución de este tipo de problemas se dividen en dos amplias categorías: (1) enfoques analíticos que logran el óptimo de una versión restringida del problema original y (2) enfoques heurísticos que logran soluciones “buenas” (y a veces “muy buenas”) del problema original (Elmaghraby, 1978).

Para Lane & Evans (1995), la programación de producción ha sido vista tradicionalmente como una tarea de resolución de problemas que involucra un solo problema: la generación de un cronograma adecuado; por lo cual, ellos presentan un modelo alternativo en el que las dificultades individuales se consideran problemas, y la tarea es mantener un horario adecuado resolviendo la mayor cantidad posible de estos problemas. En las actividades de re-manufactura utilizadas en entornos de recuperación de productos se puede llevar a cabo la implementación de diferentes políticas de scheduling, tal como se muestra en el trabajo de Guide, Kraus, & Srivastava (1997). Usualmente, en la literatura se encuentra que en los problemas de scheduling se deben programar productos; sin embargo, también existe el problema

en el cual se deben asignar o programar recursos. Este se conoce como el problema de programación de recursos (resource scheduling).

De acuerdo con Moder, Phillips, & Davis (1983), los problemas de programación de recursos surgen cuando hay límites definidos en la disponibilidad de recursos, y por lo tanto el objetivo es cumplir la fecha de vencimiento del proyecto lo más cerca posible, sujeto a límites fijos en la disponibilidad de recursos. El-Beltagy (1992) afirma que la programación de recursos es un tema muy importante para asegurar la utilización eficiente de los recursos disponibles, para cumplir con los límites físicos de los recursos, y/o para obtener un uso continuo de los recursos. Tradicionalmente, el problema de programación de recursos se resuelve utilizando métodos heurísticos o técnicas de optimización; y la planificación de recursos se trata como un problema posterior para el análisis del método de ruta crítica (Ammar & Mohieldin, 2002).

2.9. Problema de la p -Mediana

El problema de la p -mediana es fundamental para gran parte de la teoría y el modelado de ubicaciones discretas (Daskin & Maass, 2015), y se remonta a la obra seminal de Hakimi (1964, 1965). El problema consiste en la ubicación de p instalaciones para minimizar la distancia promedio ponderada por la demanda entre los nodos de demanda y la más cercana de las instalaciones seleccionadas. Ye, Ye, & Chuang (2011) relacionan la logística inversa con los problemas de p -mediana explicando que los recursos de desecho se caracterizan por cantidades de producción inestables y logística inversa, por lo tanto, es económicamente importante determinar ubicaciones eficientes para los centros de gestión de desechos y reciclaje de recursos. Por lo tanto, Ye et al. (2011) plantean un modelo que combina un conjunto de ubicaciones que cubre problemas con problemas de mediana P para resolver los problemas de ubicación de centros de reciclaje.

Considerando que el problema de esta investigación busca encontrar la ubicación óptima de una planta generadora de energía entre varias ubicaciones candidatas,

teniendo en cuenta las distancias que las separan de cada uno de los nodos de origen, se puede modelar como un caso particular del problema p -mediana, donde $p = 1$, llamado problema de la 1 -mediana. Para ilustrar el problema de ubicación en una red, Daskin (2008) explica el problema de la 1 -mediana en un árbol, afirmando que las demandas surgen solo en los nodos del árbol y la demanda en el nodo i es nuevamente dada por h_i ; una sola instalación puede ubicarse en cualquier parte del árbol, y el objetivo es minimizar la distancia total ponderada por la demanda entre la instalación y los nodos. Por todo lo anterior, se considera que el problema de escogencia de la ubicación óptima de la planta generadora de energía que se trata en esta investigación, tiene como base el problema de la p -mediana y puede ser solucionado utilizando los enfoques de métodos de solución exactos y heurísticos que se suelen utilizar en estos casos.

2.10. Conclusiones de la Revisión del Estado del Arte

Este capítulo sirvió para dejar sentada la revisión de la literatura realizada en torno a los temas con los que se relaciona directa e indirectamente esta investigación, permitiendo tener claro el panorama del origen del problema y las tendencias de investigación frente al desarrollo y solución del mismo. Esto fue realizándose desde la base de la investigación, la cual es la logística inversa y se fue direccionando hacia el manejo de las llantas residuales, las regulaciones hacia los entes generadores del residuo, así como el diseño de redes de logística inversa y cadenas de suministro y los modelos utilizados para tales fines.

La revisión de literatura realizada efectivamente demuestra la escasez de publicaciones que relacionen todos los temas de esta investigación, es decir no se encontraron publicaciones que traten sobre diseño de redes de logística inversa para llantas OTR residuales de gran tamaño con uso de recursos compartidos y secuenciados. Sin embargo, se encontraron publicaciones afines al tema de logística inversa (Agarwal et al., 2016; Dowlatshahi, 2005; Rogers & Tibben-Lembke, 1999; Srivastava, 2006; Thierry et al., 1995) y al diseño de redes de logística inversa

(Alshamsi & Diabat, 2015; Ayvaz et al., 2015; Barker & Zabinsky, 2008; Cruz-Rivera & Ertel, 2009; Das & Chowdhury, 2012; Mutha & Pokharel, 2009). También hay publicaciones con respecto a la modelación de estas redes de logística inversa mediante modelos de programación lineal mixta y entera (Alumur, Nickel, Saldanha-Da-Gama, & Verter, 2012; Demirel, Demirel, & Gökçen, 2016; Kannan et al., 2012; Pishvae et al., 2010; Roghanian & Pazhoheshfar, 2014).

Para el manejo de llantas residuales a través de redes de logística inversa, se encontraron varios trabajos publicados (Kumar & Saravanan, 2014; Pedram et al., 2017; Sasikumar et al., 2010; Subulan et al., 2015), sin embargo, sólo uno de menciona el scheduling en temas transporte en recuperación de llantas residuales (Panagiotidou & Tagaras, 2005) y este no corresponde a uso de un recurso compartido (resource scheduling). El diseño de redes de logística inversa de llantas residuales de gran tamaño con recursos compartidos ha sido trabajado sólo a nivel local (Barraza et al., 2016; Chaparro et al., 2018; Llaín et al., 2017) con trabajos que no se encuentran publicados en bases de datos científicas de alto impacto (ISI o SCOPUS). Esto muestra claramente una brecha en la literatura que pretende ser cubierta por la presente investigación.

En el siguiente capítulo se analizará en detalle la modelación y el desarrollo del problema de esta investigación, para tener claro los procesos involucrados y así diseñar un modelo matemático para la red de logística inversa propuesta en la investigación.

3. Modelación y Desarrollo del Problema

Luego de haber culminado en el capítulo anterior la revisión del estado del arte en los temas relacionados con la investigación, se pudo tener un panorama claro del origen del problema y de sus tendencias actuales, así como las técnicas que se podrían implementar exitosamente para dar solución al problema. En este capítulo se presenta la modelación y el desarrollo del problema de las minas y sus llantas residuales. Para esto se presentará en primer lugar el estado actual de los procesos de logística inversa desarrollados en el sector minero colombiano, seguido de la caracterización del servicio y producto que se brindará como solución a las partes involucradas. Posteriormente se analizará la oferta y demanda y se detallará el proceso de corte y triturado de llantas; luego los posibles arcos de la red y finalmente el diseño del modelo matemático.

3.1. Estado Actual de los Procesos de Logística Inversa en el Sector Minero Colombiano

El sector minero en Colombia históricamente ha tenido una representación superior al 50% en las exportaciones realizadas, puesto que siempre ha sido atractivo para grandes capitales tanto nacionales como extranjeros. En el año 2018, las exportaciones de combustibles y productos de industrias extractivas representaron el 58% del total de exportaciones, lo cual sigue la tendencia histórica de este sector. Estos niveles de exportación son posibles de alcanzar gracias a operaciones intensivas por parte de las minas, lo cual genera externalidades, tales como un desgaste mayor en las llantas utilizadas por la maquinaria. En promedio, la vida útil de las llantas

OTR oscila entre 6 y 10 meses, por lo cual se presentan altas tasas de generación de llantas residuales.

Estas tasas de generación de llantas residuales representan un problema para las operaciones mineras debido a que actualmente no tienen alternativas de disposición que sean económicamente viables para las mismas. Actualmente estas llantas tienen un valor residual negativo, puesto que las alternativas que tradicionalmente han utilizado las minas para darle una disposición al residuo sólo generan costo sin ningún retorno de dinero. Como se mencionó en la sección 1.1, el método mayormente utilizado en la actualidad es el apilamiento; y este involucra un costo logístico para mover las llantas OTR desde los sitios donde se ubica la maquinaria hasta las zonas dispuestas por las minas como cementerios de llantas. Teniendo esto en cuenta, el propósito de la presente investigación es convertir este costo residual en un valor positivo a través de la implementación de una red de logística inversa que permita recolectar las llantas, triturarlas y enviarlas a una planta de reconversión de energía.

3.2. Caracterización del Servicio y Producto

Barraza et al. (2016) realizaron la caracterización del servicio que se le prestará a las minas y del producto generado a partir del mismo, sirviendo de base para la investigación actual. La principal función de la planta será generar energía eléctrica, la cual podrá ser utilizada para la venta o para autoconsumo. La materia prima que requiere es llanta triturada, proveniente de los procesos realizados en los nodos de la red de logística inversa, por lo cual es necesario un diseño costo-efectivo de dicha red. El detalle de los procesos requeridos, así como el análisis del producto terminado (energía) será presentados a continuación.

3.2.1. Usos y Especificaciones

El producto que se utilizará como materia prima es el caucho vulcanizado granulado, tiene densidad de 1.109 gr/cm³ a 25°C y su forma física es en gránulos de forma irregular, los cuales son intervenidos mediante tratamientos térmicos como combustión (incineración), pirolisis y gasificación. Una vez las llantas pasen por el proceso de trituración son depositadas al inventario de la planta para la generación de la energía eléctrica y para su aprovechamiento en el sector minero.

En los últimos años se han hecho investigaciones y creado proyectos para aprovechar el material sin generar efectos ambientales, tales como emisiones, deterioro a cielo abierto, entre otros. En la actualidad el proyecto más reciente es la trituración en polvo de las llantas para fabricar mezcla asfáltica y se ha registrado en países como Brasil y en ciudades como Bogotá en los cuales ya ha hecho uso de este asfalto (Figueroa, Sánchez, & Reyes, 2007).

3.2.2. Atributos Diferenciadores

La empresa ha desarrollado una red de logística inversa basada en la recolección en minas y entrega en planta de las llantas para su uso como materia prima. A diferencia de soluciones implementadas previamente, las cuales se enfrentaban a la dificultad de mover las llantas OTR en sus tamaños originales, que eventualmente conllevaban a la no factibilidad de estas soluciones, en este proyecto se establecen puntos claves para su organización y desarrollo, tales como localización de planta, reducción de tamaños iniciales para el posterior envío a una planta generadora de energía eléctrica. Para el diseño de la red logística se implementó un modelo basado en logística inversa, teniendo en cuenta que a nivel local y regional no existe una empresa que recicle llantas para generar energía. Además de esto se precisa como valor agregado el uso adecuado según lo indican las normativas del reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE) y leyes nacionales para estos tipos de desechos, generando un producto con alta utilización en el mercado sin dejar residuos o emisiones al medio ambiente, adicionalmente la empresa garantiza procesos optimizados con mano de

obra calificada, calidad y eficiencia en la prestación del servicio eléctrico (Ministerio de Minas, 2007).

3.2.3. Mercado Objetivo

El mercado objetivo del proyecto se divide en dos partes:

- Clientes de la planta generadora de energía:

Un posible cliente para de la planta generadora de energía sería la empresa XM, la cual se encarga de la compra y venta de la energía eléctrica en el país. Según Cortés & Arango Londoño (2017) la energía es indispensable para el desarrollo económico de un país y factores como el rápido crecimiento demográfico, la expansión del sector industrial, el acelerado crecimiento tecnológico, entre otros factores, han incrementado la demanda de energía y, en consecuencia, el sistema eléctrico es cada vez más susceptible de no satisfacer el consumo de energía. En Colombia está aumentando el número de viviendas que necesitan fluido eléctrico debido al incremento poblacional que ha venido presentando en los últimos años, que según los censos del DANE y proyecciones, ha pasado de tener 41 millones de habitantes a tener 49 millones (Vargas, 2017).

A su vez también cabe resaltar un incremento en las diferentes áreas productivas del país, lo que ha generado nuevas unidades de negocio, en especial con el desarrollo de tecnologías digitales. De acuerdo con Dinero & Entrepreneur (2018), el desarrollo de estas tecnologías ha cambiado la forma en la que se relacionan las marcas con los consumidores, lo que ha ayudado a mejorar el comercio, la creación de nuevos productos, logística, financiación, canales de distribución, entre otros. Todas estas nuevas unidades de negocio, presentan de igual manera necesidades de un sistema eléctrico, lo cual conlleva también a que los requerimientos energéticos del país sean cada vez mayores.

La generación de energía eléctrica en Colombia históricamente ha dependido de la energía hidroeléctrica, la cual ha sido catalogada como una de las más competitivas a nivel mundial (Institut Choiseul & KPMG, 2012) por su alta confiabilidad y sus altos índices de calidad. Sin embargo, a pesar de ser comúnmente considerada como una generación de energía limpia, libre de emisión de gases efecto invernadero, la energía hidroeléctrica tiene efectos nocivos directos e indirectos tanto ambientales como sociales (Gómez Correa, 2016). Por todo lo anteriormente expuesto, la conversión de las llantas trituradas a energía eléctrica se presenta como una alternativa de disposición final idónea en el contexto colombiano, así como en cualquier otro país que busque alternativas de generación de energía.

- Clientes del sistema de recolección y disposición de llantas usadas:

El mercado base para este servicio son las empresas del sector minero de la Región Caribe colombiana, además de las empresas encargadas de la distribución de las llantas o vehículos. En las minas usan camiones de gran dimensión para sus actividades, los cuales tienen llantas OTR de un diámetro aproximado de 2 metros que cuales deben ser cambiadas cada 8 meses (Vásquez García, 2013). Para una flota de 200 camiones que aproximadamente necesitan para la operación minera, se tendría que anualmente se desecharían 2500 llantas según lo proyectado por Cerrejón (2012). La no disposición final de estas acarrearía sanciones económicas impuestas por los entes de control nacionales, lo cual hace que se encuentre una necesidad por parte de las empresas mineras o a sus proveedores de las llantas de contratar un servicio para la correcta disposición final de ellas.

3.3. Análisis de Oferta y Demanda de la Planta

El análisis de la oferta permitirá determinar la cantidad anual de llanta triturada que se va a ofrecer a la planta generadora para su abastecimiento, con lo que se tomarán decisiones en base a los límites que se han especificado previamente para el desarrollo de su actividad, los cuales oscilan entre 10.000 y 28.000 toneladas anuales.

La cantidad tentativa a ofrecer se obtiene en base al horario laboral de los operarios, quienes lograrán conseguir la llanta desechada en estado final de polvo como materia prima para la generación de energía. Para esto se ha determinado que la mano de obra tendrá un horario laboral de dos turnos que suman 16 horas diarias con dos turnos de 8 horas, incluyendo los días domingos y festivos. Con este tiempo se podrá determinar la cantidad de llantas a producir diarias teniendo en cuenta que el proceso de trituración de llanta en estado final de polvo demora aproximadamente 35 minutos, y con esto la cantidad semestral teniendo en cuenta que se trabajarán 180 días en un semestre. Los resultados se muestran en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1. Capacidad de trituración

Dato	Valor
Tiempo de ciclo de corte/llanta (minutos)	35
Horas diarias	16
Min/día	960
Llantas trituradas por día	27
Días laborales por semestre	180
Llantas trituradas por semestre	4860
Toneladas a ofertar por semestre	14580

3.4. Proceso de Corte y Trituración de Llantas OTR

Debido al gran tamaño que presentan las llantas utilizadas en el sector minero, para su transporte es requerido que se reduzcan las dimensiones significativamente para así poder transportar estas llantas a su sitio de disposición final. En primer lugar, se deben someter las llantas a un proceso de corte inicial, con el cual se busca conseguir un tamaño más manejable de estas para la realización de las operaciones, y posteriormente el proceso de triturado en sitio. La Figura 3-1 muestra cuales son las etapas requeridas para el proceso de reducción de tamaño de llantas OTR.



Figura 3-1. Etapas del proceso de reducción de tamaño de llantas residuales OTR

Estas etapas se realizan de manera secuencial y de aquí salen las llantas trituradas, listas para ser transportadas hacia su destino final, el cual es la planta generadora de energía eléctrica. La descripción de estos procesos se explica a continuación.

3.4.1. Corte Inicial

La etapa del corte inicial es requerida para poder tener las llantas OTR en un tamaño facilite su manipulación y traslado, debido a que las dimensiones originales de estas llantas oscilan entre los 3 y 4 metros (Goodyear, 2017), lo cual representa dificultades a nivel logístico y económico. A esto se le añade que las minas donde se encuentran los inventarios de llantas OTR, geográficamente están localizadas en lugares remotos y que los pesos de las llantas pueden ser de más de 3 toneladas. Para este propósito, se pretende utilizar una cizalla de demolición para trabajo pesado capaz de cortar las llantas en secciones similares a un corte de pizza y la cual es anexada en una excavadora hidráulica (maquinaria amarilla). Esta cizalla es la Kinshofer DRS-75-A, mostrada en la Figura 3-2, tiene una fuerza de corte de 14270 kN y 835 mm de apertura de la mordaza (Kinshofer, 2017) y ha sido probada previamente en la implementación de un sistema de recolección de llantas (Eldan Recycling, 2014).



Figura 3-2. Cizalla para excavadora Kinshofer DRS-75-A

Tomada de Kinshofer (2017)

En la Figura 3-3 se ilustra el la reducción de las dimensiones de las llantas OTR al pasar por el proceso de corte inicial y estas piezas cortadas luego pasan al proceso de triturado.

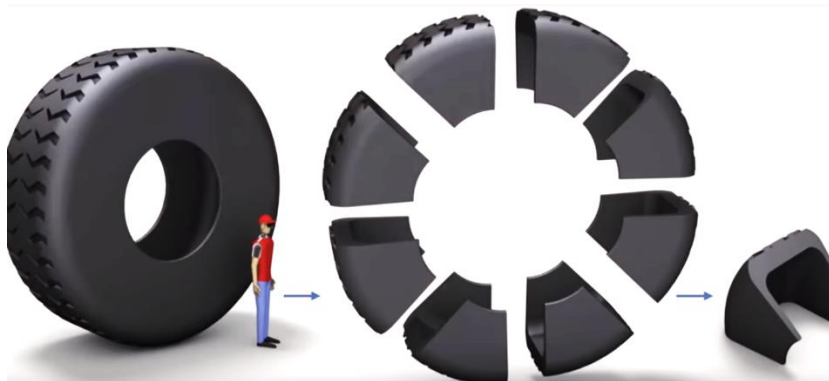


Figura 3-3. Reducción de dimensiones por corte de llantas OTR

Tomada de Kinshofer (2017)

3.4.2. Proceso de Triturado

Luego de que las llantas OTR salen del proceso de corte inicial, presentan dimensiones adecuadas para entrar en el proceso de triturado. Para esto, se utilizará la trituradora portable PD1000TIF de BCA Industries.



Figura 3-4. Trituradora portable PD1000TIF

Tomada de BCA Industries (2017)

Esta es una trituradora de propósito general con el beneficio adicional de recircular y dimensionar el material de salida en una sola operación. La trituradora se alimenta manualmente desde el nivel del suelo mediante su transportador de alimentación de 24 pulgadas de ancho. Esto ayuda a limitar la fatiga del operador y aumentar la seguridad del operador (BCA Industries, 2017).

Una vez que se pase por este proceso, la llanta estará en condiciones de ser transportada a la planta generadora de energía en cualquiera de los modos de transporte que se desee utilizar, bien sea terrestre, férreo o fluvial.

3.5. Posibles Ubicaciones de la Planta

Las posibles ubicaciones de la planta se analizaron teniendo en cuenta su cercanía a las 4 minas seleccionadas como nodos proveedores de la red. Las minas funcionarán como generadoras de materia prima de la planta eléctrica, y seguidamente se relacionan:

- Mina en Córdoba (Mina C)
- Mina en La Jagüa de Ibirico, Cesar (Mina P)
- Mina en La Loma, Cesar (Mina D)

- Mina en La Guajira (Mina G).

Considerando el acumulamiento de llantas que existe en cada una de estas minas, el estado actual del ciclo de vida de la mina y métodos de solución o tratamiento del problema empleadas actualmente por estas se encontraron importantes situaciones que afectan el planteamiento del método de solución. Por un lado, en la Mina G (ubicada en la Guajira), se implementó una solución de reprocesamiento de llantas residuales que actualmente se encuentra fuera de funcionamiento debido a problemas derivados de inconvenientes en la reducción del tamaño inicial de las llantas OTR. En este estudio se tendrá en cuenta este punto como posible ubicación de la planta, así como también de nodo proveedor.

En el caso de la Mina C, ubicada en el departamento de Córdoba, ésta ha venido presentando una disminución importante en sus niveles de producción, hasta el punto que se proyecta su cierre a mediano plazo (Güesguán, 2015), lo cual hace que su importancia en volumen de materia prima para ofrecer decrezca, pero siga siendo tenida en cuenta. El problema de la escogencia de la ubicación de la planta toma como base la formulación del problema de la p -mediana (I -mediana) iniciado por Hakimi (1964, 1965) y aplicado a redes de logística inversa por Ye et al. (2011), por lo cual el modelo matemático utilizará elementos de dicho problema para incluirlos en el diseño de la red de logística inversa de la presente investigación.

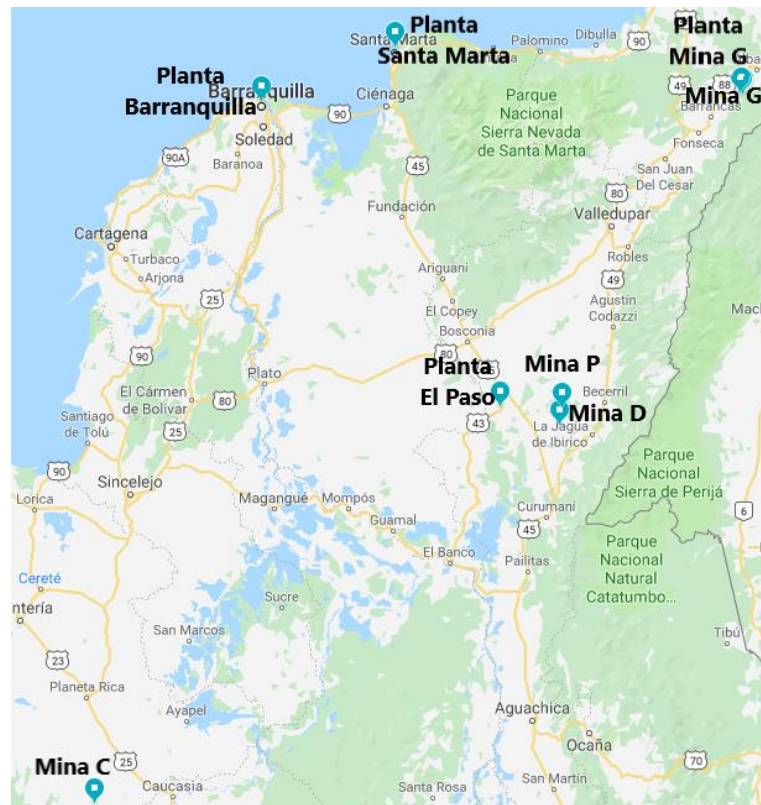


Figura 3-5. Ubicación de las minas y posibles ubicaciones de la planta

En la Figura 3-5 se muestra la ubicación geográfica de las 4 minas que hacen parte de la investigación y de las posibles ubicaciones de la planta. Para la recolección se tendrá en cuenta diferentes tipos de transporte: unimodal y multimodal, dependiendo de la ubicación de la planta. En la región existen las posibilidades de transporte férreo, terrestre y fluvial. El transporte terrestre es el único de estos 3 que entra en la categoría de unimodal puesto que los transportes férreo y fluvial necesitan de acople con el transporte terrestre.

3.6. Posibles Rutas de Minas a Planta

Como se mencionó previamente, los modos de transporte que actualmente se encuentran disponibles para realizar el transporte de las llantas trituradas a la planta son el férreo, terrestre y fluvial. A continuación, se procede a representar las

múltiples conexiones entre las distintas minas y las posibles ubicaciones de las plantas.

3.6.1. Férreo

Para la determinación de las rutas férreas a usar en la red de logística inversa de llantas OTR se establece que las únicas minas que harán uso de este modo de transporte son las minas P y D, pues son las que se encuentran con mayor cercanía a una estación de la ruta férrea FENOCO (Ferrocarriles del Norte de Colombia). La estación seleccionada para hacer el traspaso de las llantas trituradas es la de El Paso, Cesar. La carga debe salir de las minas en medio carretero hasta llegar a El Paso, una vez en este lugar, el tren transportará la carga hasta la estación férrea de Ciénaga. Dependiendo de la ubicación de la planta las llantas trituradas serán dirigidas a Barranquilla o Santa Marta, es decir que la llegada de llantas trituradas no será posible por medio férreo a la planta si esta se encuentra ubicada en El Paso, Cesar o en la Mina G. El mapa de la ruta férrea FENOCO y sus estaciones se presentan en la Figura 3-6.

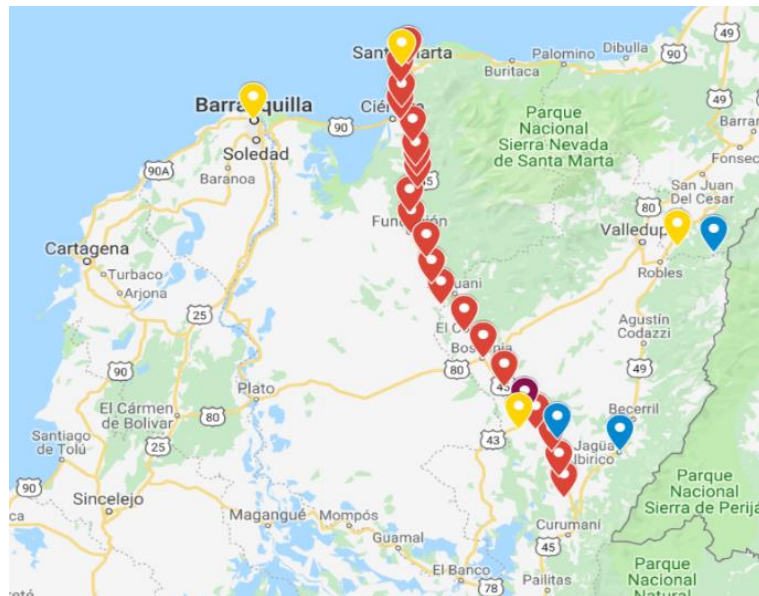


Figura 3-6. Ruta férrea FENOCO

En la Figura 3-7 se observa lo que serían las posibles rutas férreas desde las minas P y D a las posibles plantas ubicadas en Barranquilla y Santa Marta. Aquí se observa que hace falta conectar el transporte férreo con el carretero, ya que la ruta FENOCO no llega directamente a Barranquilla o a las minas en mención.

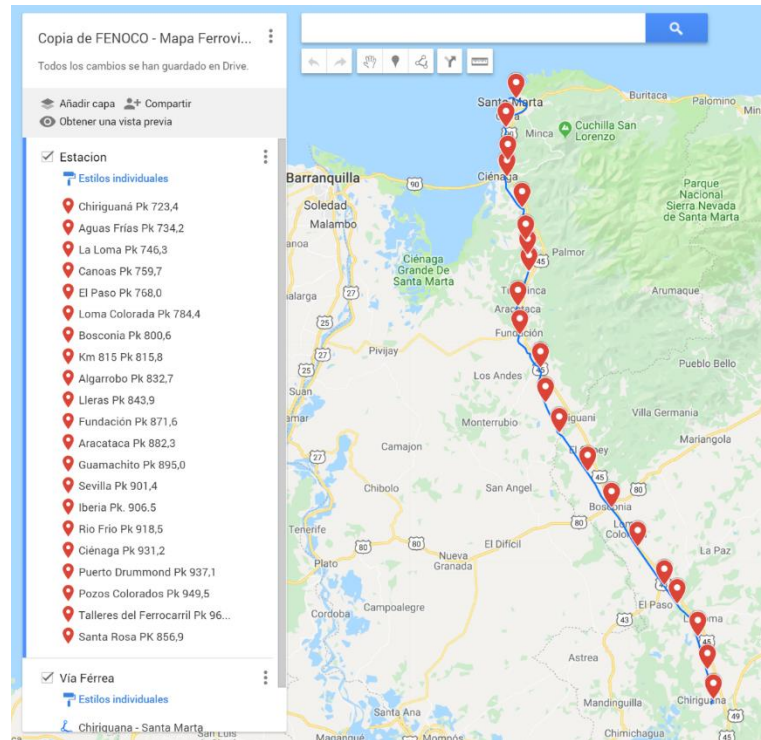


Figura 3-7. Rutas férreas desde las Minas P y D hasta las posibles plantas ubicadas en Barranquilla y Santa Marta.

3.6.2. Terrestre

Para la determinación de rutas posibles de transporte de llantas trituradas desde las minas hasta las posibles ubicaciones de planta se consideraron el uso de las troncales principales y secundarias de Colombia. Las posibles rutas junto con sus tiempos de viaje esperados en condiciones de tráfico normal se presentan de la Tabla 3-2 a la Tabla 3-5.

Tabla 3-2. Rutas desde las minas hasta la posible planta ubicada en la Mina G

<p style="text-align: center;">Mina C - Mina G</p> <p>La ruta más corta desde la mina C hasta la Mina G es la que utiliza el trayecto Sincelejo – Valledupar para luego llegar a la mina G.</p>	
<p style="text-align: center;">Mina P - Mina G</p> <p>La ruta más corta desde la mina P hasta la Mina G es la que utiliza el trayecto Becerril – San Juan del Cesar para llegar finalmente a la mina G.</p>	
<p style="text-align: center;">Mina D - Mina G</p> <p>La ruta más corta desde la mina D hasta la Mina G es la que utiliza el trayecto Bosconia – Valledupar para finalmente llegar a la mina G.</p>	

Tabla 3-3. Rutas desde las minas hasta la posible planta ubicada en El Paso, Cesar

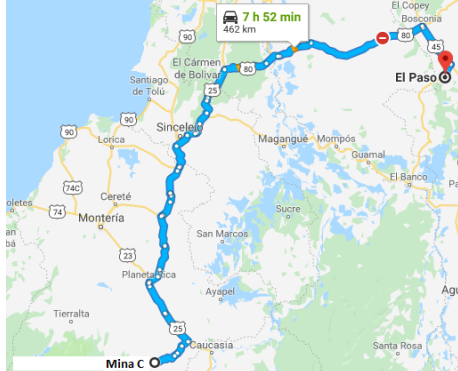
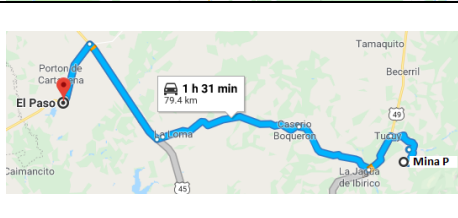
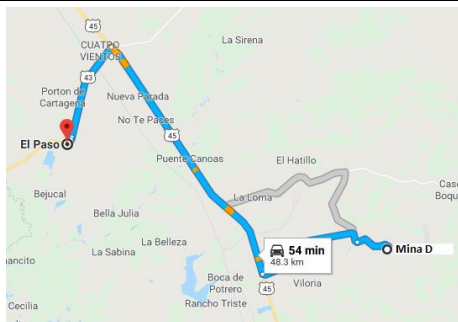
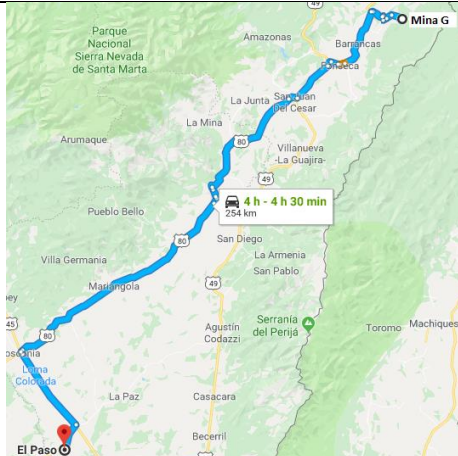
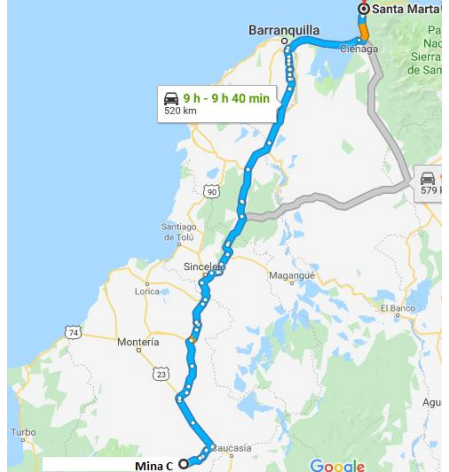
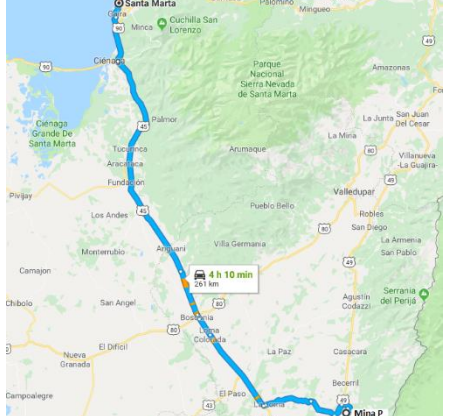
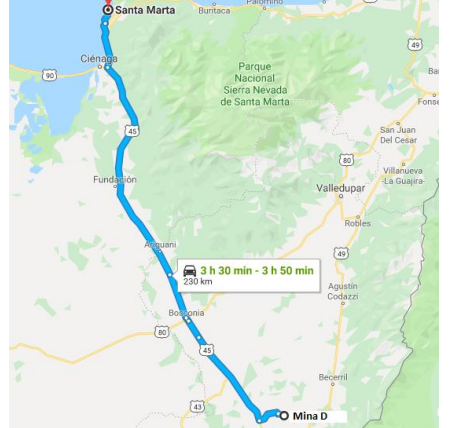
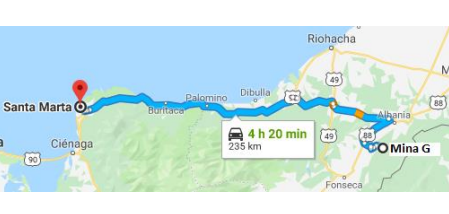
<p>Mina C – El Paso, Cesar</p> <p>La ruta más corta desde la mina C hasta El Paso, Cesar es pasando el trayecto Planeta Rica – Sincelajo – Bosconia y finalmente llegar al municipio de El Paso.</p>	
<p>Mina P – El Paso, Cesar</p> <p>La ruta más corta desde la mina P es usando el trayecto La Jagüa de Ibirico – La Loma y finalmente llegar al municipio de El Paso.</p>	
<p>Mina D – El Paso, Cesar</p> <p>La ruta más corta desde la mina D hasta El Paso, Cesar es usando la Ruta Nacional 45 en el tramo Curumaní – Bosconia y hacer un desvío en Cuatro Vientos para finalmente llegar al municipio de El Paso.</p>	
<p>Mina G – El Paso, Cesar</p> <p>La ruta más corta desde la mina hasta El Paso, Cesar G es la que utiliza el trayecto Barrancas – Valledupar – Bosconia de la Ruta Nacional 80 para finalmente llegar al municipio de El Paso.</p>	

Tabla 3-4. Rutas desde las minas hasta la posible planta ubicada en Barranquilla

<p style="text-align: center;">Mina C – Barranquilla</p> <p>La ruta más corta desde la mina C hasta Barranquilla corresponde al trayecto desde Montelíbano, Córdoba hasta la Ruta Nacional 25 (Troncal de Occidente) y continuar por la misma hasta su finalización en Barranquilla.</p>	
<p style="text-align: center;">Mina P – Barranquilla</p> <p>La ruta más corta desde la mina P hasta Barranquilla corresponde a utilizar el trayecto La Loma – Bosconia – Fundación – Ciénaga y finalmente llegar a Barranquilla.</p>	
<p style="text-align: center;">Mina D – Barranquilla</p> <p>La ruta más corta desde la mina D hasta Barranquilla corresponde al trayecto de la Ruta Nacional 45 pasando por Bosconia hasta Ciénaga y finalmente llegar a Barranquilla.</p>	
<p style="text-align: center;">Mina G – Barranquilla</p> <p>La ruta más corta desde la mina G hasta Barranquilla corresponde al trayecto Barrancas – Albania y luego utilizar la Ruta Nacional 90 para llegar a Barranquilla.</p>	

Tabla 3-5. Rutas desde las minas hasta la posible planta ubicada en Santa Marta

<p style="text-align: center;">Mina C – Santa Marta</p> <p>La ruta más corta desde la mina C hasta Santa Marta corresponde al trayecto desde Montelíbano, Córdoba hasta la Ruta Nacional 25 (Troncal de Occidente) y continuar por la misma hasta Barranquilla y luego la Ruta Nacional 90 para llegar hasta Santa Marta.</p>	
<p style="text-align: center;">Mina P – Santa Marta</p> <p>La ruta más corta desde la mina P hasta Santa Marta corresponde a utilizar la Ruta Nacional 45 en el trayecto La Loma – Bosconia – Fundación – Ciénaga y desviar hacia Santa Marta en la RN 90.</p>	
<p style="text-align: center;">Mina D – Santa Marta</p> <p>La ruta más corta desde la mina D hasta Santa Marta corresponde a utilizar la Ruta Nacional 45 desde La Loma hasta Ciénaga y desviar hacia Santa Marta en la RN 90.</p>	
<p style="text-align: center;">Mina G – Santa Marta</p> <p>La ruta más corta desde la mina G hasta Santa Marta corresponde al trayecto Albania – Puente Bomba y luego la RN 90 hasta a Santa Marta.</p>	

3.6.3. Fluvial

Para la determinación de las rutas fluviales de transporte de llantas trituradas se encontró la necesidad de establecer rutas de transporte multimodal, pues a excepción de Barranquilla, ninguna de las posibles ubicaciones de las plantas generadoras de energía puede recibir directamente por río, tal como se muestra en la Figura 3-8. Además, ninguna de las minas tiene conexión fluvial directa, así que el transporte fluvial siempre deberá usarse en combinación con el transporte terrestre.

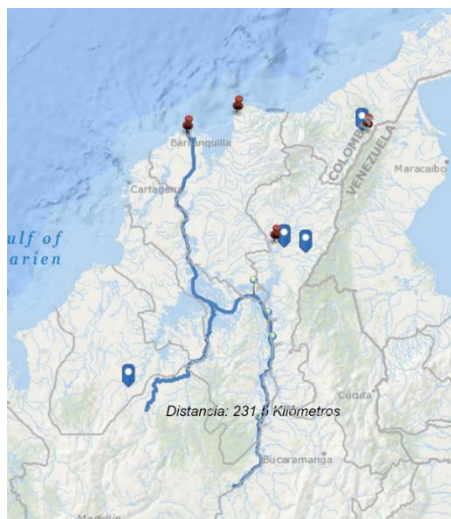


Figura 3-8. Rutas fluviales con ubicaciones de las minas y plantas generadoras.

Una vez se tienen claras las posibles rutas para transportar de cada mina hasta cada ubicación posible de la planta generadora de energía, se da por cumplido el objetivo de determinar los nodos y arcos de la red de logística inversa de las llantas residuales para las principales minas de cielo abierto de la Región Caribe colombiana. Por lo tanto, se procede a diseñar el modelo matemático de la red de logística inversa.

3.7. Diseño del Modelo Matemático de la Red de Logística Inversa de Llantas Residuales

Para el diseño del modelo matemático, se consideraron los nodos y arcos de la red de logística inversa de llantas residuales desarrollada en las secciones anteriores.

Continuando con los trabajos realizados por Barraza et al. (2016) y Llaín et al. (2017), el modelo propuesto es un modelo de programación lineal entera mixta, que toma como base la formulación clásica de un modelo p-mediana (Hakimi, 1964) para elección discreta de la localización de una planta generadora de energía. A diferencia de los trabajos mencionados, en esta red se incluyen todas las minas como nodos de trituración a donde las máquinas trituradoras deben ir, y no sólo como un proveedor de llanta triturada. Para mostrar en detalle el diseño de dicho modelo, se presentará por secciones cada uno de sus componentes.

3.7.1. Supuestos del Modelo

Considerando el alcance de la investigación, resulta necesario declarar algunos supuestos para la formulación del modelo matemático. Estos son:

1. Solo se abrirá una planta generadora de energía, y una vez abierta, seguirá funcionando hasta el final del horizonte de tiempo del modelo. El resto de las minas abastecerá a la planta generadora con sus llantas.
2. La planta generadora cubrirá el costo de la trituración.
3. Todo lo que se envía a la planta de generación de energía se procesa.
4. Las unidades disponibles de llantas que se enviarán de cada mina a la planta generadora en cualquier momento son el resultado del inventario inicial actual de las minas más la tasa de generación de desechos menos la tasa neta de eliminación de llantas durante el horizonte de tiempo del modelo.
5. El horizonte temporal considerado para el modelo es de veinte años, con semestres como unidades de tiempo.
6. Solo hay un (1) conjunto de máquinas trituradoras disponibles y se puede asignar solo a una mina en cualquier período de tiempo t con un costo operativo fijo FA_h . Además, en $t = 1$, todos los sitios incurrirán en un costo de configuración inicial de FA_h para adaptar el conjunto de recursos de trituración.
7. El transporte de llantas se realiza en contenedores llenos.

8. Las minas asumirán el costo de trasladar neumáticos enteros a la ubicación de las máquinas trituradoras.
9. El costo de adquirir llantas enteras de las minas es cero.
10. Siempre se cuenta con un inventario inicial amplio, y en cualquier caso, suficiente para cumplir la demanda mínima de la planta generadora.

3.7.2. Subíndices

Los subíndices del modelo están relacionados con los nodos y arcos de la red, así como la disponibilidad en el tiempo del conjunto de máquinas trituradoras. En la Tabla 3-6 se listan todos los subíndices utilizados en el modelo propuesto junto con los valores posibles para cada uno de estos.

Tabla 3-6. Subíndices del modelo con posibles valores

Subíndice	Valores posibles
$i =$ Conjunto de minas	$i = 1, 2, \dots, I$
$j =$ Planta generadora de energía	$j = 1, 2, \dots, J$
$m =$ Modo de transporte usado para el envío de llantas	$m = 1, 2, \dots, M$
$t =$ Periodo de tiempo (semestres)	$t = 1, 2, \dots, T$
$h =$ Indica la ubicación del conjunto de máquinas trituradoras	$h = 1, 2, \dots, H$

3.7.3. Parámetros

Los parámetros del modelo con los costos y capacidades relacionados con la recolección y transporte de las llantas trituradas, así como los costos de apertura, costos fijos y variables de operación de la planta, niveles de inventario inicial en las minas y los valores de la demanda con la que trabaja la planta generadora de energía.

Tabla 3-7. Parámetros del modelo con descripciones

Parámetro	Descripción
C_{ijmt}	Costo de recolección y transporte de llantas desde la mina i hasta la planta j en el periodo de tiempo t por el modo de transporte m
Tt_{im}^+	Capacidad máxima de carga del modo de transporte m desde la mina i

Parámetro	Descripción
$I(0)_i$	Inventario inicial de llantas residuales de la mina i al comienzo del modelo
T_{it}	Tasa de desecho de llantas de la mina i (en toneladas / semestre)
CS_{iht}	Costo de transporte del recurso de trituradoras desde la mina i a la mina h en el periodo t
FA_h	Costo fijo de operar el recurso de trituradoras en la mina h
S_h	Capacidad del recurso de trituradoras en la mina h
PS_{jt}	Costo de apertura de la planta generadora j en el periodo t
FO_{jt}	Costos fijos de operación de la planta generadora j en el periodo t
VO_{jt}	Costos variables de operación de la planta generadora j en el periodo t
D_{jt}^-	Límite inferior de demanda de la planta generadora j en el periodo t
D_{jt}^+	Límite superior de demanda de la planta generadora j en el periodo t
MR_t	Porcentaje de reducción de inventario mínimo requerido por ley en el tiempo t
R	Periodo de tiempo a partir del cual entra en vigencia la reducción de inventario exigida por las leyes vigentes.

3.7.4. Variables

En la Tabla 3-8 se listan las variables de decisión y variables auxiliares del modelo. Los resultados obtenidos de la solución matemática para estas variables, servirán como pautas para el tomador de decisiones.

Tabla 3-8. Variables de decisión y auxiliares para el modelo con descripciones

Variable	Descripción
X_{ijmt}	Toneladas de llanta triturada a enviar desde la i a la planta j por el modo of transporte m en el periodo t
Y_{ht}	1 si el conjunto de trituradoras está disponible en la mina h en el periodo t y 0 en caso contrario. Estas pueden estar disponibles y no disponibles en cualquier periodo de tiempo t
Z_{jt}	Variable binaria que toma el valor de 1 si la planta generadora j está abierta en el periodo t y 0 en caso contrario.
I_{it}	Inventario de la mina i en el periodo t (en toneladas de llanta)
TS_{ht}	Costo total del conjunto de trituradoras disponible en la mina h en el periodo t

3.7.5. Función Objetivo

La función objetivo minimiza el costo logístico total de lo que fue definido en el alcance. Esto incluye los costos de trasladar el conjunto de máquinas trituradoras

entre las minas, que dependen del cronograma de disponibilidad del recurso móvil, los costos de apertura de la planta generadora, así los costos fijos y variables de operación de la misma.

Costo total = Costo total de las trituradoras + Costo de apertura de la planta + Costo fijo de operación de la planta + Costo variable de operación de la planta + Costo de transporte de llantas trituradas

$$CT = \sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T TS_{ht} + \sum_{j=1}^J PS_{j1} * Z_{j1} + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T FO_{jt} * Z_{jt} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T VO_{jt} * X_{ijmt} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T C_{ijmt} * \frac{X_{ijmt}}{Tt_{im}^+}$$

Estos costos dependerán en gran medida de la ubicación de la planta y la cantidad de toneladas de llantas procesadas, los costos de recolección y transporte de las llantas a la planta generadora por los posibles modos de transporte, así como los costos de transporte para mover el conjunto de recursos de trituración entre las minas.

3.7.6. Restricciones

Las cantidades de toneladas de llanta triturada y enviadas desde las minas están sujetas a restricciones relacionadas con la demanda de la planta, la capacidad de las máquinas trituradoras y la disponibilidad de las mismas. De la misma forma, la apertura de la planta debe cumplir con los supuestos del modelo; los inventarios deben corresponder al flujo de materiales dentro de las minas y deben cumplir los límites expuestos en los requerimientos legales. Además, hay minas que no están conectadas por algunos modos de transporte con algunas de las plantas, por lo que ciertos arcos de la red no están permitidos. Todas estas restricciones se encuentran listadas y explicadas en detalle dentro de la Tabla 3-9.

Tabla 3-9. Restricciones del modelo

No.	Restricción	Descripción
1	$\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M X_{ijmt} \geq D_{jt}^- * Z_{jt} \quad \forall j, t$	La cantidad de llanta triturada, recolectada y enviada en un periodo t desde todas las minas a la planta generadora debe ser al menos el límite inferior de la demanda de la planta.
2	$\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M X_{ijmt} \leq D_{jt}^+ * Z_{jt} \quad \forall j, t$	La cantidad de llanta triturada recolectada y enviada en un periodo t desde todas las minas a la planta generadora debe ser a lo sumo el límite superior de la demanda de la planta.
3	$\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J X_{ijmt} \leq S_h * Y_{ht} \quad \forall h, t; i = h$	La cantidad de llanta triturada enviada desde la mina i no puede exceder la capacidad de la máquina trituradora h ubicada en dicha mina en el periodo t .
4	$\sum_{h=1}^H Y_{ht} = 1 \quad \forall t$	Sólo hay 1 conjunto de máquinas trituradoras y este debe ser asignado sólo a una mina en cada periodo t .
5.1	$\sum_{j=1}^J Z_{j1} = 1$	Sólo se debe abrir una planta generadora de energía y esto debe ocurrir en el primer periodo de tiempo.
5.2	$Z_{jt} = Z_{j1} \quad \forall j, t > 1$	Indica que una vez abierta una planta generadora, esta permanecerá abierta hasta el final del tiempo estipulado en el modelo.
6	$I_{it} = I_{i,t-1} - \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M X_{ijmt} + T_{it} \quad \forall i, t$	Calcula el inventario final de toneladas de llantas en la mina i en un periodo t , teniendo en cuenta el inventario final del periodo anterior y el flujo de llantas del periodo actual.
7	$I_{i0} = I(0)_i \quad \forall i$	Inicializa la variable de inventario de la mina i en el periodo 0.
8	$I_{it} \leq (1 - MR_t) * I(0)_i \quad \forall i, t \geq R$	El inventario de la mina i en cada periodo t debe cumplir con las metas de recolección y recuperación de llantas establecidas en las leyes vigentes.
9.1	Cuando $t = 1$: $TS_{h1} = \sum_{h=1}^H FA_h \quad \forall h$	Indica el costo fijo de adaptar las máquinas trituradoras, que incluye la infraestructura y los servicios públicos del espacio donde las máquinas prestarán servicios a la operación en la mina h en el período $t = 1$.
9.2	Cuando $t > 1$: $TS_{ht} = FA_h * Y_{ht} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq h}}^I Y_{i,t-1} * CS_{iht} \quad \forall h$	Calcula el costo de operar el conjunto de máquinas trituradoras en h durante un período de tiempo $t > 1$, teniendo en cuenta el costo fijo de operación de la trituradora en el período actual y los costos de transporte de la maquinaria

No.	Restricción	Descripción
		desde la mina que la tenga disponible en el periodo anterior hasta la mina actual.
11	$Z_{jt} \in \{0,1\} \forall j, t$	Indica la naturaleza binaria de la apertura de las plantas generadoras.
12	$Y_{ht} \in \{0,1\} \forall j, t$	Indica la naturaleza binaria de la disponibilidad del conjunto de máquinas trituradoras.
13	$X_{ijmt} \geq 0 \forall i, j, t, m$	Indica que la cantidad de toneladas de llantas trituradas enviadas desde las minas es real y no negativa.
14	$I_{it} \geq 0 \forall i, t$	Indica que el nivel de inventario de llantas de las minas es real y no negativo.

3.8. Conclusiones de la Modelación y el Desarrollo del Problema

Luego de haber completado la caracterización del proceso de recuperación de llantas OTR de la industria minera y el diseño de su red de logística inversa, se hizo el diseño del modelo matemático de manera genérica, de tal forma que pueda ser extensible y aplicable a cualquier red de minas y plantas de generación de energía que requieran usar un recurso móvil de trituradoras. En el siguiente capítulo, se realizará la optimización de este modelo matemático, usando los parámetros de entrada correspondientes a un caso de estudio.

4. Aplicación y Resultados del Modelo

En el capítulo anterior se introdujo el diseño de la red de red de logística inversa de llantas residuales para el sector minero, utilizando una alternativa de disposición final hasta la re-conversión a energía eléctrica que considera disposiciones legales vigentes a las operaciones mineras. En el presente capítulo se aplicará la optimización del modelo matemático al caso de estudio de las 4 principales minas de cielo abierto de la Región Caribe colombiana, con el fin de obtener un cronograma de trabajo que indique la disponibilidad de las máquinas trituradoras durante el tiempo de ejecución del modelo y las cantidades óptimas a triturar en cada mina para abastecer la planta de energía, de la cual se desea también saber su ubicación. Se explorarán las alternativas de minimización de costo y de maximización de utilidades secuenciadas con el propósito de proponer condiciones de operación adecuadas a los recursos limitados, pero con miras a explotar las oportunidades del mercado potencial.

4.1. Caso de Estudio

La optimización del modelo matemático se aplicará en un caso de estudio que consiste en las 4 principales minas de cielo abierto de la Región Caribe colombiana. Para esto, se detallarán a continuación los parámetros de entrada del modelo correspondiente al caso en mención, de tal forma que se tenga una idea clara de los costos de cada arco de la red, de las capacidades de transporte y de los demás elementos que limitan la operación modelada, que inicialmente buscará minimizar el costo total asociado a disponer adecuadamente las llantas.

4.1.1. Subíndices del Modelo

Los subíndices del modelo para el caso de estudio se listan en la Tabla 4-1. Allí se refleja que en el caso aplicado se utilizarán 4 minas, 4 posibles ubicaciones de planta de energía, 3 modos de transporte y un horizonte de tiempo de la modelación de 20 años, con ventanas de observación medidas en semestre.

Tabla 4-1. Subíndices del modelo para el caso de estudio

Subíndice	Valores posibles	Descripción
$i =$ Conjunto de minas	$i = 1,2,3,4$	1 – Mina C, 2 – Mina P, 3 – Mina D, 4 – Mina G
$j =$ Planta generadora de energía	$j = 1,2,3,4$	1 – Mina G, 2 – El Paso, 3 – Barranquilla, 4 – Santa Marta
$m =$ Modo de transporte usado para el envío de llantas	$m = 1,2,3$	1 – Férreo, 2 – Terrestre, 3 – Fluvial
$t =$ Periodo de tiempo (semestres)	$t = 1,2,3, \dots, 40$	El horizonte del modelo es 20 años, equivalente a 40 semestres.
$h =$ Indica la ubicación del conjunto de máquinas trituradoras	$h = 1,2,3,4$	1 – Mina C, 2 – Mina P, 3 – Mina D, 4 – Mina G

4.1.2. Costos de Transporte de Llantas Trituradas

Luego de haber especificado los subíndices del modelo, se proceden a mostrar los costos de recolección y transporte de llantas trituradas desde cada una de las minas hasta las cuatro posibles ubicaciones de la planta generadora de energía por cada uno de los modos de transporte. Dichos costos se presentan de la Tabla 4-2 a la Tabla 4-4. Para calcular los costos de transporte terrestre se utilizó la plataforma SICE-TAC y están determinados por cada viaje que se vaya a realizar desde cada mina hasta el posible lugar de la planta generadora de energía. Los costos fluviales se calcularon con base a los hallazgos de Márquez Díaz (2011), el cuál determinó el costo de transporte por \$/toneladas/kilómetros. Por lo tanto, se calcularon en base a los kilómetros recorridos y asumiendo la capacidad de carga de 32 toneladas. Cabe resaltar debido a la baja conectividad del sistema fluvial en Colombia, es necesario realizar transportes intermodales con el transporte terrestre para poder completar los envíos hasta su destino final.

Tabla 4-2. Costos de transporte de llantas trituradas en el modo férreo, C_{ijt1}

COSTO DE TRANSPORTE FERREO		HASTA			
		Mina G	El Paso	Barranquilla	Sta. Marta
DESDE	Mina C	\$ -	\$ -	\$ 4.909.734	\$ 4.602.599
	Mina P	\$ 2.463.566	\$ -	\$ 2.743.976	\$ 2.436.841
	Mina D	\$ 2.766.774	\$ -	\$ 2.761.588	\$ 2.454.453
	Mina G	\$ -	\$ -	\$ 3.035.806	\$ 2.468.788

Tabla 4-3. Costos de transporte de llantas trituradas en el modo terrestre, C_{ijt2}

COSTO DE TRANSPORTE TERRESTRE		HASTA			
		Mina G	El Paso	Barranquilla	Sta. Marta
DESDE	Mina C	\$ 4.068.357	\$ 2.569.258	\$ 2.000.778	\$ 2.566.329
	Mina P	\$ 2.569.258	\$ 394.984	\$ 1.785.495	\$ 1.561.517
	Mina D	\$ 2.569.258	\$ 394.984	\$ 1.785.495	\$ 1.561.517
	Mina G	\$ -	\$ 1.118.162	\$ 1.626.135	\$ 1.275.631

Tabla 4-4. Costos de transporte de llantas trituradas en el modo fluvial, C_{ijt3}

COSTO DE TRANSPORTE FLUVIAL		HASTA			
		Mina G	El Paso	Barranquilla	Sta. Marta
DESDE	Mina C	\$ -	\$ -	\$ 1.673.764	\$ 1.899.094
	Mina P	\$ -	\$ -	\$ 699.480	\$ 924.810
	Mina D	\$ -	\$ -	\$ 678.020	\$ 903.350
	Mina G	\$ -	\$ -	\$ 853.760	\$ 1.079.090

4.1.3. Capacidad Máxima de Transporte de Llantas Trituradas

El segundo parámetro considerado es la capacidad máxima de llantas trituradas que se puede transportar por viaje en cada modo de transporte. Los escenarios que en la Tabla 4-5 aparecen con valores de 1, en realidad son cero pero toman este valor por artificio. Esto se debe a que este parámetro se encuentra en un denominador en la función objetivo y se generaría error matemático al hacer la división entre cero. Sin embargo, el valor de 1 hará que la cantidad de viajes se eleve tanto que el modelo descartará esta opción por ser poco atractiva para la función objetivo.

Tabla 4-5. Capacidad máxima de transporte de llantas trituradas, Tt_{im}^+

CAPACIDAD MÁXIMA (TON)		Modo de Transporte		
		Férreo	Terrestre	Fluvial
Mina	Mina C	1	35	1
	Mina P	66	35	29
	Mina D	66	35	29
	Mina G	66	35	29

4.1.4. Inventario Inicial y Tasas de Desecho de Llantas de las Minas

Los niveles de inventario inicial de llantas residuales en la Tabla 4-6 y las tasas de desecho de llantas de la Tabla 4-7 fueron adaptados de los valores estimados por Barraza et al. (2016) pero añadiéndoles lo que se estima como generado en los últimos 6 semestres en las minas.

Tabla 4-6. Inventario inicial de las minas, $I(0)_i$

INVENTARIO INICIAL	LLANTAS	TONELADAS
Mina C	2.775	8.324
Mina P	51.779	155.336
Mina D	19.652	58.956
Mina G	32.112	96.336

Tabla 4-7. Tasa semestral de desecho de llantas de las minas, T_{it}

TASA DE DESECHO (TON/SEMESTRE)	
Mina C	104
Mina P	2.254
Mina D	737
Mina G	1.812

4.1.5. Costos de Transportar las Trituradoras entre Minas

Para la determinación de los costos mostrados en la Tabla 4-8, se utilizaron los parámetros establecidos por Llaín et al. (2017) pero además se agregaron los costos de transporte desde la mina G hacia las otras minas, ya que éstos no estaban contemplados en su investigación. Se utilizó de igual manera la plataforma SICE-TAC para calcular los costos de transporte.

Tabla 4-8. Costos de transportar las trituradoras entre minas, CS_{iht}

COSTO DE TRANSPORTE DE TRITURADORAS		HASTA			
		Mina C	Mina P	Mina D	Mina G
DESDE	Mina C	\$ -	\$ 1.935.116	\$ 1.947.013	\$ 2.286.262
	Mina P	\$ 1.935.116	\$ -	\$ 59.481	\$ 1.360.143
	Mina D	\$ 1.947.013	\$ 59.481	\$ -	\$ 1.360.143
	Mina G	\$ 2.286.262	\$ 1.360.143	\$ 1.360.143	\$ -

4.1.6. Costo Fijo de Operar el Recurso de Trituradoras

Los valores relacionados en la Tabla 4-9 corresponden a los costos fijos que se incurren por parte de las minas para poder operar el recurso de máquinas trituradoras durante un semestre. Esto incluye la adecuación del espacio que se incurre en el primer periodo (ver supuesto 6), costos de servicios públicos, costos de combustible usado por las máquinas, salarios de operarios y mantenimientos preventivos.

Tabla 4-9. Costo fijo de operar el recurso de trituradoras, FA_h

COSTO FIJO DE OPERAR TRITURADORAS	
Mina C	\$ 80.000.000
Mina P	\$ 80.000.000
Mina D	\$ 80.000.000
Mina G	\$ 80.000.000

4.1.7. Costos de Apertura de Planta

Para la estimación de los costos de apertura mostrados en la Tabla 4-10, se consideraron los estudios previos de Arias, Rivas, & Vega (2014) quienes presentan

un valor de \$4.095.564.000 y Barraza et al. (2016) quienes encuentran un valor de \$4.777.447.484. Los costos encontrados en estas dos publicaciones son casi equivalentes, considerando una inflación promedio de 7% anual. Por lo tanto, proyectando el valor para 2018, el costo sería de \$5.077.179.352. Además, los terrenos donde se podrían abrir estas plantas están en zonas remotas donde el valor de la tierra se considera sin variantes mayores para todas las posibles ubicaciones.

Tabla 4-10. Costos de apertura de planta, PS_{jt}

COSTO DE APERTURA DE PLANTA GENERADORA	
Mina G	\$ 5.077.179.352
El Paso	\$ 5.077.179.352
Barranquilla	\$ 5.077.179.352
Sta. Marta	\$ 5.077.179.352

4.1.8. Costos de Operación de la Planta

A continuación, en la Tabla 4-11 se muestran los costos de la planta correspondientes a su operación, donde se puede observar un componente fijo y otro que es variable por cada tonelada de llanta triturada que se procese en la planta. Estos costos son tomados de Barraza et al. (2016), quienes a su vez se basaron en Bueno López, Rodríguez Sarmiento, & Sánchez Rodríguez (2016).

Tabla 4-11. Costos de operación de la planta, FO_{jt} y VO_{jt}

COSTOS DE OPERACIÓN DE PLANTA		
PLANTA	FIJOS	VARIABLES
Mina C	\$ 300.000.000	\$ 2.000
El Paso	\$ 300.000.000	\$ 2.000
Barranquilla	\$ 300.000.000	\$ 2.000
Sta. Marta	\$ 300.000.000	\$ 2.000

4.1.9. Límites de Demanda de la Planta

En la Tabla 4-12 se encuentran los límites de la demanda de la planta generadora, los cuales serán los mismos independiente de la ubicación escogida. Estos valores

corresponden a los valores que permiten que la planta pueda operar y fueron explicados en el inicio de este capítulo.

Tabla 4-12. Límites de demanda de la planta generadora de energía, D_{jt}^- y D_{jt}^+

DEMANDA	LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
Mina C	5.000	14.000
El Paso	5.000	14.000
Barranquilla	5.000	14.000
Sta. Marta	5.000	14.000

4.1.10. Metas de Recolección de Llantas Exigidas Legalmente

El contexto legal que aplica a las operaciones mineras que hacen parte del caso de estudio es el de las resoluciones 1457 de 2010 y 1327 de 2017. Estos exigen que cada mina debe realizar una disposición adecuada de las llantas que generan cada año y deben rendir cuenta a un sistema de recolección que se generará en el marco de la implementación de las mismas. Sin embargo, los porcentajes que en estas resoluciones se enuncian terminan siendo poco claros sobre si aplican solamente para las llantas generadas en cada año y no a los inventarios que ya traen las minas tras años de operación. Por lo tanto, en este proyecto, se adaptan los requerimientos legales y se generaron unas metas reducción de inventario más estrictas para hacer que la red de logística inversa sea viable. Esto con el fin de que las minas puedan tener alguien que esté dispuesto a prestarles el servicio y así puedan terminar evitando las multas que se generan por culpa de incumplimientos legales. Los porcentajes de reducción de inventario se muestran en la Tabla 4-13 y por tener las características previamente mencionadas, comienzan a aplicar a partir del semestre $R = 10$.

Tabla 4-13. Porcentajes de reducción de inventario mínimo requerido por ley, MR_t

Semestres	Meta de reducción (%)
10 a 19	20%
20 a 29	40%
30 a 39	60%

40	80%
----	-----

Luego de haber completado la contextualización del caso de estudio, mostrando sus respectivos parámetros de entrada al modelo, se debe escoger una estrategia de solución para la optimización.

4.2. Estrategia de Solución

Para determinar la estrategia de solución que permita encontrar los valores óptimos para el modelo matemático aplicado al caso de estudio, se realizó una búsqueda relacionada con la solución de modelos determinísticos de transporte que consideren aperturas de plantas, recursos móviles y que hayan sido aplicados a redes de logística inversa. La búsqueda se enfocó en bases de datos ISI o SCOPUS, con el fin de tener investigaciones de alto impacto que hayan logrado solucionar problemas similares al de este proyecto, pero no se limitó al uso de las mismas.

Pishvae et al. (2010) realizaron el diseño de una red de logística inversa cuya modelación fue realizada a través de un modelo MILP similar al de esta investigación. La complejidad NP-Hard del diseño de redes logísticas ha sido probada en investigaciones como la de Jayaraman, Patterson, & Rolland (2003) y precisamente, el modelo de Pishvae et al. (2010) consta de dos problemas, problema de ubicación de la instalación capacitada y optimización de flujo; por lo tanto, el modelo es reducible a un problema de ubicación de la instalación capacitada.

Teniendo en cuenta que el problema de ubicación de instalaciones capacitadas es de complejidad NP-Complete (Davis & Ray, 1969), el diseño de la red logística inversa discutido en Pishvae et al. (2010) es NP-Hard. Resolver un problema de gran tamaño mediante algoritmos exactos suele consumir mucho tiempo; por lo tanto, se han desarrollado muchas heurísticas y meta-heurísticas para obtener soluciones óptimas para este tipo de problemas. Sin embargo, en este proyecto, se evaluará la necesidad de implementar este tipo de métodos, iniciando la solución del modelo con

el algoritmo CPLEX de AMPL, considerando además que Llaín et al. (2017) encontraron una solución óptima en tiempos cortos (en el orden de minutos e inferior a una hora).

AMPL (*A Mathematical Programming Language*) es un lenguaje de programación matemática utilizado para desarrollar problemas que abarquen una gran complejidad de resolución, específicamente, a la construcción y resolución de modelos de optimización. Estos modelos pueden ser de programación lineal (LP), programación no lineal (NLP) y programación mixta entera (MIP). AMPL se caracteriza por utilizar notaciones matemáticas parecidas a las que se usan en la notación tradicional, facilitando su comprensión para los usuarios, así como también la formulación de modelos dentro de la aplicación. Por otro lado, CPLEX es la herramienta de solver que posee AMPL para resolver los problemas de optimización que el usuario digite. En estos casos, el usuario tiene la posibilidad de interrumpir el proceso de solución del solver CPLEX sin que este haya terminado de optimizar la solución, sin afectar el código escrito.

Velarde Cantú, Bueno Solano, Lagarda Leyva, & López Acosta (2017) desarrollaron un modelo de programación mixta entera, para minimizar los costos de transporte y las distancias recorridas por cada uno de los vehículos en los territorios y solucionaron el modelo en AMPL con el solver CPLEX. En sus resultados lograron optimizar el número de territorios que se necesitan, establecer el tamaño y el número de vehículos necesarios para satisfacer la demanda (dado que la flota de vehículos era restringida), así como también la secuencia de que deben realizar los vehículos (ya sea por entregas o recogidas de productos), disminuyendo significativamente los costos de transporte y mejorando el nivel del servicio con los clientes.

En la siguiente sección, se mostrarán los resultados obtenidos al solucionar la optimización del modelo matemático de la red de logística inversa de llantas residuales, con los parámetros de entrada detallados en la sección 4.1,

correspondientes al caso de estudio de las principales minas de cielo abierto de la Región Caribe de Colombia.

4.3. Resultados del Caso 1: Minimización de Costos

La optimización del modelo se realizó inicialmente con el objetivo de minimizar el costo total de la red y los resultados arrojados por el CPLEX de AMPL se detallan a en esta sección. Inicialmente se obtuvo que la planta generadora de energía debe abrirse en el primer periodo de tiempo en El Paso ($Z_{21} = 1$) y que permanecerá abierta durante los 40 semestres. Dicha elección de ubicación se relaciona con la proximidad de esta ubicación con las minas que tienen un inventario inicial de llantas más alto y mayores tasas de desperdicio (Mina D, Mina G y Mina P). Las trituradoras viajarán cada seis meses entre las minas para poder reducir las dimensiones de las llantas, lo que supone un semestre como el período mínimo de estadía para compensar los costos fijos de operar este recurso. La Tabla 4-14 muestra la programación completa de las trituradoras para el caso 1 durante los 40 períodos considerados en el horizonte de tiempo del modelo.

Tabla 4-14. Cronograma de asignación de las máquinas trituradoras – Caso 1

Semestre	Trituradora en Mina				Semestre	Trituradora en Mina				Semestre	Trituradora en Mina				Semestre	Trituradora en Mina			
	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4
$Y(h, t)$	1	2	3	4	$Y(h, t)$	1	2	3	4	$Y(h, t)$	1	2	3	4	$Y(h, t)$	1	2	3	4
1	0	1	0	0	11	0	1	0	0	21	0	0	0	1	31	0	1	0	0
2	0	0	0	1	12	0	0	1	0	22	0	0	1	0	32	0	1	0	0
3	0	1	0	0	13	0	0	0	1	23	0	0	0	1	33	0	0	0	1
4	0	1	0	0	14	0	0	1	0	24	0	1	0	0	34	0	1	0	0
5	0	0	0	1	15	0	1	0	0	25	1	0	0	0	35	0	1	0	0
6	0	0	1	0	16	0	0	0	1	26	0	0	0	1	36	0	1	0	0
7	0	0	0	1	17	0	1	0	0	27	0	1	0	0	37	0	0	1	0
8	0	1	0	0	18	0	0	0	1	28	0	1	0	0	38	0	1	0	0
9	1	0	0	0	19	0	1	0	0	29	0	1	0	0	39	0	1	0	0
10	0	0	1	0	20	0	1	0	0	30	0	1	0	0	40	0	0	0	1

De acuerdo con los resultados, un ejemplo de la programación para el grupo de trituradoras durante los primeros 9 semestres es la siguiente: durante el primer semestre, las máquinas trituradoras se ubicarán en la mina P. Más tarde, las máquinas se moverán por camión a la mina G para estar allí 1 semestre. Luego operarán en la mina P durante 2 semestres. El próximo semestre deben estar disponibles durante 1 semestre en la Mina G, en el tiempo $t = 5$. Después, las trituradoras se moverán a la Mina D, donde permanecerán durante 1 semestre y regresarán a la mina G por 1 semestre. Posteriormente deben estar los siguientes 2 semestres en la mina P y en la mina C respectivamente, completando los primeros 9 períodos y así sucesivamente.

En cuanto al modo de transporte de las llantas trituradas que se enviarán desde cada mina, los resultados muestran que el transporte terrestre es la forma más económica de realizar estos traslados. El punto de origen de las llantas trituradas está determinado por la ubicación de las máquinas trituradoras en un momento dado (que se muestra en la Tabla 4-14), y el destino dependerá de la ubicación de la planta de generación de energía, como se indicó anteriormente, asignado en El Paso. La cantidad de llantas trituradas dependerá de la cantidad más baja entre la cantidad de toneladas trituradas que se enviarán, la capacidad de transporte, la capacidad de las trituradoras, la capacidad de la planta generadora y el inventario final de llantas enteras en poder de las minas en el período anterior. La Tabla 4-15 muestra el origen y la cantidad de toneladas de llantas trituradas que deben ser enviadas a la planta utilizando el modo de transporte terrestre. En total se tiene que durante los 20 años se deben triturar y enviar a la planta 451.448 toneladas de llanta residual.

Tabla 4-15. Toneladas de llanta enviadas a la planta por transporte terrestre – Caso 1

Semestre	Toneladas de llanta triturada	Enviadas desde	Semestre	Toneladas de llanta triturada	Enviadas desde	Semestre	Toneladas de llanta triturada	Enviadas desde	Semestre	Toneladas de llanta triturada	Enviadas desde
1	11.607	Mina P	11	13.369	Mina P	21	14.000	Mina G	31	5.607	Mina P
2	13.011	Mina G	12	14.000	Mina D	22	14.000	Mina D	32	14.000	Mina P
3	14.000	Mina P	13	14.000	Mina G	23	14.000	Mina G	33	10.538	Mina G
4	14.000	Mina P	14	14.000	Mina D	24	14.000	Mina P	34	5.000	Mina P

5	14.000	Mina G	15	14.000	Mina P	25	5.000	Mina G	35	5.000	Mina P
6	14.000	Mina D	16	14.000	Mina G	26	14.000	Mina G	36	5.000	Mina P
7	14.000	Mina G	17	14.000	Mina P	27	5.000	Mina P	37	14.000	Mina D
8	14.000	Mina P	18	14.000	Mina G	28	8.845	Mina P	38	5.000	Mina P
9	5.826	Mina G	19	14.000	Mina P	29	5.000	Mina P	39	14.000	Mina P
10	6.645	Mina D	20	5.000	Mina P	30	14.000	Mina P	40	14.000	Mina G

El nivel de inventario en cada periodo de tiempo depende del inventario inicial de llantas residuales que tiene cada mina, la cantidad de llantas trituradas que salieron y las tasas de desecho de llantas generada en el periodo dado. También deben cumplir con las tasas de recolección aplicadas en la ley colombiana, mencionadas en la revisión de la literatura. A continuación, en la Figura 4-1, se muestran los niveles de inventario para cada mina en cada período, representado por las series continuas. Las líneas de puntos asociadas en esta figura representan los objetivos de reducción dinámica de inventario para que las minas cumplan con los requisitos legales establecidos en la restricción # 8. Como se muestra, hay una reducción efectiva del inventario durante el horizonte de tiempo modelado.

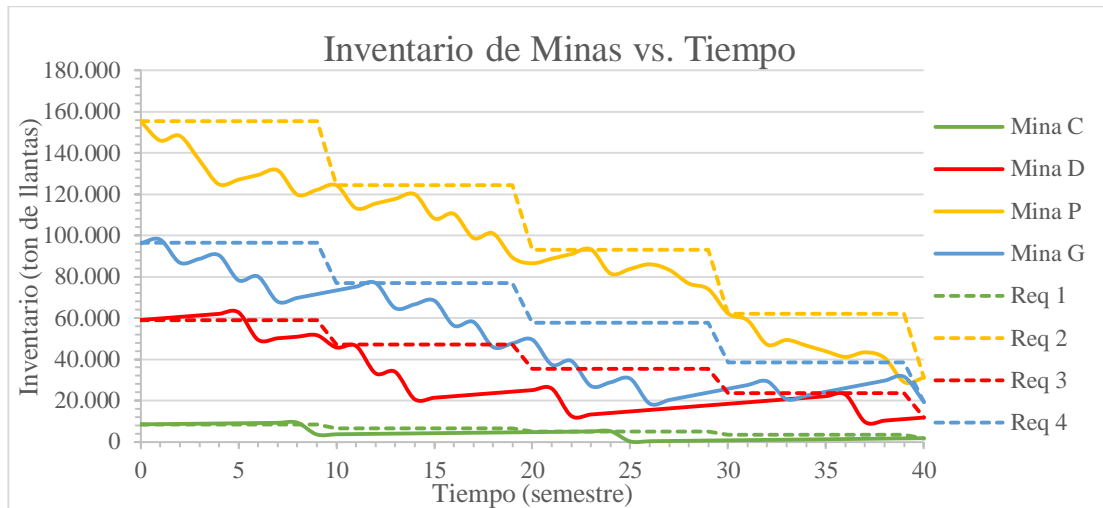


Figura 4-1. Cumplimiento de reducción de inventario en las minas – Caso 1

Finalmente, el valor mínimo para la función objetivo es \$ 30.430.356.000 y este es desglosado en la Tabla 4-16. La tabla muestra que el componente más alto del costo total es el costo fijo de la planta, seguido del costo de transporte y el costo de apertura

de la planta. El costo de operación de las trituradoras y el costo variable de la planta tienen la contribución más baja, lo que demuestra la complejidad del problema de las llantas OTR explicado anteriormente: para implementar una solución factible, se debe hacer una inversión de orden superior para cumplir con los costos fijos y costos de apertura de la planta. Por último, el costo de operación de la trituradora es relativamente alto pero inevitable, dada la ausencia de una alternativa de reconversión en sitio en las minas. Con este costo total, para las 451.448 toneladas de llanta residual trituradas, se tiene un costo unitario por tonelada de \$ 67.406.

Tabla 4-16. Desglose de los componentes de la función objetivo – Caso 1

Tipo de Costo	Valor	%
Costo de Trituradoras	\$ 3.593.050.000	11,8%
Costo de Apertura de Planta	\$ 5.077.180.000	16,7%
Costo Fijo de Planta	\$ 12.000.000.000	39,4%
Costo Variable de Planta	\$ 902.896.000	3,0%
Costo de Transporte	\$ 8.857.230.000	29,1%
Costo Total (Mínimo)	\$ 30.430.356.000	100%

4.4. Resultados del Caso 2: Maximización de Utilidades

A pesar de que los resultados del caso 1 en la sección 4.3 muestran una reducción significativa y, a priori, representan una solución atractiva, es preciso mencionar que en algunos periodos de tiempo las cantidades de llantas a triturar y enviar a la planta sugeridas por la optimización sub-utilizan la capacidad de las trituradoras que se encuentran en sitio. Esto es debido a que la lógica de la optimización hacia minimización de costo genera que el modelo intente cumplir con las metas de reducción de inventario al menor costo posible, es decir, triturando la menor cantidad de llantas que le permita cumplir con las restricciones. Inicialmente, se intentó solucionar esto añadiendo una restricción de capacidad mínima utilizada, pero para valores de capacidad mínima exigida mayores al 35% no se encontraba solución factible. Por lo tanto, la lógica de optimizar la red hacia un costo mínimo no hace sentido, debido a que, en la realidad, las llantas trituradas representan un ingreso para la posible empresa que se dedique a prestar el servicio a las operaciones mineras. Es

decir, que dicha empresa no buscaría un escenario de minimizar los costos de la red sino uno de maximizar utilidades. Sin embargo, actualmente no se tiene una información certera de los precios de este producto final que es la llanta triturada, por lo cual generar una optimización del modelo matemático representa un nuevo reto en la modelación. Para esto se procedió a hallar un costo por tonelada de llanta triturada en el caso 1 de minimización de costo, basado en el estimado por Barraza et al. (2016) y con una inflación de 7% anual, se calculó un ingreso para el año actual.

El ingreso por tonelada estimado por Barraza et al. (2016) fue \$ 194.921 y el ingreso calculado por tonelada de llanta triturada surtida para el año actual es \$ 223.166. Con este ingreso, los ingresos totales calculados para el caso 1 son de \$ 100.747.844.368, dejando una utilidad total de \$ 70.317.488.368. Posterior a esto, fue necesario volver a optimizar el modelo matemático, pero esta vez hacia maximización de utilidades. Los resultados de esta optimización muestran también que la ubicación de la planta generadora debe ser El Paso ($Z_{21} = 1$) y que esta permanecerá abierta. De igual forma se generó un cronograma de asignación para las máquinas trituradoras (ver Tabla 4-17), presentando pequeñas variaciones con respecto a la optimización del caso 1. La función objetivo en este caso 2 es la siguiente:

Utilidad total = Ingresos totales – Costo total = Ingresos por venta - Costo total de las trituradoras - Costo de apertura de la planta - Costo fijo de operación de la planta - Costo variable de operación de la planta - Costo de transporte de llantas trituradas

$$\begin{aligned}
 UT = UP & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T X_{ijmt} - \sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T TS_{ht} - \sum_{j=1}^J PS_{j1} * Z_{j1} - \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T FO_{jt} * Z_{jt} \\
 & - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T VO_{jt} * X_{ijmt} - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T C_{ijmt} * \frac{X_{ijmt}}{Tt_{im}^+}
 \end{aligned}$$

Donde UP = \$ 223.166, el cuál es el precio unitario por tonelada de llanta surtida a la planta generadora de energía.

Tabla 4-17. Cronograma de asignación de las máquinas trituradoras – Caso 2

Semestre	Trituradora en Mina				Semestre	Trituradora en Mina				Semestre	Trituradora en Mina				Semestre	Trituradora en Mina			
	$Y(h, t)$	1	2	3		4	$Y(h, t)$	1	2		3	4	$Y(h, t)$	1		2	3	4	$Y(h, t)$
1	0	0	0	1	11	0	1	0	0	21	0	1	0	0	31	0	1	0	0
2	1	0	0	0	12	0	0	0	1	22	0	0	0	1	32	0	1	0	0
3	0	0	0	1	13	0	0	0	1	23	0	1	0	0	33	0	1	0	0
4	0	0	0	1	14	0	0	0	1	24	0	1	0	0	34	0	1	0	0
5	0	1	0	0	15	0	0	0	1	25	0	0	1	0	35	0	0	1	0
6	0	0	1	0	16	0	0	0	1	26	0	1	0	0	36	0	0	0	1
7	0	1	0	0	17	0	1	0	0	27	0	1	0	0	37	0	0	0	1
8	0	0	1	0	18	0	0	1	0	28	0	0	1	0	38	0	0	1	0
9	0	1	0	0	19	0	1	0	0	29	0	1	0	0	39	0	0	0	1
10	0	1	0	0	20	0	1	0	0	30	1	0	0	0	40	0	1	0	0

La interpretación de los resultados mostrados en la Tabla 4-17 se realiza de igual forma que la realizada en el caso 1 con la Tabla 4-14. Las trituradoras empiezan en la mina G, luego operan 1 semestre en la mina C, 2 en la mina G, luego en t = 5 viaja a la mina P, posteriormente a la mina D y así sucesivamente hasta completar el cronograma. Esta secuencia del recurso móvil de trituradoras también corresponde a los orígenes de las cantidades de llanta triturada que se deben enviar a la planta generadora de energía y que se muestran en la Tabla 4-18.

Tabla 4-18. Toneladas de llanta enviadas a la planta por transporte terrestre – Caso 2

Semestre	Toneladas de llanta triturada	Enviadas desde	Semestre	Toneladas de llanta triturada	Enviadas desde	Semestre	Toneladas de llanta triturada	Enviadas desde	Semestre	Toneladas de llanta triturada	Enviadas desde
1	14.000	Mina G	11	13.524	Mina P	21	14.000	Mina P	31	14.000	Mina P
2	6.346	Mina G	12	14.000	Mina G	22	14.000	Mina G	32	14.000	Mina P
3	13.004	Mina G	13	14.000	Mina G	23	7.758	Mina P	33	14.000	Mina P
4	14.000	Mina G	14	14.000	Mina G	24	14.000	Mina P	34	5.000	Mina P
5	11.607	Mina P	15	14.000	Mina G	25	14.000	Mina D	35	14.000	Mina D
6	14.000	Mina D	16	14.000	Mina G	26	14.000	Mina P	36	14.000	Mina G

7	14.000	Mina P	17	12.083	Mina P	27	14.000	Mina P	37	14.000	Mina G
8	13.270	Mina D	18	14.000	Mina D	28	5.161	Mina D	38	12.530	Mina D
9	14.000	Mina P	19	14.000	Mina P	29	14.000	Mina P	39	14.000	Mina G
10	14.000	Mina P	20	14.000	Mina P	30	5.098	Mina G	40	13.524	Mina P

Para estas cantidades, la optimización también determinó que el modo de transporte que se debe utilizar para realizar los envíos es el transporte terrestre. En total se tiene que durante los 20 años se deben triturar 510.906 toneladas de llanta residual, es decir se presentó un aumento del 13% en las cantidades de llanta triturada que se le debe enviar a la planta. Esto es por lo explicado previamente sobre la lógica de la optimización, que en este caso al considerar que hay un ingreso que deja utilidades por cada tonelada de llanta triturada, no se conforma sólo con cumplir con los requerimientos mínimos de reducción de inventario, sino que busca utilizar la capacidad en un mayor porcentaje y así maximizar las utilidades.

En la Figura 4-2 se observa el comportamiento del inventario de las minas a lo largo del horizonte de tiempo de la modelación. A diferencia del caso 1, las reducciones en los niveles de inventario son mucho más notorias y se observa que las líneas continuas al final de la modelación terminan muy por debajo de los requerimientos mínimos que se representan con las líneas de puntos. Estos resultados son más cercanos a lo que sería la realidad de la red de logística inversa de llantas residuales OTR del sector minero en su fase de implementación y operación.

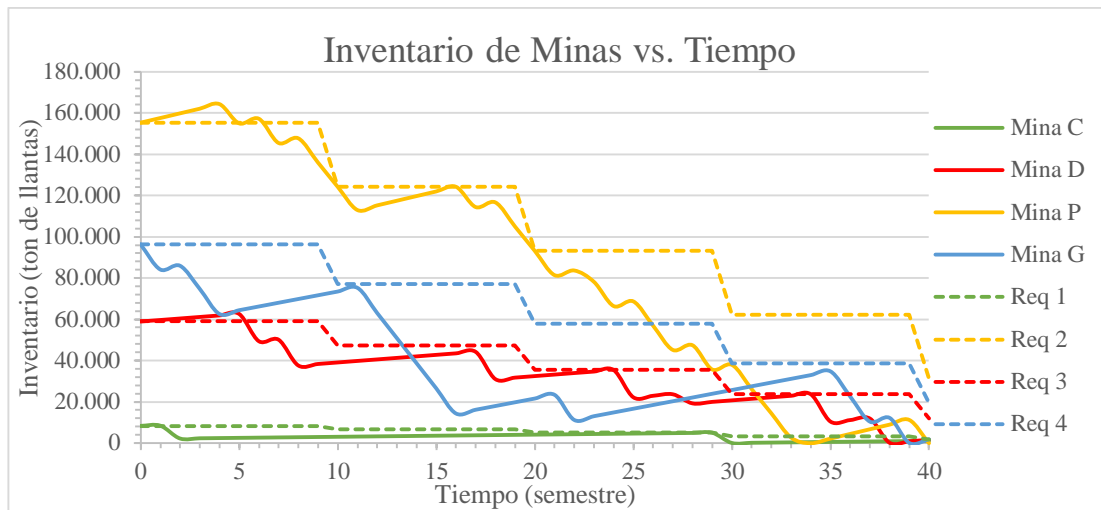


Figura 4-2. Cumplimiento de reducción de inventario en las minas – Caso 2

Finalmente, el costo total de la red en el caso 2 es desglosado en la Tabla 4-19 y se observa que la representación porcentual de los componentes de dicho costo es bastante cercana a la mostrada en la Tabla 4-16 para el caso 1, con variaciones porcentuales cercanas al 1% y no mayores al 2,3%.

Tabla 4-19. Desglose de los componentes de la función objetivo – Caso 2

Tipo de Costo	Valor	%	Variación %
Costo de Trituradoras	\$ 3.596.370.000	11,4%	-0,4%
Costo de Apertura de Planta	\$ 5.077.180.000	16,1%	-0,6%
Costo Fijo de Planta	\$ 12.000.000.000	37,9%	-1,5%
Costo Variable de Planta	\$ 1.021.810.000	3,2%	0,3%
Costo de Transporte	\$ 9.927.310.000	31,4%	2,3%
Costo Total	\$ 31.622.670.000	100%	
Ingresos Totales	\$ 114.017.000.000		
Utilidad Total (Max)	\$ 82.394.330.000		

Se observa también que a pesar de que el costo total se incrementa, porque aumenta la cantidad de toneladas de llanta a triturar en la red, la utilidad total de la misma registra un incremento de \$ 12.076.841.632, pasando de estar en el caso 1 en \$ 70.317.488.368 a un valor de \$ 82.394.330.000 en el caso 2. Es decir, se tuvo un incremento del 17% en la utilidad total de la red, lo cual representa un incremento

considerable al cambiar la lógica de la optimización. A partir de estos resultados, se realizó un análisis de sensibilidad, el cual se explicará en detalle a continuación.

4.5. Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad realizado permitió evaluar el comportamiento del modelo matemático y su respuesta frente a cambios en algunos de los parámetros, así como obtener respuesta de los rangos de factibilidad de algunas de las variables más importantes. Mediante el software utilizado para realizar la optimización, se pudo generar la información de sensibilidad para variables y restricciones, aunque la mayoría tenía rangos de optimalidad nulos con respecto a los valores actuales, ya que tenían involucrados productos con variables binarias. En el caso de los inventarios iniciales, se obtuvo la información mostrada en la Tabla 4-20.

Tabla 4-20. Análisis de sensibilidad para el inventario inicial de llantas en las minas

Inv. Inicial	Mina C	Mina P	Mina D	Mina G
Actual	8.324	155.336	58.956	96.336
Máximo	15.978,4	155.475	64.838	97.332
Error %	92,0%	0,1%	10,0%	1,0%
Mínimo	7.082,4	148.729	56.575	90.144
Error %	14,9%	4,3%	4,0%	6,4%

Estos rangos nos permiten tener confianza en que los resultados actuales del modelo pueden seguir siendo óptimos ante posibles errores en la estimación de los valores de inventario inicial de algunas de las minas. Para la mina C se puede soportar un incremento de hasta 92% o un decremento del 14,9%. En el caso de la mina P, por su alto nivel de inventario inicial, el modelo es menos susceptible a cambios, aceptando un 0,1% más en el inventario inicial y 4,3% menos. El análisis es similar para las minas D y G, las cuales aceptan variaciones porcentuales reducidas, siendo más estricta en el caso de la mina G por las mismas razones explicadas para mina P.

Tabla 4-21. Análisis de sensibilidad para restricción de capacidad de triturado

Semestre	Capacidad Mínima	Capacidad Máxima	Semestre	Capacidad Mínima	Capacidad Máxima	Semestre	Capacidad Mínima	Capacidad Máxima	Semestre	Capacidad Mínima	Capacidad Máxima
1	14000	1E+20	11	14000	1E+20	21	9872,8	14000	31	9872,8	14000
2	13861,2	1E+20	12	9872,8	1E+20	22	9872,8	14000	32	9872,8	14000
3	13861,2	14000	13	14000	1E+20	23	9872,8	14000	33	14000	1E+20
4	14000	1E+20	14	14000	1E+20	24	14000	1E+20	34	9872,8	14000
5	13861,2	14000	15	14000	1E+20	25	14000	1E+20	35	14000	1E+20
6	14000	1E+20	16	9872,8	14000	26	14000	1E+20	36	9872,8	14000
7	14000	1E+20	17	14000	1E+20	27	9872,8	14000	37	5000	1E+20
8	13861,2	14000	18	14000	1E+20	28	9872,8	14000	38	14000	1E+20
9	14000	1E+20	19	9872,8	14000	29	14000	1E+20	39	14000	1E+20
10	14000	1E+20	20	9872,8	14000	30	14000	1E+20	40	6762	1E+20

La capacidad de triturado está correlacionada con la demanda de la planta y esto se ve reflejado en la sensibilidad de sus respectivas restricciones. En el caso de la capacidad de triturado, la restricción muestra que se puede incrementar hasta cualquier valor sin cambiar la base óptima actual (ver Tabla 4-21). Esto se debe a que las cantidades de llanta trituradas se limitan también por los límites de la demanda de la planta, con lo cual, así se tenga una capacidad mucho mayor a la actual, si no se incrementa el límite superior de la demanda de la planta, no se triturará más de lo que actualmente se hace. Para las reducciones soportadas, se tiene que se podría reducir los valores que actualmente se están dejando de utilizar, aunque esto de igual manera no afecta la utilidad, pues los costos de operar el recurso son fijos. A continuación, se presentará el análisis de viabilidad del diseño de la red, con el fin de saber si la implementación de la solución planteada es viable y bajo qué condiciones lo sería.

4.6. Análisis de Viabilidad del Diseño

4.6.1. Evaluación Técnica

La acumulación desmedida de las llantas OTR en las cuatro principales minas de cielo abierto de Colombia y a su vez, la cercanía de la fecha de inicio de la regulación

de inventario de las llantas por parte del gobierno nacional, ha conllevado a que las minas tengan preocupaciones fundadas. Dentro de poco tiempo tendrán que presentar informes de manera obligatoria ante el gobierno donde evidencien de manera clara cuál es la disposición final que le están dando a las llantas y además que también cumplan con la meta estipulada para el año en que se presente cada informe. Si esto no se cumple a cabalidad, puede repercutir en sanciones graves para cada una de las compañías involucradas. Estas pueden ser desde sanciones económicas que generen un impacto significativo en las empresas, hasta la toma de decisión por parte del gobierno nacional de no renovar las licencias de operación de explotación minera. Es por esto que ha surgido la necesidad de encontrar alternativas de solución para esta problemática, donde los principales interesados son las operaciones mineras.

La solución propuesta en este proyecto plantea una red de logística inversa para las llantas residuales OTR de las operaciones mineras, representada a través de un modelo matemático en el cual se establecen recolecciones semestrales de las llantas que se encuentran en cada una de las minas. Previo a la recolección, estas llantas deben ser cortadas y trituradas por medio de un recurso móvil de trituradoras, con el fin de que el proceso de transporte de las llantas sea más eficiente. Por último, las llantas se transportarán hasta una planta generadora de energía que se proyecta ubicada en El Paso, Cesar. Esta determinación del lugar se realizó en base a la optimización del modelo matemático, considerando entre varios factores, los costos de transporte de llantas y trituradoras, así como los operativos de la planta. Dentro de las otras posibilidades de localización de la planta se encontraban las ciudades de Barranquilla y Santa Marta; y por último una localización cerca de la mina G.

De esta manera, se le está dando cumplimiento a las normas establecidas por el gobierno, y además se está generando energía que podría ser utilizada en la red nacional de energía eléctrica del país y beneficiará significativamente a las comunidades aledañas al proyecto. Por último, los escenarios evaluados posteriormente se hicieron a partir del comparativo de costos, utilidades y

acumulación total de inventario triturado entre los modelos escogidos. Estos fueron: Caso 1 – Optimización hacia minimización de costos y Caso 2 – Optimización hacia maximización de utilidades. Ambos escenarios modelados bajo el supuesto de una permanencia mínima del recurso móvil de trituradoras de 1 semestre, sin posibilidad de realizar un cambio de mina dentro de un semestre cualquiera siempre y cuando ya haya cumplido el objetivo de ese semestre.

4.6.2. Evaluación Financiera

Con la finalidad de realizar el flujo de caja correspondiente a cada escenario seleccionado se hace necesario definir el horizonte y la vida útil del proyecto. Para ambos casos, la disponibilidad de personal será de 16 horas, el tiempo de permanencia mínima del conjunto de máquinas trituradoras en cada mina es de 6 meses (1 semestre), y el horizonte de tiempo modelado fue de 40 periodos de 1 semestre. Los flujos de caja consideran como fuente de ingreso a los ingresos por venta de las toneladas de llanta triturada durante el periodo; y dentro de los costos se consideran el costo fijo de operación de la planta de energía, el costo variable de operación de la planta, el costo de transportar las llantas trituradas, el costo fijo de operación de las máquinas de trituradoras y el costo de transportar estas de una mina a otra. El impuesto a la renta usado para ser descontado a la utilidad es del 33% (Actualícese, 2017) y únicamente en el periodo cero se asumen los costos de inversión correspondientes a la apertura de la planta y a la adecuación de los lugares en los cuales las operaciones de corte y triturado se llevarán a cabo dentro de cada mina. En la Tabla 4-22 se presenta un fragmento reducido del flujo de caja del proyecto, con el fin de observar los elementos que se están considerando y que se mencionaron previamente. El flujo de caja completo se puede detallar en la sección de Anexos.

Tabla 4-22. Fragmento del flujo de caja del proyecto

HORIZONTE DEL PROYECTO	
	VIDA ÚTIL DEL PROYECTO

DETALLES	0	1	...	40
Toneladas de Llanta Triturada Vendida		14000	...	13524
INGRESOS		\$3.124.324.000	...	\$3.018.096.984
Costos Desembolsables				
Costo fijo de operación de trituradoras		-\$80.000.000	...	-\$80.000.000
Costo fijo de operación de la planta		-\$300.000.000	...	-\$300.000.000
Costo variable de operación de la planta		-\$28.000.000	...	-\$27.048.000
Costo de transportar llantas trituradas		-\$447.264.800	...	-\$152.621.818
Costo de transportar trituradoras		\$0	...	\$1.360.100
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS		\$2.269.059.200	...	\$2.459.787.266
IMPUESTO A LA RENTA (33%)		-\$748.789.536	...	-\$811.729.798
UTILIDAD DESPUES DE IMPUESTOS		\$1.520.269.664	...	\$1.648.057.468
Costos No Gravables				
Inversión Fija				
Costo de apertura planta	-\$5.077.180.000			
Costo de adecuación inicial	-\$240.000.000			
FLUJO DE FONDOS NETOS	-\$5.317.180.000	\$1.520.269.664	...	\$1.648.057.468

Para completar la evaluación financiera, se seleccionaron como criterios de evaluación el valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR). Para esto se calculó el valor presente neto para diferentes tasas de descuento semestrales, tal como se muestra en la Figura 4-3 y se observa que la tasa que hace que el VPN sea igual a cero está en el vecindario del 25%. Realizando iteraciones, se obtuvo que esta tasa de descuento, la cual corresponde a la TIR, es de 25,38% semestral (23,95% anual).

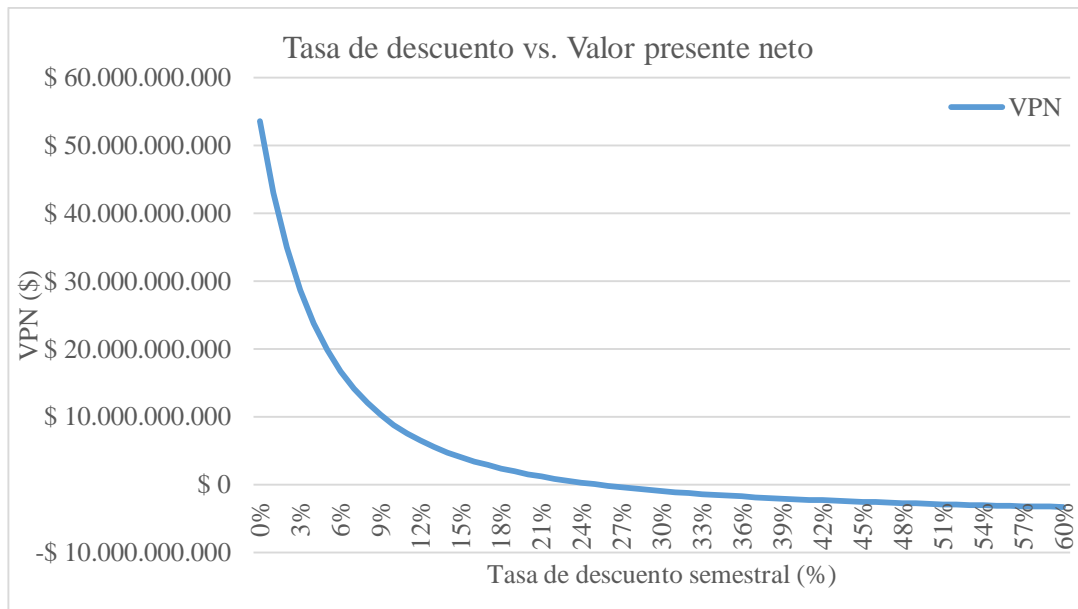


Figura 4-3. Valor presente neto (\$) para diferentes tasas de descuento (%)

La Figura 4-3 sirve como soporte para que el tomador de decisiones del proyecto, según la tasa de descuento semestral que considere aceptable, sea quien decida si es viable o no la puesta en marcha del proyecto. El análisis que se deriva de esta evaluación financiera es que, si el tomador de decisiones establece una tasa de descuento no mayor a 25,38% semestral (23,95% anual), entonces aceptará el proyecto, de lo contrario lo rechazará. Con respecto a esta TIR, vale la pena mencionar que el precio que se tomó de referencia se mantuvo fijo durante todo el horizonte de la modelación, lo que debería ser tenido en cuenta para futuras investigaciones, en las que se haga un desarrollo más profundo sobre el precio del servicio prestado a las minas.

4.7. Análisis del Precio

Es de interés encontrar el precio en el cuál la red encontraría un punto de equilibrio en el escenario de maximización de utilidades, independiente del destino final de las llantas trituradas. Para este propósito se analizaron nuevamente los resultados, excluyendo los costos asociados a la planta generadora de energía. Los resultados

obtenidos son los mostrados en la Tabla 4-23, donde se tiene el precio para el punto de equilibrio en la optimización de maximización de utilidades y el efecto en las cantidades de llantas trituradas y en las utilidades conforme se va aumentando el precio en incrementos de 10%. Esta tabla muestra que existe una relación casi directa entre los incrementos del precio sobre el incremento en la utilidad, no siendo así para el incremento en las cantidades de llantas trituradas. Mientras que para incrementos de 10%, la utilidad aumenta en 9-10%, en las toneladas de llanta triturada el incremento no llega al 4%. Esto es debido a que el modelo termina siendo limitado por las capacidades del recurso de trituradoras al momento de incrementar las cantidades trituradas.

Tabla 4-23. Análisis del precio para el caso de maximización de utilidades.

	Precio	Ton de Llanta triturada	Incremento en llantas trituradas	Costo Total	Costo Unitario	Utilidad Total	Incremento en Utilidad
Punto de Equilibrio	\$26.190,84	493.563		\$12.926.830.000	\$26.190,84	\$0	0%
P.E. + 10%	\$28.809,92	493.563	0,00%	\$12.926.830.000	\$26.190,84	\$1.292.683.000	10%
P.E. + 20%	\$31.429,01	493.563	0,00%	\$12.926.830.000	\$26.190,84	\$2.585.366.000	20%
P.E. + 30%	\$34.048,09	509.206	3,17%	\$13.428.240.000	\$26.370,93	\$3.909.260.131	29%
P.E. + 40%	\$36.667,18	509.206	3,17%	\$13.428.240.000	\$26.370,93	\$5.242.913.987	39%
P.E. + 50%	\$39.286,26	509.213	3,17%	\$13.428.710.000	\$26.371,52	\$6.576.349.275	49%
Valor actual (+752%)	\$223.166,00	510.906	3,51%	\$13.523.680.000	\$26.470,00	\$100.493.168.396	743%

4.8. Conclusiones de la Aplicación y Resultados del Modelo

Luego de haber realizado el análisis de viabilidad del proyecto, culmina la presentación de los resultados del modelo y su aplicación en el caso de estudio. En este capítulo se pudo evidenciar la aplicación del modelo matemático hacia un caso de estudio de interés, correspondiente a las cuatro principales minas de cielo abierto de la Región Caribe de Colombia. Esta optimización permitió encontrar escenarios bajo los cuales podría solucionarse la problemática de acumulación de inventario de

llantas residuales en estas minas. Además, esto permitió dar respuesta a la pregunta de investigación formulada en el capítulo 1. En el siguiente capítulo, se presentarán las conclusiones generales que deja el trabajo investigativo desarrollado en esta tesis y las sugerencias para futuros trabajos a desarrollar en esta línea de investigación.

Conclusiones Finales

Las llantas residuales representan un problema global debido a las tasas de generación en constante crecimiento y a las alternativas de disposición final tradicionalmente utilizadas con este desecho. Esta problemática no se presentaba en los inicios de la industria del caucho, cuando esta misma se encargaba de recuperar las llantas de desecho, pero cuando el uso de las llantas se volvió significativo y se empezaron a utilizar materiales más sofisticados, los procesos de recuperación se volvieron más complejos y costosos (Beckman et al., 1974). Diversos autores han reafirmado la necesidad de reintroducir las llantas residuales al ciclo de producción y hacer uso de sus componentes en diversas aplicaciones de reaprovechamiento (De Souza & D'Agosto, 2013; Debo & Van Wassenhove, 2005; Govindan et al., 2015; Lebreton & Tuma, 2006; Martinez-Alvaro & Herrero-Del-Barrio, 2009; Panagiotidou & Tagaras, 2005; Sasikumar et al., 2010; Subulan et al., 2015) aunque la implementación de alternativas de solución para este problema debe ser acompañada por los entes gubernamentales.

En países desarrollados se han implementado modelos de responsabilidad extendida del productor (EPR, por sus siglas en inglés) que han contribuido a promover el reciclaje de productos al final de su ciclo de vida y a generar reducciones en la eliminación de desechos de los consumidores, basándose en el principio de “quien contamina paga” (polluter-pays principle) (Driedger, 2002; Lindhqvist, 2000). Sin embargo, en economías en desarrollo como la de América Latina, y en especial para el caso de las llantas, los sistemas de EPR no incentivan a otros actores en la cadena de productos diferentes a productores e importadores, a llevar a cabo sus tareas y responsabilidades asignadas (Park et al., 2018).

El diseño de redes de logística inversa para llantas residuales permite abordar esta problemática con el fin de recolectar y disponer adecuadamente estos residuos. Sin embargo, el diseño de redes de logística inversa en sí es complicado por las necesidades de probar y clasificar los productos de devolución, y por la incertidumbre de estos productos en términos de cantidad, calidad y tiempo de suministro, así como por la integración y coordinación de los diferentes flujos de avance y retroceso (Ayvaz et al., 2015). En particular para el caso de las llantas residuales, existe un segmento de las mismas conocido como llantas OTR (Off The Road) que representa el 1% de la industria de llantas en volumen unitario, pero del 15 al 20% en peso total (Sheerin, 2017), en el cual se tienen llantas con dimensiones que pueden alcanzar hasta 4 metros con pesos de más de 3 toneladas (Goodyear, 2017). Esto evidentemente genera dificultades logísticas para su recolección y transporte.

En esta investigación se hizo el diseño de una red de logística inversa para grandes llantas residuales OTR del sector minero, las cuales tienen dimensiones que dificultan su manejo y traslado de los sitios remotos donde se generan hasta los lugares de disposición final. Para este fin, se realizó una caracterización del proceso de reducción por corte y triturado de estas llantas y se determinó que la alternativa de disposición final más apropiada es la de reconversión del residuo para generación de energía. Para representar la red de logística inversa, se diseñó un modelo matemático que tiene en cuenta los diferentes costos asociados al proceso de trituración y traslado de las llantas trituradas desde las minas hasta sus puntos de disposición final, que corresponden a plantas generadoras de energía.

Por la gran inversión que conlleva la apertura y funcionamiento de estas plantas, se determinó que lo idóneo es abrir solo una planta generadora, que reciba todo el flujo de material proveniente de las minas. Además, se consideró un uso compartido del recurso de máquinas trituradoras disponible, de tal forma que la inversión económica se reduzca y sea atractiva para los posibles entes involucrados en la implementación de la solución. Luego se realizó la optimización del modelo matemático y los

hallazgos mostraron que el modelo matemático en el caso de minimización de costos no se comporta realmente como se esperaría en la realidad, subutilizando en ocasiones la capacidad del recurso instalado en las minas. Así, fue necesario realizar la validación del modelo usando una estimación del precio de venta y optimizando el modelo hacia maximización de utilidades, lo cual arrojó resultados más cercanos al contexto real de emprendimientos enfocados en la resolución del problema y la implementación de la solución.

Cabe resaltar que, aunque el movimiento y procesamiento de las llantas trituradas representan una solución parcial al problema, las investigaciones futuras deberían abordar su mercado y explorar las fuentes de ingresos para predecir mejor la viabilidad de una inversión tan significativa y determinar una opción empresarial sostenible para transformar estos residuos en un bien de valor positivo. Además, para investigaciones futuras, se puede considerar la opción de tener tiempos de permanencia flexibles, es decir que las trituradoras se puedan trasladar hacia otra mina en los periodos donde no encuentren más inventario de llantas para triturar en la mina en la que estén asignadas. También es posible modelar y medir el efecto o impacto que puede tener la estocasticidad en los parámetros de la red, ya que el modelo desarrollado en esta investigación es completamente determinístico. Para esto, pueden usarse herramientas como la simulación de eventos discretos.

Finalmente, el diseño de la red de logística inversa de llantas residuales se puede extender para considerar las llantas residuales del entorno urbano. En este entorno, la problemática es similar en el sentido que las llantas al fin de su ciclo de vida, se perciben como un bien con valor residual negativo; pero con la diferencia que allí se encuentran dispersas en diferentes puntos de la ciudad. Esto representaría un nuevo reto al momento de hacer la recolección y el traslado, ya que los tamaños de estas llantas son mucho más manejables que los de las llantas OTR del sector minero, pero a su vez se debe tener una red lo más amplia posible que permita recolectar los altos volúmenes de toneladas de llanta requeridos por la planta generadora de energía.

El cumplimiento de los objetivos propuestos al inicio de la investigación se dio de manera satisfactoria, tal como se muestra a continuación:

- ✓ Se determinaron los parámetros de la red de logística inversa de llantas residuales de gran tamaño de las operaciones mineras mediante la caracterización del proceso de recuperación de llantas, a través de la revisión del estado del arte y de la modelación y el desarrollo del problema (Capítulos 2 y 3).
- ✓ Se diseñó un modelo de matemático para la red de logística inversa (LI) que permita tomar decisiones en diferentes momentos de tiempo sobre la disposición final de las llantas residuales OTR, como se evidencia en la sección 3.7.
- ✓ Se optimizó el modelo matemático aplicado al caso de estudio de las 4 principales minas de cielo abierto de la Región Caribe colombiana, con propósitos de validación. Este desarrollo se muestra en detalle en el capítulo 4.
- ✓ Se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar la respuesta del modelo frente a diferentes escenarios, lo cual se encuentra en la sección 4.5.
- ✓ Se evaluó la factibilidad económica del diseño de la red a lo largo del tiempo, encontrando los escenarios y condiciones bajo los cuales se podría implementar la solución propuesta, lo cual se explica en la sección 4.6.

Además, se encontró que la lógica de la red logística inversa debe ser una optimización hacia maximización de utilidades, ya que cuando se intenta minimizar costos no se aprovechan las capacidades de trituración y sólo se busca cumplir con las reducciones mínimas de inventario. Esto no hace sentido, dado que la lógica real indica que se requiere una operación rentable para la red LI y no una que busque un costo mínimo. De igual forma, se realizó en la sección 4.7 un análisis sobre los efectos de cambios en el precio en las cantidades de llantas trituradas y las utilidades de la red logística, excluyendo los costos asociados a la planta generadora de energía, el cuál mostró que las utilidades tienen una relación casi 1:1 con los incrementos en los precios sobre el punto de equilibrio, pero las cantidades a triturar no. Mientras que para incrementos del 10 al 20% no se incrementan las toneladas de llantas a triturar,

para valores muy superiores del 50% e incluso el valor con el que se trabajó la optimización, el incremento porcentual de llantas trituradas no llegó al 4%.

Esta investigación tiene una contribución a nivel científico con el diseño óptimo de una red de logística inversa para llantas OTR residuales de gran tamaño, que novedosamente incorpora la secuenciación de un recurso de corte compartido entre minas. Además, como elemento diferencial adicional, se incorpora el cumplimiento a las regulaciones legales impuestas a las minas por parte de los gobiernos para la correcta disposición de llantas residuales

A nivel práctico permitirá tener una solución factible a un problema que afecta económicamente a las operaciones mineras, evitando multas por incumplimiento de las regulaciones; y a las empresas recolectoras de llantas les servirá para tener una operación rentable y así brindar un servicio que busca suplir una necesidad urgente en su segmento de mercado. Aunque la prioridad era encontrar una operación rentable que solucionara la problemática de la acumulación de llantas residuales en las minas, la investigación contribuye a nivel medioambiental y social. La reducción de inventarios de llantas residuales apiladas, ayudará a mitigar la proliferación de enfermedades provocada por vectores como mosquitos y roedores que nacen debido al estancamiento de las aguas y la inaccesibilidad de zonas de almacenamiento; y también se reducirán las sustancias nocivas emitidas por la quema (voluntaria o no) de llantas, tales como material particulado y dióxido de azufre. Sin embargo, no se consideraron métricas ambientales en la función objetivo, sino como una restricción del problema, que permitiera lograr en las minas unas reducciones de inventario de llantas de desecho que cumplan con las legislaciones ambientales vigentes.

A. Anexo: Flujo de Caja del Caso de Estudio de la Red de Logística Inversa

DETALLES	HORIZONTE DEL PROYECTO					
	0	1	2	3	4	5
Toneladas de Llanta Triturada Vendida		14000	6345,6	13004	14000	11607,2
INGRESOS		\$ 3.124.324.000	\$ 1.416.122.170	\$ 2.902.050.664	\$ 3.124.324.000	\$ 2.590.332.395
Costos Desembolsables						
Costo fijo de operación de trituradoras		-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000
Costo fijo de operación de la planta		-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000
Costo variable de operación de la planta		-\$ 28.000.000	-\$ 12.691.200	-\$ 26.008.000	-\$ 28.000.000	-\$ 23.214.400
Costo de transportar llantas trituradas		-\$ 447.264.800	-\$ 465.813.816	-\$ 415.445.104	-\$ 447.264.800	-\$ 130.990.237
Costo de transportar trituradoras		\$ 0	\$ 1.360.100	\$ 0	\$ 1.935.100	\$ 1.935.100
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS		\$ 2.269.059.200	\$ 558.977.253	\$ 2.080.597.560	\$ 2.270.994.300	\$ 2.058.062.858
IMPUESTO A LA RENTA (33%)		-\$ 748.789.536	-\$ 184.462.494	-\$ 686.597.195	-\$ 749.428.119	-\$ 679.160.743
UTILIDAD DESPUES DE IMPUESTOS		\$ 1.520.269.664	\$ 374.514.759	\$ 1.394.000.365	\$ 1.521.566.181	\$ 1.378.902.115
Costos No Gravables						
Inversión Fija						
Costo de apertura planta	-\$ 5.077.180.000					
Costo de adecuación inicial	-\$ 240.000.000					
FLUJO DE FONDOS NETOS	-\$ 5.317.180.000	\$ 1.520.269.664	\$ 374.514.759	\$ 1.394.000.365	\$ 1.521.566.181	\$ 1.378.902.115

	HORIZONTE DEL PROYECTO				
	VIDA ÚTIL DEL PROYECTO				
DETALLES	6	7	8	9	10
Toneladas de Llanta Triturada Vendida	14000	14000	13270,4	14000	14000
INGRESOS	\$ 3.124.324.000	\$ 3.124.324.000	\$ 2.961.502.086	\$ 3.124.324.000	\$ 3.124.324.000
Costos Desembolsables					
Costo fijo de operación de trituradoras	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000
Costo fijo de operación de la planta	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000
Costo variable de operación de la planta	-\$ 28.000.000	-\$ 28.000.000	-\$ 26.540.800	-\$ 28.000.000	-\$ 28.000.000
Costo de transportar llantas trituradas	-\$ 157.993.600	-\$ 157.993.600	-\$ 149.759.876	-\$ 157.993.600	-\$ 157.993.600
Costo de transportar trituradoras	\$ 59.500	\$ 1.360.100	\$ 1.360.100	\$ 59.500	\$ 1.360.100
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	\$ 2.558.389.900	\$ 2.559.690.500	\$ 2.406.561.510	\$ 2.558.389.900	\$ 2.559.690.500
IMPUESTO A LA RENTA (33%)	-\$ 844.268.667	-\$ 844.697.865	-\$ 794.165.298	-\$ 844.268.667	-\$ 844.697.865
UTILIDAD DESPUES DE IMPUESTOS	\$ 1.714.121.233	\$ 1.714.992.635	\$ 1.612.396.212	\$ 1.714.121.233	\$ 1.714.992.635
Costos No Gravables					
Inversión Fija					
Costo de apertura planta					
Costo de adecuación inicial					
FLUJO DE FONDOS NETOS	\$ 1.714.121.233	\$ 1.714.992.635	\$ 1.612.396.212	\$ 1.714.121.233	\$ 1.714.992.635

	HORIZONTE DEL PROYECTO				
	VIDA ÚTIL DEL PROYECTO				
DETALLES	11	12	13	14	15
Toneladas de Llanta Triturada Vendida	13524	14000	14000	14000	14000
INGRESOS	\$ 3.018.096.984	\$ 3.124.324.000	\$ 3.124.324.000	\$ 3.124.324.000	\$ 3.124.324.000
Costos Desembolsables					
Costo fijo de operación de trituradoras	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000
Costo fijo de operación de la planta	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000
Costo variable de operación de la planta	-\$ 27.048.000	-\$ 28.000.000	-\$ 28.000.000	-\$ 28.000.000	-\$ 28.000.000
Costo de transportar llantas trituradas	-\$ 152.621.818	-\$ 447.264.800	-\$ 447.264.800	-\$ 447.264.800	-\$ 447.264.800
Costo de transportar trituradoras	\$ 0	\$ 1.360.100	\$ 59.500	\$ 1.360.100	\$ 0
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	\$ 2.458.427.166	\$ 2.270.419.300	\$ 2.269.118.700	\$ 2.270.419.300	\$ 2.269.059.200
IMPUESTO A LA RENTA (33%)	-\$ 811.280.965	-\$ 749.238.369	-\$ 748.809.171	-\$ 749.238.369	-\$ 748.789.536
UTILIDAD DESPUES DE IMPUESTOS	\$ 1.647.146.201	\$ 1.521.180.931	\$ 1.520.309.529	\$ 1.521.180.931	\$ 1.520.269.664
Costos No Gravables					
Inversión Fija					
Costo de apertura planta					
Costo de adecuación inicial					
FLUJO DE FONDOS NETOS	\$ 1.647.146.201	\$ 1.521.180.931	\$ 1.520.309.529	\$ 1.521.180.931	\$ 1.520.269.664

DETALLES	HORIZONTE DEL PROYECTO				
	VIDA ÚTIL DEL PROYECTO				
	16	17	18	19	20
Toneladas de Llanta Triturada Vendida	14000	12083,2	14000	14000	14000
INGRESOS	\$ 3.124.324.000	\$ 2.696.559.411	\$ 3.124.324.000	\$ 3.124.324.000	\$ 3.124.324.000
Costos Desembolsables					
Costo fijo de operación de trituradoras	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000
Costo fijo de operación de la planta	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000
Costo variable de operación de la planta	-\$ 28.000.000	-\$ 24.166.400	-\$ 28.000.000	-\$ 28.000.000	-\$ 28.000.000
Costo de transportar llantas trituradas	-\$ 447.264.800	-\$ 136.362.019	-\$ 157.993.600	-\$ 157.993.600	-\$ 157.993.600
Costo de transportar trituradoras	\$ 1.360.100	\$ 59.500	\$ 0	\$ 59.500	\$ 0
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	\$ 2.270.419.300	\$ 2.156.090.492	\$ 2.558.330.400	\$ 2.558.389.900	\$ 2.558.330.400
IMPUESTO A LA RENTA (33%)	-\$ 749.238.369	-\$ 711.509.862	-\$ 844.249.032	-\$ 844.268.667	-\$ 844.249.032
UTILIDAD DESPUES DE IMPUESTOS	\$ 1.521.180.931	\$ 1.444.580.630	\$ 1.714.081.368	\$ 1.714.121.233	\$ 1.714.081.368
Costos No Gravables					
Inversión Fija					
Costo de apertura planta					
Costo de adecuación inicial					
FLUJO DE FONDOS NETOS	\$ 1.521.180.931	\$ 1.444.580.630	\$ 1.714.081.368	\$ 1.714.121.233	\$ 1.714.081.368

DETALLES	HORIZONTE DEL PROYECTO				
	VIDA ÚTIL DEL PROYECTO				
	21	22	23	24	25
Toneladas de Llanta Triturada Vendida	14000	14000	7757,6	14000	14000
INGRESOS	\$ 3.124.324.000	\$ 3.124.324.000	\$ 1.731.232.562	\$ 3.124.324.000	\$ 3.124.324.000
Costos Desembolsables					
Costo fijo de operación de trituradoras	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000
Costo fijo de operación de la planta	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000
Costo variable de operación de la planta	-\$ 28.000.000	-\$ 28.000.000	-\$ 15.515.200	-\$ 28.000.000	-\$ 28.000.000
Costo de transportar llantas trituradas	-\$ 157.993.600	-\$ 447.264.800	-\$ 87.546.511	-\$ 157.993.600	-\$ 157.993.600
Costo de transportar trituradoras	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 1.360.100	\$ 0
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	\$ 2.558.330.400	\$ 2.269.059.200	\$ 1.248.170.851	\$ 2.559.690.500	\$ 2.558.330.400
IMPUESTO A LA RENTA (33%)	-\$ 844.249.032	-\$ 748.789.536	-\$ 411.896.381	-\$ 844.697.865	-\$ 844.249.032
UTILIDAD DESPUES DE IMPUESTOS	\$ 1.714.081.368	\$ 1.520.269.664	\$ 836.274.470	\$ 1.714.992.635	\$ 1.714.081.368
Costos No Gravables					
Inversión Fija					
Costo de apertura planta					
Costo de adecuación inicial					
FLUJO DE FONDOS NETOS	\$ 1.714.081.368	\$ 1.520.269.664	\$ 836.274.470	\$ 1.714.992.635	\$ 1.714.081.368

DETALLES	HORIZONTE DEL PROYECTO				
	VIDA ÚTIL DEL PROYECTO				
	26	27	28	29	30
Toneladas de Llanta Triturada Vendida	14000	14000	5161,2	14000	5098,4
INGRESOS	\$ 3.124.324.000	\$ 3.124.324.000	\$ 1.151.804.359	\$ 3.124.324.000	\$ 1.137.789.534
Costos Desembolsables					
Costo fijo de operación de trituradoras	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000
Costo fijo de operación de la planta	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000
Costo variable de operación de la planta	-\$ 28.000.000	-\$ 28.000.000	-\$ 10.322.400	-\$ 28.000.000	-\$ 10.196.800
Costo de transportar llantas trituradas	-\$ 157.993.600	-\$ 157.993.600	-\$ 58.245.469	-\$ 157.993.600	-\$ 374.260.142
Costo de transportar trituradoras	\$ 1.360.100	\$ 59.500	\$ 0	\$ 1.360.100	\$ 2.286.300
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	\$ 2.559.690.500	\$ 2.558.389.900	\$ 703.236.490	\$ 2.559.690.500	\$ 375.618.892
IMPUESTO A LA RENTA (33%)	-\$ 844.697.865	-\$ 844.268.667	-\$ 232.068.042	-\$ 844.697.865	-\$ 123.954.234
UTILIDAD DESPUES DE IMPUESTOS	\$ 1.714.992.635	\$ 1.714.121.233	\$ 471.168.448	\$ 1.714.992.635	\$ 251.664.658
Costos No Gravables					
Inversión Fija					
Costo de apertura planta					
Costo de adecuación inicial					
FLUJO DE FONDOS NETOS	\$ 1.714.992.635	\$ 1.714.121.233	\$ 471.168.448	\$ 1.714.992.635	\$ 251.664.658

	HORIZONTE DEL PROYECTO				
	VIDA ÚTIL DEL PROYECTO				
DETALLES	31	32	33	34	35
Toneladas de Llanta Triturada Vendida	14000	14000	14000	5000	14000
INGRESOS	\$ 3.124.324.000	\$ 3.124.324.000	\$ 3.124.324.000	\$ 1.115.830.000	\$ 3.124.324.000
Costos Desembolsables					
Costo fijo de operación de trituradoras	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000
Costo fijo de operación de la planta	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000
Costo variable de operación de la planta	-\$ 28.000.000	-\$ 28.000.000	-\$ 28.000.000	-\$ 10.000.000	-\$ 28.000.000
Costo de transportar llantas trituradas	-\$ 157.993.600	-\$ 157.993.600	-\$ 157.993.600	-\$ 56.426.286	-\$ 157.993.600
Costo de transportar trituradoras	\$ 1.935.100	\$ 0	\$ 1.360.100	\$ 1.360.100	\$ 1.360.100
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	\$ 2.560.265.500	\$ 2.558.330.400	\$ 2.559.690.500	\$ 670.763.814	\$ 2.559.690.500
IMPUESTO A LA RENTA (33%)	-\$ 844.887.615	-\$ 844.249.032	-\$ 844.697.865	-\$ 221.352.059	-\$ 844.697.865
UTILIDAD DESPUES DE IMPUESTOS	\$ 1.715.377.885	\$ 1.714.081.368	\$ 1.714.992.635	\$ 449.411.755	\$ 1.714.992.635
Costos No Gravables					
Inversión Fija					
Costo de apertura planta					
Costo de adecuación inicial					
FLUJO DE FONDOS NETOS	\$ 1.715.377.885	\$ 1.714.081.368	\$ 1.714.992.635	\$ 449.411.755	\$ 1.714.992.635

DETALLES	HORIZONTE DEL PROYECTO				
	VIDA ÚTIL DEL PROYECTO				
	36	37	38	39	40
Toneladas de Llanta Triturada Vendida	14000	14000	12530,4	14000	13524
INGRESOS	\$ 3.124.324.000	\$ 3.124.324.000	\$ 2.796.359.246	\$ 3.124.324.000	\$ 3.018.096.984
Costos Desembolsables					
Costo fijo de operación de trituradoras	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000
Costo fijo de operación de la planta	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000
Costo variable de operación de la planta	-\$ 28.000.000	-\$ 28.000.000	-\$ 25.060.800	-\$ 28.000.000	-\$ 27.048.000
Costo de transportar llantas trituradas	-\$ 447.264.800	-\$ 447.264.800	-\$ 141.408.786	-\$ 447.264.800	-\$ 152.621.818
Costo de transportar trituradoras	\$ 1.360.100	\$ 0	\$ 59.500	\$ 1.360.100	\$ 1.360.100
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	\$ 2.270.419.300	\$ 2.269.059.200	\$ 2.249.949.160	\$ 2.270.419.300	\$ 2.459.787.266
IMPUESTO A LA RENTA (33%)	-\$ 749.238.369	-\$ 748.789.536	-\$ 742.483.223	-\$ 749.238.369	-\$ 811.729.798
UTILIDAD DESPUES DE IMPUESTOS	\$ 1.521.180.931	\$ 1.520.269.664	\$ 1.507.465.937	\$ 1.521.180.931	\$ 1.648.057.468
Costos No Gravables					
Inversión Fija					
Costo de apertura planta					
Costo de adecuación inicial					
FLUJO DE FONDOS NETOS	\$ 1.521.180.931	\$ 1.520.269.664	\$ 1.507.465.937	\$ 1.521.180.931	\$ 1.648.057.468

	HORIZONTE DEL PROYECTO				
	VIDA ÚTIL DEL PROYECTO				
DETALLES	36	37	38	39	40
Toneladas de Llanta Triturada Vendida	14000	5000	8844	14000	6762
INGRESOS	\$ 1.226.789.200	\$ 438.139.000	\$ 774.980.263	\$ 1.226.789.200	\$ 592.539.184
Costos Desembolsables					
Costo fijo de operación de trituradoras	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000	-\$ 80.000.000
Costo fijo de operación de la planta	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000	-\$ 300.000.000
Costo variable de operación de la planta	-\$ 28.000.000	-\$ 10.000.000	-\$ 17.688.000	-\$ 28.000.000	-\$ 13.524.000
Costo de transportar llantas trituradas	-\$ 157.993.600	-\$ 56.426.286	-\$ 99.806.814	-\$ 447.264.800	-\$ 76.310.909
Costo de transportar trituradoras	-\$ 1.360.100	\$ 0	-\$ 59.500	-\$ 1.360.100	-\$ 1.360.100
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	\$ 659.435.500	-\$ 8.287.286	\$ 277.425.949	\$ 370.164.300	\$ 121.344.175
IMPUESTO A LA RENTA (33%)	-\$ 217.613.715	\$ 2.734.804	-\$ 91.550.563	-\$ 122.154.219	-\$ 40.043.578
UTILIDAD DESPUES DE IMPUESTOS	\$ 441.821.785	-\$ 5.552.482	\$ 185.875.386	\$ 248.010.081	\$ 81.300.597
Costos No Gravables					
Inversión Fija					
Costo de apertura planta					
Costo de adecuación inicial					
FLUJO DE FONDOS NETOS	\$ 441.821.785	-\$ 5.552.482	\$ 185.875.386	\$ 248.010.081	\$ 81.300.597

Referencias

- Actualícese. (2017). Tarifa en renta del 33 % para personas jurídicas. Retrieved 10 October 2018, from <https://actualicese.com/actualidad/2017/12/26/tarifa-general-del-impuesto-de-renta-para-personas-juridicas-sera-del-33-para-el-ano-gravable-2018/>
- Agarwal, V., Govindan, K., Darbari, J. D., & Jha, P. C. (2016). An optimization model for sustainable solutions towards implementation of reverse logistics under collaborative framework. *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, 7(4), 480–487. <https://doi.org/10.1007/s13198-016-0486-3>
- Akçalı, E., Çetinkaya, S., & Üster, H. (2009). Network design for reverse and closed-loop supply chains: An annotated bibliography of models and solution approaches. *Networks*, 53(3), 231–248. <https://doi.org/10.1002/net.20267>
- Alshamsi, A., & Diabat, A. (2015). A reverse logistics network design. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 589–598. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.02.006>
- Alumur, S. A., Nickel, S., Saldanha-Da-Gama, F., & Verter, V. (2012). Multi-period reverse logistics network design. *European Journal of Operational Research*, 220(1), 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.12.045>
- Amin, S. H., & Zhang, G. (2012). An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: Multi-objective approach. *Expert Systems with Applications*, 39(8), 6782–6791. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2011.12.056>
- Ammar, M. A., & Mohieldin, Y. A. (2002). Resource constrained project scheduling using simulation. *Construction Management and Economics*, 20(4), 323–330.

<https://doi.org/10.1080/01446190210131098>

- Arias, L. A., Rivas, E., & Vega, C. N. (2014). Propuesta de diseño para un centro integral de reciclaje con inclusión de fuentes alternativas de energía. *Revista EAN*, (77), 136–151.
- Ayvaz, B., Bolat, B., & Aydin, N. (2015). Stochastic reverse logistics network design for waste of electrical and electronic equipment. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 391–404. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.07.006>
- Barker, T. J., & Zabinsky, Z. B. (2008). Reverse logistics network design: A conceptual framework for decision making. *International Journal of Sustainable Engineering*, 1(4), 250–260. <https://doi.org/10.1080/19397030802591196>
- Barraza, G., Fuentes, P., Guarín, A., Silvera, A., & Amaya, R. (2016). *Diseño de una red de logística inversa de llantas residuales para el abastecimiento de una planta productora de energía*. (Capstone Project). Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia.
- BCA Industries. (2017). BCA Industries: Milwaukee Wisconsin: PD1000TIF. Retrieved 3 February 2018, from <http://www.bca-industries.com/shredders/PD1000TIF.php>
- Beckman, J. A., Crane, G., Kay, E. L., & Laman, J. R. (1974). Scrap tire disposal. *Rubber Chemistry and Technology*, 47(3), 597–624.
- Beullens, P. (2004). Reverse logistics in effective recovery of products from waste materials. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 3(4), 283–306. <https://doi.org/10.1007/s11157-004-2332-3>
- Bridgestone. (2010, February). Bridgestone Establishes "Bridgestone Bandag Retread Center" in Thailand.
- Bridgestone. (2013). Environmental Brochure. Retrieved from [http://bridgestone.azureedge.net/~media/Files/Corporate/Central/Downloads/2013 Environmental Brochure.ashx?vs=1&d=20140117T143625&la=en](http://bridgestone.azureedge.net/~media/Files/Corporate/Central/Downloads/2013%20Environmental%20Brochure.ashx?vs=1&d=20140117T143625&la=en)
- Bueno López, M., Rodríguez Sarmiento, L. C., & Sánchez Rodríguez, P. (2016). Análisis de costos de la generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables en el sistema eléctrico colombiano. *Ingeniería y Desarrollo*, 34(2),

397–419. <https://doi.org/10.14482/inde.33.2.6368>

Cantanhede, A., & Monge, G. (2002). Estado del Arte del Manejo de Llantas Usadas en las Américas.

Cerrejón. (2012). *Informe de sostenibilidad 2012*. Colombia.

Chaparro, E., Mercado, T., Vergara, L., Vergara, S., Oyola, J., & Amaya, R. (2018). *Modelo de simulación continua para la recuperación de llantas en el entorno minero, empleando dinámica de sistemas*. (Capstone Project). Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia.

Chiou, C. Y., Chen, H. C., Yu, C. T., & Yeh, C. Y. (2012). Consideration Factors of Reverse Logistics Implementation -A Case Study of Taiwan's Electronics Industry. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 40(0), 375–381. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.203>

Cortés, S., & Arango Londoño, A. (2017). Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía. *Revista Ciencias Estratégicas*, 25(38), 375–390.

Cruz-Rivera, R., & Ertel, J. (2009). Reverse logistics network design for the collection of End-of-Life Vehicles in Mexico. *European Journal of Operational Research*, 196(3), 930–939. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.04.041>

DANE. (2017). Exportaciones. Retrieved from <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/comercio-internacional/exportaciones>

Das, K., & Chowdhury, A. H. (2012). Designing a reverse logistics network for optimal collection, recovery and quality-based product-mix planning. *International Journal of Production Economics*, 135(1), 209–221. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.07.010>

Daskin, M. S. (2008). What you should know about location modeling. *Naval Research Logistics (NRL)*, 55(4), 283–294.

Daskin, M. S., & Maass, K. L. (2015). The p-Median Problem. In G. Laporte, S. Nickel, & F. Saldanha da Gama (Eds.), *Location Science* (pp. 21–45). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13111-5_2

- Davis, P. S., & Ray, T. L. (1969). A branch-bound algorithm for the capacitated facilities location problem. *Naval Research Logistics Quarterly*, 16(3), 331–344. <https://doi.org/10.1002/nav.3800160306>
- 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>
- Debo, L. G., & Van Wassenhove, L. N. (2005). Tire recovery: the RetreadCo case. In S. D. P. Flapper, J. A. E. E. van Nunen, & L. N. Van Wassenhove (Eds.), *Managing Closed-Loop Supply Chains* (pp. 119–128). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-27251-8_11
- Demirel, E., Demirel, N., & Gökçen, H. (2016). A mixed integer linear programming model to optimize reverse logistics activities of end-of-life vehicles in Turkey. *Journal of Cleaner Production*, 112(January 2011), 2101–2113. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.079>
- Dinero, & Entrepreneur. (2018). Tendencias tecnológicas de 2019 para transformar la empresa. Retrieved 4 May 2018, from <https://www.dinero.com/empresas/articulo/tendencias-tecnologicas-de-2019-para-transformar-la-empresa/264963>
- Doku, K. (2016). Colombia importa 5,3 millones de llantas al año: IMLLA. *El Heraldo*.
- Dowlatshahi, S. (2005). A strategic framework for the design and implementation of remanufacturing operations in reverse logistics. *International Journal of Production Research*, 43(16), 3455–3480. <https://doi.org/10.1080/00207540500118118>
- Driedger, R. J. (2002). From Cradle to Grave: Extended Producer Responsibility for Household Hazardous Wastes in British Columbia. *Journal of Industrial Ecology*, 5(2), 89–102. <https://doi.org/10.1162/10881980152830150>
- Dulce, L. (2016). Llantas, aceites y baterías: residuos desaprovechados. *El Espectador*.

- El-Beltagy, E. E.-S. I. (1992). *Scheduling construction projects under multiple resource constraints by heuristic methods*. MSc thesis. Mansoura University.
- Eldan Recycling. (2014). *The Eldan Recycling Scrap Book No. 5*.
- Elmaghraby, S. E. (1978). The Economic Lot Scheduling Problem (ELSP): Review and Extensions. *Management Science*, 24(6), 587–598.
- Ferrão, P., Ribeiro, P., & Silva, P. (2008). A management system for end-of-life tyres: A Portuguese case study. *Waste Management*, 28(3), 604–614. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.033>
- Figuroa, A., Sánchez, A., & Reyes, F. (2007). Caracterización física de un asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada. *Revisa Épsilon*, (9), 41–55.
- Fleischmann, B. (1990). The discrete lot-sizing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 44(3), 337–348. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90245-7](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90245-7)
- Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J. M., & Van Wassenhove, L. N. (2001). The impact of product recovery on logistics network design. *Production and Operations Management*, 10(2), 156–173. <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2001.tb00076.x>
- Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Dekker, R., Van Der Laan, E., Van Nunen, J. A. E. E., & Van Wassenhove, L. N. (1997). Quantitative models for reverse logistics: A review. *European Journal of Operational Research*, 103(1), 1–17. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00230-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00230-0)
- Fleischmann, M., Krikke, H. R., Dekker, R., & Flapper, S. D. P. (2000). A characterisation of logistics networks for product recovery. *Omega*, 28(6), 653–666. [https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(00\)00022-0](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(00)00022-0)
- 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.
- Gómez Correa, L. (2016). Análisis de la viabilidad técnica y financiera de la generación de energía eléctrica a partir del recurso eólico en el municipio de Pereira. Universidad EAFIT.

-
- Gómez, R. A., Correa, A. A., & Herrera, L. S. (2012). Logística inversa, un enfoque con responsabilidad social empresarial. *Criterio Libre*, 10(16), 143–158. <https://doi.org/10.18041/1900-0642/criteriolibre.16.1167>
- Goodyear. (2017). OTR Tires Engineering Data - Info Databook. Retrieved from <https://www.goodyearotr.com/resources/engineering-data>
- Govindan, K., Palaniappan, M., Zhu, Q., & Kannan, D. (2012). Analysis of third party reverse logistics provider using interpretive structural modeling. *International Journal of Production Economics*, 140(1), 204–211. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.01.043>
- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 603–626. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>
- Güesguán, Ó. (2015). El último aliento de Cerro Matoso, la mina de níquel que desaparecería. *El Espectador*.
- Guide, D., & Van Wassenhove, L. N. (2009). The Evolution of Closed-Loop Supply Chain Research. *Independent Review*, 14(3), 363–375. <https://doi.org/10.1287/opre.1080.0628>
- Guide, V. D. R., Kraus, M. E., & Srivastava, R. (1997). Scheduling policies for remanufacturing. *International Journal of Production Economics*, 48(2), 187–204. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(96\)00091-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(96)00091-6)
- Gulfo, J. P., & Reyes, F. L. (2015). *Formulación de una metodología basada en buenas prácticas para aplicabilidad de los materiales y agregados que componen las llantas y su reutilización en procesos en Bogotá bajo los lineamientos del PMI*. Universidad Militar Nueva Granada.
- Hakimi, S. L. (1964). Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations Research*, 12(3), 450–459.
- Hakimi, S. L. (1965). Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems. *Operations Research*, 13(3), 462–475.

- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). *Introducción a la Investigación de Operaciones* (9th ed.). México: McGraw-Hill.
- Institut Choiseul, & KPMG. (2012). *2012 Global Energy Competitiveness Index*. France.
- Ishii, H., & Tada, M. (1995). Single machine scheduling problem with fuzzy precedence relation. *European Journal of Operational Research*, 87(2), 284–288. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)00162-6](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00162-6)
- Jayaraman, V. (2006). Production planning for closed-loop supply chains with product recovery and reuse: an analytical approach. *International Journal of Production Research*, 44(5), 981–998. <https://doi.org/10.1080/00207540500250507>
- Jayaraman, V., Patterson, R. A., & Rolland, E. (2003). The design of reverse distribution networks: Models and solution procedures. In *European Journal of Operational Research*. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00497-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00497-6)
- Kannan, D., Diabat, A., Alrefaei, M., Govindan, K., & Yong, G. (2012). A carbon footprint based reverse logistics network design model. *Resources, Conservation and Recycling*, 67, 75–79. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.03.005>
- Kannan, D., Diabat, A., & Shankar, K. M. (2014). Analyzing the drivers of end-of-life tire management using interpretive structural modeling (ISM). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72(9), 1603–1614. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5754-2>
- Kinshofer. (2017). KINSHOFER - Mobile Shears. Retrieved 3 February 2018, from <https://www.kinshofer.com/en/index.php/en/excavator-applications-6/scrap-processing/mobile-shears>
- Krapp, M., Nebel, J., & Sahamie, R. (2013). Forecasting product returns in closed-loop supply chains. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 43(8), 614–637. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-03-2012-0078>
- Kumar, B. M., & Saravanan, R. (2014). Network Design for Reverse Logistics – A Case of Recycling Used Truck Tires. *Applied Mechanics and Materials*, 592–594, 2677–2688. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.592-594>

594.2677

- Lane, R., & Evans, S. (1995). Solving problems in production scheduling. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 8(2), 117–124. [https://doi.org/10.1016/0951-5240\(95\)00005-E](https://doi.org/10.1016/0951-5240(95)00005-E)
- Lebreton, B. (2007). *Strategic Closed-Loop Supply Chain Management* (Vol. 586). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-38908-8>
- Lebreton, B., & Tuma, A. (2006). A quantitative approach to assessing the profitability of car and truck tire remanufacturing. *International Journal of Production Economics*, 104(2), 639–652. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.11.010>
- Lindhqvist, T. (1992). Extended producer responsibility. In *Extended Producer Responsibility as a Strategy to Promote Cleaner Products* (pp. 1–5).
- Lindhqvist, T. (2000). *Extended producer responsibility in cleaner production: Policy principle to promote environmental improvements of product systems* (Vol. 2000). IIEE, Lund University.
- Llaín, M., Mercado, L., Mogollón, N., Orejarena, L., Oyola, J., & Amaya, R. (2017). *Reciclaje de llantas en el sector minero para el funcionamiento de una planta de energía: una solución con logística inversa*. (Capstone Project). Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia.
- Mahapatra, S., Pal, R., & Narasimhan, R. (2012). Hybrid (re)manufacturing: manufacturing and operational implications. *International Journal of Production Research*, 50(14), 3786–3808. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.588615>
- Malcolm Pirnie Inc. (1991). *Air emissions associated with the combustion of scrap tires for energy recovery. Prepared for the Ohio Air Quality Development Authority, by Malcolm Pirnie, Inc.* Columbus, OH.
- Márquez Díaz, L. G. (2011). Estimación de costos externos marginales de los modos de transporte carretero, fluvial y ferroviario en Colombia. *Ingeniería e Investigación*, 31(1), 56–64.
- Martinez-Alvaro, O., & Herrero-Del-Barrio, P. (2009). Process for Closing Orifices and/or Protecting Structures by Reusing End-Of-Life Tyres - Patent Application.

Spain.

- Mihi, A. (2007). Nuevos beneficios de la logística inversa para empresas europeas y colombianas. *Universidad & Empresa*, 6(12), 48–61.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Llantas Usadas. Retrieved May 25, 2017, from <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/248-plantilla-asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana-sin-galeria-14>
- Ministerio de Minas. (2007). Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE).
- Moder, J. J., Phillips, C. R., & Davis, E. W. (1983). *Project Management with CPM, PERT and Precedence Diagramming*. New York. [https://doi.org/10.1016/0016-0032\(65\)90247-4](https://doi.org/10.1016/0016-0032(65)90247-4)
- Mollenkopf, D. a, & Closs, D. J. (2005). The Hidden Value in REVERSE LOGISTICS. *Supply Chain Management Review*, 9, 34–43.
- Mutha, A., & Pokharel, S. (2009). Strategic network design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product modules. *Computers and Industrial Engineering*, 56(1), 334–346. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.06.006>
- Nenes, G., & Nikolaidis, Y. (2012). A multi-period model for managing used product returns. *International Journal of Production Research*, 50(5), 1360–1376. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.609650>
- New Hampshire Department of Environmental Services. (2011). Scrap Tire Management. Retrieved from <https://www.des.nh.gov/organization/commissioner/pip/factsheets/sw/documents/sw-22.pdf>
- Noticias Caracol. (2015). Cerca de seis millones de llantas son importadas al año en Colombia | Noticias Caracol. Retrieved 27 June 2017, from <https://noticias.caracoltv.com/colombia/cerca-de-seis-millones-de-llantas-son-importadas-al-ano-en-colombia>
- Panagiotidou, S., & Tagaras, G. (2005). End-of-life tire recovery: The Thessaloniki initiative. In S. D. P. Flapper, J. A. E. E. van Nunen, & L. N. Van Wassenhove

- (Eds.), *Managing Closed-Loop Supply Chains* (pp. 183–193). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-27251-8_17
- Park, J., Díaz-Posada, N., & Mejía-Dugand, S. (2018). Challenges in implementing the extended producer responsibility in an emerging economy: The end-of-life tire management in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, *189*, 754–762. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.058>
- Pedram, A., Yusoff, N. Bin, Udoncy, O. E., Mahat, A. B., Pedram, P., & Babalola, A. (2017). Integrated forward and reverse supply chain: A tire case study. *Waste Management*, *60*, 460–470. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.029>
- Pishvaei, M. S., Kianfar, K., & Karimi, B. (2010). Reverse logistics network design using simulated annealing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *47*(1–4), 269–281. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2194-5>
- Portafolio. (2016). Cerrejón, una gigante que no deja de trabajar | Empresas | Negocios | Portafolio. Retrieved 27 June 2017, from <http://www.portafolio.co/negocios/empresas/cerrejon-gigante-deja-155162>
- Rogers, D. S., & Tibben-Lembke, R. S. (1999). *Going Backwards : Reverse Logistics Trends and Practices Going Backwards : Reverse Logistics Trends and Practices*. Reno, NV: Reverse Logistics Executive Council.
- Roghayian, E., & Pazhoheshfar, P. (2014). An optimization model for reverse logistics network under stochastic environment by using genetic algorithm. *Journal of Manufacturing Systems*, *33*(3), 348–356. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.02.007>
- Sasikumar, P., Kannan, G., & Haq, A. N. (2010). A multi-echelon reverse logistics network design for product recovery-a case of truck tire remanufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *49*(9–12), 1223–1234. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2470-4>
- Sheerin, J. (2017). Recycling Mining Tires: The Monster OTR's that Challenge Today's Tire Processors. In B. Gaboriau (Ed.), *Colorado Waste Tire Market Development Conference*. Greenwood Village, CO: Colorado Department of

Public Health and Environment.

- Srivastava, S. K. S. R. K. (2006). Managing product returns for reverse logistics. *Managing Product Returns for Reverse Logistics*, 36(7), 524–546. <https://doi.org/10.1108/09600030610684962>
- Subulan, K., Taşan, A. S., & Baykasoğlu, A. (2015). Designing an environmentally conscious tire closed-loop supply chain network with multiple recovery options using interactive fuzzy goal programming. *Applied Mathematical Modelling*, 39(9), 2661–2702. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.11.004>
- Thierry, M., Salomon, M., Van Nunen, J., & Van Wassenhove, L. (1995). Strategie Issues in Product Recovery Management. *California Management Review*, 37(2), 114–135. <https://doi.org/10.2307/41165792>
- Vargas, O. (2017). Implicaciones del crecimiento poblacional de Colombia en los últimos años. Retrieved 4 February 2018, from <https://www.dinero.com/edicion-impresa/pais/articulo/implicaciones-del-crecimiento-poblacional-de-colombia-en-los-ultimos-anos/250398>
- Vásquez García, J. I. (2013). *Análisis de los informes de sostenibilidad de RSE en las organizaciones Carbones el Cerrejón y Cerro Matoso para los años 2010 y 2011*. Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas.
- Velarde Cantú, J. M., Bueno Solano, A., Lagarda Leyva, E. A., & López Acosta, M. (2017). Optimization of territories and transport routes for hazardous materials in a distribution network. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 10(4 Special Issue), 604–622. <https://doi.org/10.3926/jiem.2107>
- Waste Management World. (2003, July). Scrap tyre recycling.
- Ye, L., Ye, C., & Chuang, Y.-F. (2011). Location set covering for waste resource recycling centers in Taiwan. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 979–985. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.007>