

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA PIROLISIS COMO ALTERNATIVA DE GESTIÓN DE RESIDUOS DE LLANTAS USADAS: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.**



**William Sebastián Peña Urrego**

**UNIVERSIDAD LIBRE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
POSGRADOS EN INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA AMBIENTAL  
2019**

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA PIROLISIS COMO ALTERNATIVA DE GESTIÓN DE RESIDUOS DE LLANTAS USADAS: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.**



**William Sebastián Peña Urrego**

Trabajo de grado para optar el título de Especialista en Gerencia Ambiental

Asesora Técnica

SIBY INES GARCES POLO

Ingeniera Química. Magister en Ingeniería Química. Doctorado en Química Aplicada.

Asesor Metodológico

OSCAR LEONARDO ORTIZ MEDINA

Ingeniero Ambiental. Magister en Gestión Ambiental.

**UNIVERSIDAD LIBRE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
POSGRADOS EN INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA AMBIENTAL  
2019**

## RESUMEN

La disposición final de las llantas es un problema económico, ambiental y de salud pública. La más fácil de realizar es a un relleno sanitario o su almacenamiento en gran cantidad trae el impacto ambiental al paisaje y riesgo de incendio. Por ende, la sociedad dispone de diferentes metodologías para el manejo de llantas usadas, tales como apilamiento, entierro, reencauchamiento y valorización para generación de energía, producción de asfalto y materia prima para nuevos materiales. Una de ellas es la pirolisis que consiste en la aplicación de calor en ausencia de oxígeno para la obtención de subproductos que pueden ser combustibles y materias prima para otros productos.

Por ello, es necesario aplicar las herramientas de producción más limpia, en este caso, el análisis ciclo de vida, el cual consiste en medir cualitativamente las entradas y salidas de materia prima, servicios utilizados durante el proceso de cualquier producto, y determinar los impactos ambientales más significativos, además de la combinación con un análisis *hotspots*, que muestra cuales son los puntos críticos del proceso. Lo que se pretende finalmente es la reducción de dichos impactos, minimizar costos de producción y ampliar el uso de esta tecnología como fuente de energías alternativas.

Este trabajo presenta una revisión bibliográfica en la utilización de la materia prima de las llantas usadas en el proceso de pirolisis aplicando análisis ciclo de vida, dentro de la temática en las líneas de investigación pertinentes, tesis y casos de éxito en aplicaciones actuales, analizando si el proceso es óptimo tanto económica como ambientalmente sostenible.

**PALABRAS CLAVES:** Llantas usadas, pirolisis, análisis ciclo de vida, análisis hotspots.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	2
2. OBJETIVOS .....	3
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
3. JUSTIFICACIÓN.....	4
4. MARCOS DE REFERENCIA.....	5
4.1 MARCO TEORICO .....	5
4.2 MARCO CONCEPTUAL.....	8
4.2.1 Llantas usadas.....	8
4.2.2 Composición y características de las llantas usadas.....	8
4.2.3 Aplicaciones de las llantas usadas.....	11
4.2.3 Impactos ambientales generados por manejo inadecuado de llantas usadas.....	12
4.2.4 Pirólisis en llantas usadas.....	13
4.2.5 Consumo sostenible.....	17
4.2.6 Ciclo de vida de las llantas.....	18
4.3 MARCO LEGAL.....	20
5. METODOLOGÍA.....	23
5.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	23
5.2 DISEÑO METODOLOGICO .....	23

6.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES .....	25
7.	RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	26
8.	CONCLUSIONES.....	27
9.	RECOMENDACIONES.....	28
10.	BIBLIOGRAFIA.....	29

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución del aprovechamiento de la llantas usadas en la cadena de gestión en Bogotá D.C .....	6
Figura 2. Estructura de una llanta de automóvil. ....	9
Figura 3. Proceso de fabricación de la llanta. ....	10
Figura 4. Aplicaciones de las llantas usadas en la actualidad. ....	12
Figura 5. Pasos implicados en el proceso de pirólisis. ....	14
Figura 6. Proceso de pirólisis de llantas como reacción elemental.....	15
Figura 7. Balance masico de componentes en el proceso de pirólisis.....	16
Figura 8. Etapas del ciclo de vida de la llanta.....	19

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición porcentual de materiales para la elaboración de llantas. ....	11
Tabla 2. Productos derivados del proceso de pirolisis, ventajas y desventajas. ....	15
Tabla 3. Comparativa entre ventajas y desventajas del proceso de pirolisis en llantas usadas. ....	17
Tabla 4. Normatividad sobre la gestión de llantas usadas y el análisis ciclo de vida. ....	20
Tabla 5. Diseño metodológico por desarrollar durante el trabajo. ....	24
Tabla 6. Cronograma por desarrollar en cada una de las etapas del proyecto. ....	25
Tabla 7. Matriz de impactos ambientales siguiendo metodología análisis hotspots. ....	26

## INTRODUCCIÓN

El creciente problema de los residuos sólidos derivados de llantas usadas a nivel global se ha convertido en un factor de contaminación al que no se está dando pronta solución, por lo tanto, dichos residuos se acumulan principalmente en la zona de disposición de basuras, aumentando la problemática ambiental. (Cámara de Comercio de Bogotá, 2006) En Colombia, este tipo de residuos se está convirtiendo en un problema a largo plazo ya que según estudios realizados por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial “el aumento de vehículos (automóvil, camioneta, camión y buseta) en el país ha venido incrementándose en los últimos años y por consiguiente el aumento de estos residuos está estimado en 61 mil toneladas al año, resultado del consumo de 4’500.000 llantas durante el mismo periodo”.

Debido a esto, se cuentan numerosos impactos ambientales que se producen por la no correcta disposición de este residuo, tales como contaminación al agua por vertimientos, debido a que el caucho no se degrada fácilmente, lo convierte en receptor de numerosos químicos tóxicos; la contaminación al aire por la combustión incompleta que se produce, que contiene productos químicos carcinógenos y mutagénicos, y finalmente los problemas de salud pública y calidad de vida de la sociedad por la generación de vectores. (Vera, 2016)

Teniendo en cuenta esta problemática el uso o valorización de las llantas usadas es un tema que ha ganado gran interés en los últimos años a nivel mundial. En este sentido, aunque tecnologías como pirólisis y gasificación han sido ampliamente estudiadas para obtener combustibles a partir de este tipo de residuos, son escasos los trabajos que integran a un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para identificar los impactos ambientales asociados a este tipo de procesos y que además entra en sintonía con los requerimientos de gestión ambiental cada vez más exigidos dentro de la normativa internacional como la ISO 14001.



# 1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido al crecimiento vehicular en los últimos años, se da un incremento exponencial en la producción, utilización y desecho de llantas a nivel mundial, generando un gran impacto ambiental. Por ende, se recurre a métodos de eliminación de llantas tales como la incineración o la quema directa a cielo abierto. (Ochoa & Mahecha, 2018)

Además de la contaminación atmosférica, se debe al bajo control y realización de estrategias sobre el manejo, reutilización y aprovechamiento de llantas usadas y la poca intervención de las autoridades ambientales y aquellos involucrados con la compra y venta de llantas. (Frigio, Seggiani, Puccini, & Vitolo, 2014)

Por ello, el consumo continuo de llantas, han llevado a la sociedad a enfrentar un problema bastante serio, la búsqueda de nuevas fuentes de energía renovables surge como una solución a corto plazo, por ello, es necesario hablar tanto de revalorización de productos como de un análisis ciclo de vida que permita establecer hasta qué punto los impactos pueden ser controlados o minimizados, dando así un valor adicional a la obtención de los productos pirolíticos, siendo lo mas posible eficientes y de bajo valor económico. (Haya Leiva, 2016)

## 1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Bajo esta situación, el trabajo va dirigido a preguntarse ¿Es posible que el análisis ciclo de vida sea una herramienta de gestión ambiental que determine los posibles impactos de un proceso como lo es la pirólisis?

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar una recopilación y síntesis de información documental recopilada que permita relacionar los aspectos más relevantes en el análisis de ciclo de vida de la pirólisis de llantas usadas.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Identificar, conceptualizar y relacionar la teoría que integra los conceptos de análisis de ciclo de vida de la pirólisis de llantas usadas.
  
- ✓ Construir una caracterización de los estudios y publicaciones realizados sobre la herramienta del análisis de ciclo de vida de la pirólisis de llantas usadas.
  
- ✓ Analizar sistemáticamente la información a fin de determinar la correlación entre el proceso pirolítico y la gestión de llantas.

### 3. JUSTIFICACIÓN

La sociedad actual consume rápidamente todo producto para que la calidad de vida no se vea alterado ni afectado, por ello, todo producto tiene una corta vida útil; a este ritmo, la tasa de producción de residuos aumenta considerablemente y seguirá a un ritmo alarmante en corto tiempo. De igual manera, con las llantas, la producción va a toda marcha mientras que, en un lapso bastante corto, se convertirá en residuo. (Arregui, Van Der Gryp, & Görgens, 2018)

Hay numerosas alternativas para tratar las llantas usadas, como la recuperación y el reencauchado, se su aplicabilidad es limitada. Por otra parte, el reciclaje no resuelve el problema completamente ya que es un proceso muy costoso económicamente que desencadena productos con características no deseables. (Frigo, Seggiani, Puccini, & Vitolo, 2014)

Por ello la pirólisis, al ser un proceso térmico tecnológico revolucionario, es bastante prometedora, pero, no cumple su rendimiento al cien por ciento, así, es necesario que se realice un análisis ciclo de vida de este proceso, el cual permite obtener resultados sobre cual subproceso es mas critico en cuanto a emisión, vertimiento, consumo energético, etc. (Aranda Usón, López-Sabirón, Ferreira, & Llera Sastresa, 2013)

Finalmente, determinar estos resultados permite que el producto al final del proceso de pirólisis sea revalorizado de una manera correcta y tenga un mercado potencial en un mundo donde los combustibles fósiles están pasando de lado dando lugar a las energías alternativas.

## 4. MARCOS DE REFERENCIA

### 4.1 MARCO TEORICO

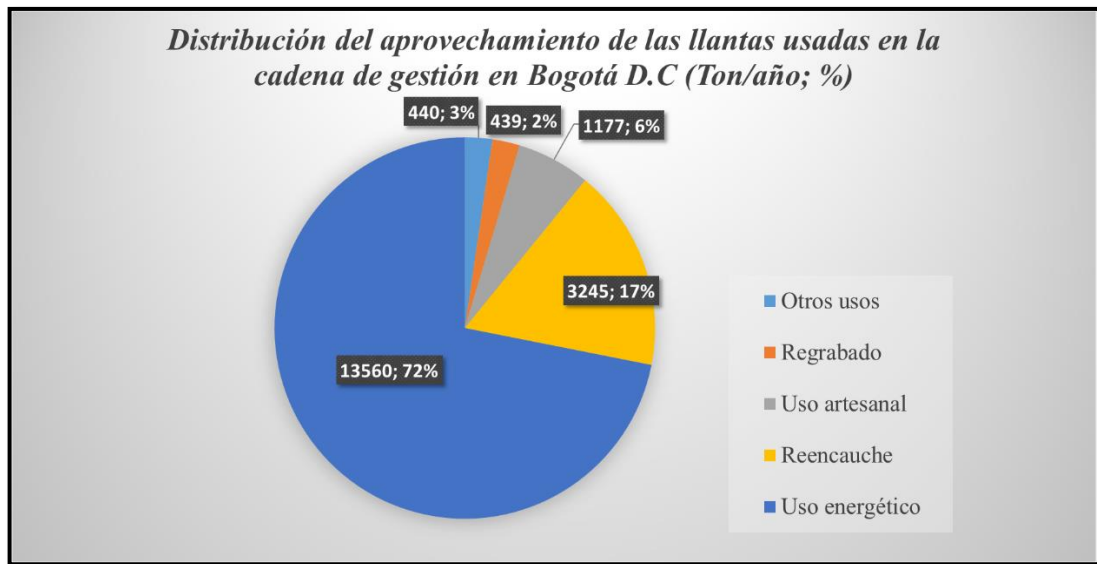
Actualmente, se desechan mas de cien millones de toneladas a nivel mundial por año, esta tipo de residuo no puede ser descompuesto biológicamente ya que tardaría al menos 1000 años para regresar al entorno natural. Debido a esto, el reciclaje de llantas es de vital importancia por:

- ✓ La protección del medio ambiente.
- ✓ La conservación de las energías tradicionales; ya que básicamente la llanta esta hecha de derivados de petróleo, esta tiene un alto poder calorífico, lo cual permite la exploración para la generación de nuevos combustibles. (Ospina & Villada Gil, 2011)

Esta estimado que en la Unión Europea se genera alrededor de 2.5 millones de toneladas al año, 2.5 millones de toneladas en Estados Unidos y aproximadamente 1 millón de toneladas en Japón. Solo en Estados Unidos, 266 millones de llantas en desuso es un problema de carácter social, en este país, el 75% es utilizado como combustible, mientras que el 15% restante se desaprovecha, llegando a los rellenos sanitario generando la contaminación respectiva. (Amari et al., 1999)

En Colombia, se realizo un diagnostico ambiental sobre el manejo de las llantas usadas generadas por los vehículos. Inicialmente incluyo la problemática del residuo, los usos actuales en la ciudad de Bogotá D.C y culmino con una investigación sobre posibles aplicaciones de acuerdo con casos exitosos registrados internacionalmente. (Ospina & Villada Gil, 2011). En la figura 1, se explica la distribución del aprovechamiento de las llantas usadas en la cadena de gestión en Bogotá D.C en el año 2000.

Figura 1. Distribución del aprovechamiento de las llantas usadas en la cadena de gestión en Bogotá D.C



Fuente: (Unión temporal OCODE LTDA et al., 2010)

A partir de la figura, se establecieron cuatro alternativas de solución:

1. Aprovechamiento energético y de materia prima para la industria cementera.
2. Utilización de llantas usadas como materia prima para la producción de pavimento asfáltico.
3. Optimización del material de caucho como materia prima para la obtención de alfombras y fabricantes de pisos.
4. Aprovechamiento energético en termoeléctricas, usando el poder calorífico para generar energía eléctrica.

Basándose en análisis desde los aspectos económicos, sociales y ambientales se estableció que la tercera alternativa es la mas factible para la gestión de este tipo de residuos en la ciudad de Bogotá D.C (Unión temporal OCODE LTDA et al., 2010)

De igual manera, se ha determinado que tanto los productores como importadores, son económica y físicamente responsables del ciclo de vida de una llanta usada, legalmente esta establecido en la resolución 1457 que ambas partes interesadas deben contar con obligaciones física y operacionales

para el manejo adecuado de llantas hasta el final de su vida útil durante las etapas de recolección, transporte, tratamiento y procesamiento. Por ende, deben presentar e implementar un sistema de gestión de residuos que cumpla con la disposición final a este tipo de residuos, además de financiar el esquema sin costos a los consumidores. También se contempla que deben estar a cargo del diseño y pago de programas de educación y su posterior divulgación pública informando a los consumidores sobre su devolución. (Park, Díaz Posada, & Mejía Dugand, 2018)

Así, se estableció una entidad legal llamada Organización del productor Responsable (PRO). La empresa más grande, Rueda Verde, cuenta con aproximadamente 84 importadores que cubren el 90% de la cuota de mercado. (Suarez, 2016)

Comúnmente, se le conoce a este caso como uno de “responsabilidad compartida” en donde cada actor de la cadena es una pieza de gestión del residuo, tal como se establece en (Cámara de Comercio de Bogotá, 2006).

- ✓ Fabricante como el que elabora el producto, que desde su política ambiental pretende implementar las estrategias para la recolección, almacenamiento y procesamiento final.
- ✓ El distribuidor, a parte de entregar el producto, colabora con la recepción del residuo mientras se entrega a una empresa gestora de este.
- ✓ Los generadores de residuos, en este caso, todo el parque automotor que dentro de su responsabilidad ambiental entregan el residuo a los distribuidores o a la misma empresa gestora.
- ✓ Finalmente, las empresas gestoras se encargan de emplear el residuo para la elaboración de materia prima, aunque principalmente, se dan casos de que es la misma empresa fabricante de la llanta.

## **4.2 MARCO CONCEPTUAL**

### **4.2.1 Llantas usadas.**

La disposición final de este tipo de residuos ha llegado a ser un serio problema a nivel técnico, económico, ambiental y de salud pública. Tal como afirma (Vera, 2016) “las llantas son difíciles de compactar en un relleno sanitario, haciendo este proceso costoso y presentando además el inconveniente de que ocupan mucho espacio. Su almacenamiento en grandes cantidades provoca problemas estéticos y riesgo de incendios difíciles de extinguir.” De igual manera, según (Cámara de Comercio de Bogotá, 2006) se debe entender que para su fabricación necesitan de materias primas y procesos industriales además de cierto aditivos que implican impactos ambientales potenciales. Por ello, es necesario revisar la cantidad de materias primas requeridas para su fabricación, con el propósito de maximizar su vida útil, beneficiando al usuario final permitiendo el cambio mínimo de neumáticos ampliando las distancias recorridas a bajo costo, y principalmente al medio ambiente, disminuyendo los requerimientos de materia prima y los residuos del producto final que se den a disponer.

Además, usar este tipo de residuo como combustible en hornos que no cuentan con la tecnología adecuada, genera graves impactos ambientales debido a las emisiones tóxicas producto de la combustión incompleta y de la ausencia de los sistemas de lavado de gases y retención de material particulado. (Vera, 2016)

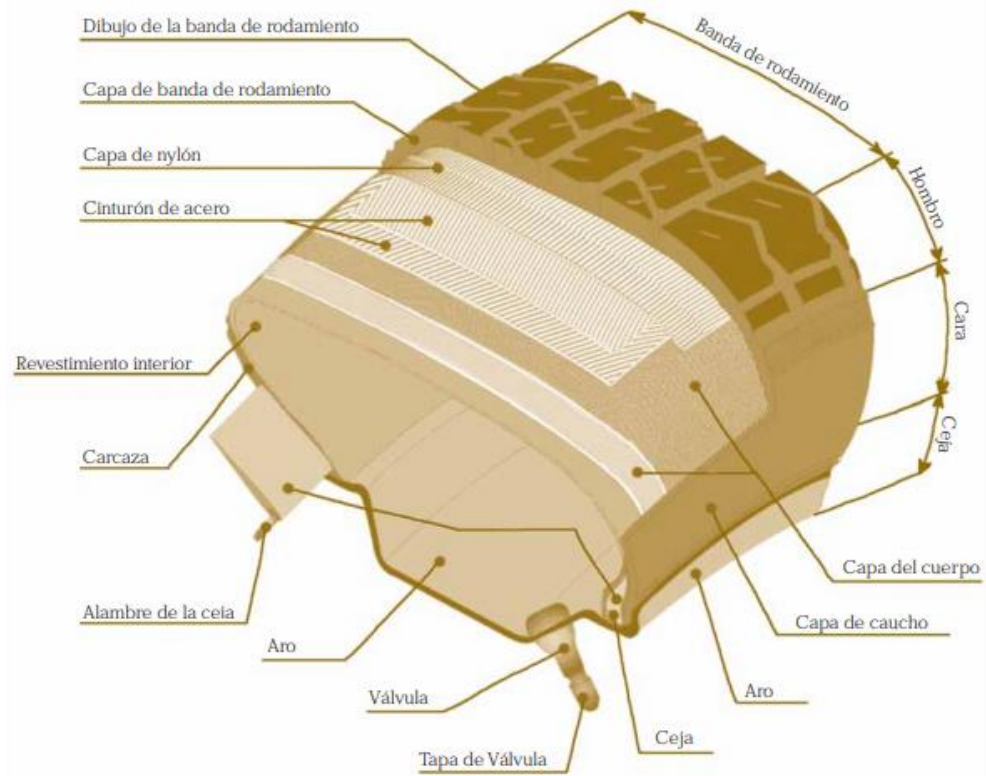
### **4.2.2 Composición y características de las llantas usadas.**

El principal componente de la llanta es el caucho, la cual representa la mitad de su peso. Se establece que este es de diferentes tipos:

- Caucho natural
- Estireno butadieno
- Polibutadieno
- Polisoprenos sintéticos.

En la figura 2, se explica con detalle las partes dentro de la estructura de una llanta.

Figura 2. Estructura de una llanta de automóvil.

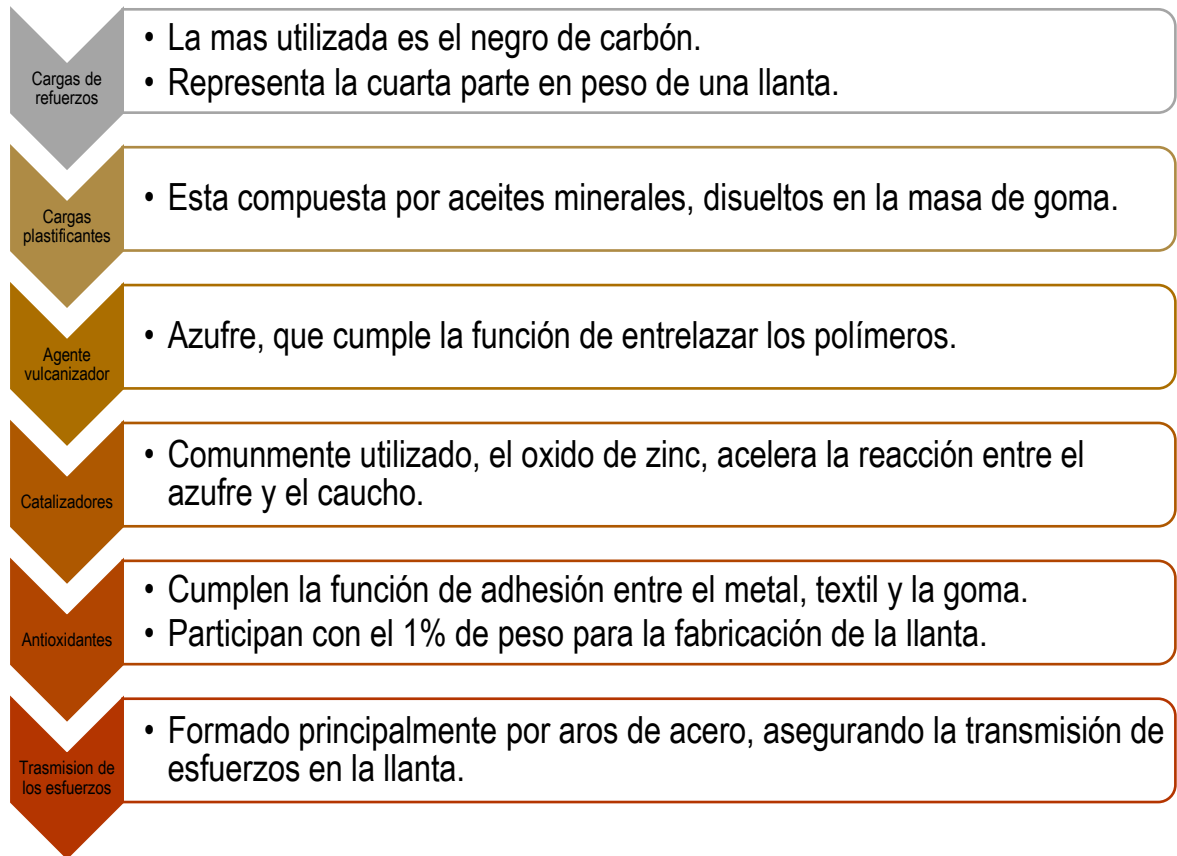


Fuente: (Cámara de Comercio de Bogotá, 2006)

A continuación, se explica el proceso de elaboración de la llanta y sus componentes.



Figura 3. Proceso de fabricación de la llanta.



Fuente: (Autor, 2019)

Además, se explica la composición porcentual de material que se necesita para la elaboración de una llanta, ya sea para uso automóvil particular o camiones con más de 6 ejes.

Tabla 1. Composición porcentual de materiales para la elaboración de llantas.

<b>Material</b>	<b>Composición (%)</b>	
	<b>Automóviles</b>	<b>Camiones</b>
Caucho natural	14	27
Caucho sintético	27	14
Negro de humo	28	28
Acero	14	15
Antioxidantes y rellenos	17	16

Fuente: (Cámara de Comercio de Bogotá, 2006).

#### **4.2.3 Aplicaciones de las llantas usadas.**

A pesar de los desafíos técnicos y económicos competentes al reciclaje de llantas, la generación de residuos es superior a su producción, por ende, es necesario buscar soluciones para aplicar este tipo de residuos. (Peláez , Velásquez , & Giraldo , 2017)

A continuación, se explica brevemente las aplicaciones de llantas usadas reportadas en la revisión bibliográfica pertinente.

Figura 4. Aplicaciones de las llantas usadas en la actualidad.



Fuente: (Peláez , Velásquez , & Giraldo , 2017)

#### 4.2.3 Impactos ambientales generados por manejo inadecuado de llantas usadas.

Actualmente, las llantas no están consideradas dentro de un residuo peligroso, pero, al estar compuesta por un sinfín de sustancias peligrosas para la salud humana, pueden ser mortales tanto para el ambiente como a la calidad de vida si no se da un buen manejo.

- Quema a cielo abierto: las emisiones producidas por la quema indebida incluyen contaminantes peligrosos tales como hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs), dioxinas, furanos,

cloruro de hidrogeno, benceno, bifenilos policlorados (PCBs) y metales pesados como cadmio, níquel, zinc, mercurio, cromo y vanadio. (Cámara de Comercio de Bogotá, 2006) además, las exposiciones ya sean agudas o crónicas a la población van a incurrir en síntomas como irritación de la piel, ojos, mucosas, efectos respiratorios y cáncer.

- Almacenamiento inadecuado: esta se divide en cuatro impactos sinérgicos a este, como la proliferación de vectores como mosquitos debido al estancamiento de aguas lluvias, riesgos de incendios y derrumbes en lugares donde se aplican gran cantidad de llantas de manera inadecuada y deterioro del paisaje por el anterior impacto. (Cámara de Comercio de Bogotá, 2006)

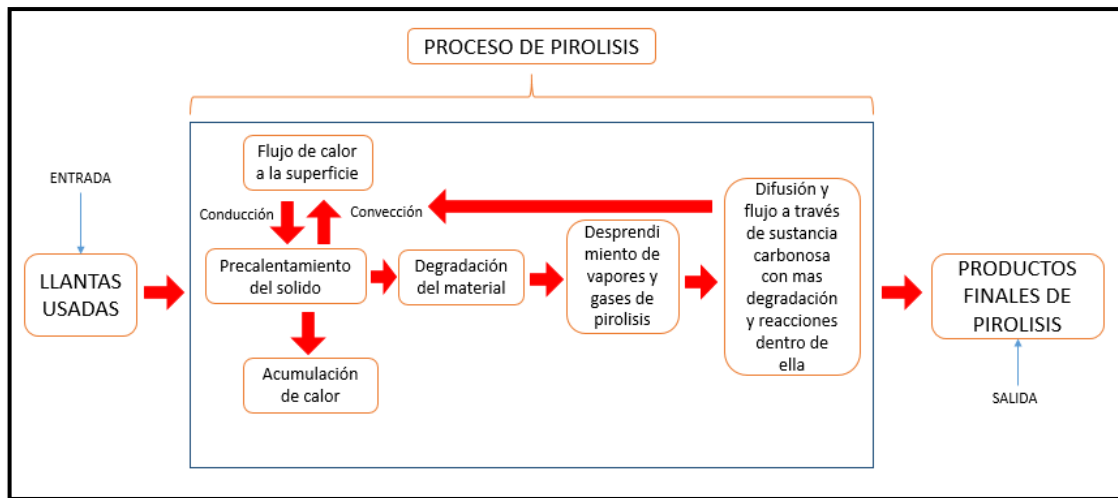
#### **4.2.4 Pirólisis en llantas usadas.**

Se considera como un proceso termoquímico en ausencia de oxígeno, donde se degrada térmicamente cualquier objeto de estudio, y no hay existencia alguna de agentes oxidantes, se utiliza para producir varios productos tales como combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Por ende, este proceso ofrece varias oportunidades de conversión de residuos con alto contenido de carbono en su estructura química. (Castro, 2018)

Como se explicó, se realiza en una atmosfera completamente anaerobia, en donde usualmente, se utilizan gases inertes como N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, He, Ar, etc., y a determinadas condiciones de temperatura, velocidad de calentamiento del material, contenido atmosférico durante el proceso, presión y tamaño de partícula del material a ser utilizado, para producir los productos ya nombrados, los cuales contienen un alto contenido energético y que dependiendo de otros procesos adicionales, pueden ser utilizados como combustibles para la generación de energía y calor. (Castro, 2018)

En la figura 5, se explica con detalle el proceso de pirólisis desde la entrada de la llanta usada, hasta la obtención de los productos pirolíticos.

Figura 5. Pasos implicados en el proceso de pirólisis.

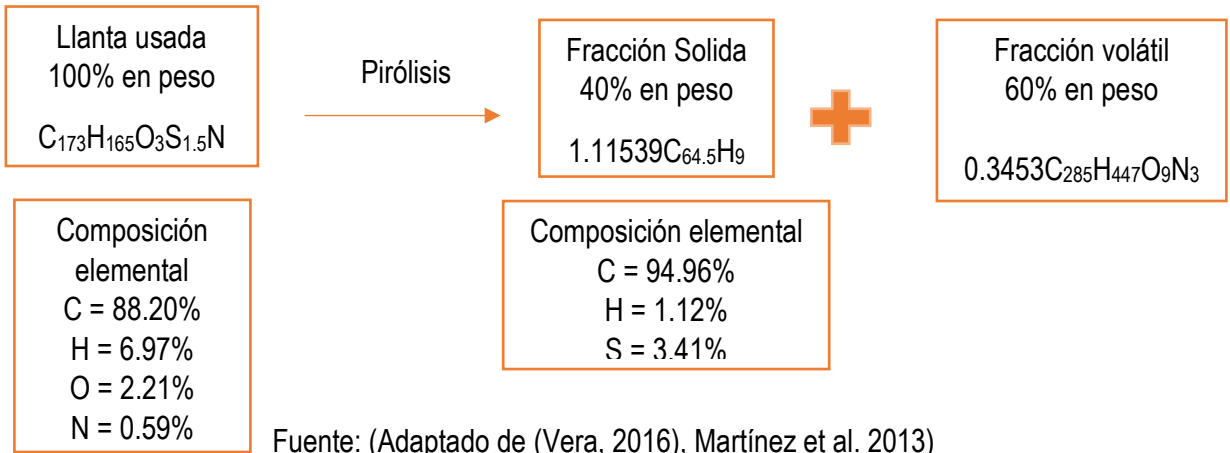


Fuente: Adaptado de Niessen, 1978

Dentro del proceso de pirólisis en llantas usadas, se determina que se disminuyen las emisiones de gases contaminantes tales como SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y COV (compuestos orgánicos volátiles) en comparación con la técnica de incineración. Su desventaja principal es que el plomo y sales de cadmio usados como agentes estabilizadores en la fabricación de la llanta permanece al final del proceso como cenizas, originando problemas de eliminación, a priori, mayor cantidad de gases SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S. (Ospina & Villada Gil, 2011)

A continuación, se explica el proceso pirolítico de llantas y su contenido porcentual de elementos.

Figura 6. Proceso de pirólisis de llantas como reacción elemental.



En la tabla 2, se describen los productos obtenidos del proceso de pirólisis en llantas usadas, sus ventajas y desventajas.

Tabla 2. Productos derivados del proceso de pirólisis, ventajas y desventajas.

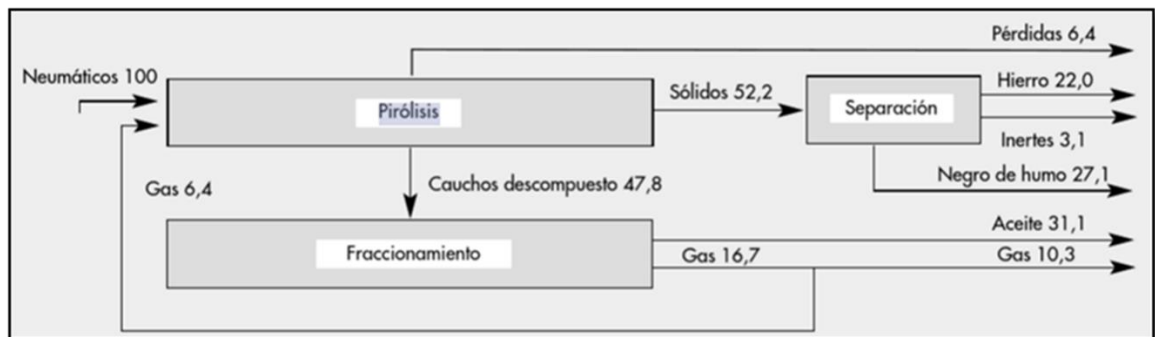
Productos	Definición	Ventajas	Desventajas
<b>Gas</b>	Constituye principalmente de hidrogeno, metano, etano, eteno, propano, propeno, butano, butadieno, dióxido de carbono, monóxido de carbono, y sulfuro de hidrogeno.	Sus componentes pueden ser fácilmente separados y utilizados en diferentes procesos.	Cantidad de gas y producción de hidrogeno aumenta con las altas temperaturas.
<b>Líquido pirolítico</b>	Mezcla de gasolina, kerosene, gasoil, gasoil pesado y residuo.  Fracción pirolítica más abundante (20-55%).	Potencial de combustible o materia prima para otros productos químicos.  Plantas especializadas obtienen sus beneficios de valor añadido entre la producción y destilación del derivado pirolítico.	Alto contenido de S, lo cual debe ser desulfurizado, aumentando costos de producción.  Impide la aplicación directa como combustible, necesario procesamiento por su alto contenido de azufre

<b>Carbón (negro de humo)</b>	Producida en proporción de 22 – 49% según composición de negro de humo de la llanta.	Al usar vapor o CO <sub>2</sub> , crea carbón activado lo cual podría ser utilizado en procesos de filtración. Empleado como refuerzo para caucho.	Someter a tratamiento de desmineralización, aumentando costos de producción y capital.
-------------------------------	--	--	--

Fuente: (Autor, 2019)

Finalmente, se describe el balance masico, desde su entrada como la llanta usada, desde el caucho hasta el acero, no tiene una vía de valorización más factible, aparte de la incineración.

Figura 7. Balance masico de componentes en el proceso de pirólisis.



Fuente: (Castells & Velo, 2012)

En la tabla 3, se describe las ventajas y desventajas del proceso de pirólisis en llantas usadas.

Tabla 3. Comparativa entre ventajas y desventajas del proceso de pirolisis en llantas usadas.

Ventajas de la pirolisis de llantas usadas	Desventajas de la pirolisis de llantas usadas
Mayor separación de impurezas, como el azufre.	La temperatura no se distribuye uniformemente, en ultimas, se desvaloriza su viabilidad técnica y económica.
Menor generación de HAP, ya que durante el proceso se convierte en dos productos, sólido y fracción volátil.	Sus productos son muy complejos, que si se aplicara combustión o gasificación.
La liberación de HAP produce menor cantidad de CO <sub>2</sub>	No es un proceso aceptado en la industria alternativo a la combustión natural.
Esta tecnología genera menos impactos de contaminación al aire, ya que el producto gas se quema como combustible.	Ausencia de un mercado para sus productos derivados.
La ausencia de oxígeno inhibe la formación de dioxinas y furanos.	Su viabilidad económica depende del empleo que se les dé a sus tres productos primordiales.

Fuente: (Vera, 2016) (Adaptado de Hita et al., 2016)

#### 4.2.5 Consumo sostenible.

El objetivo principal es la generación de herramientas que permitan minimizar el desperdicio y consumo innecesario de cualquier objeto, garantizando su correcta disposición cuando finaliza su vida útil.

Aquí en donde interviene el modelo económico actual donde el consumo masivo implica un uso exagerado de materias primas y su posterior aumento de residuos, el cual no es compatible con el desarrollo sostenible que permitan el progreso económico de la sociedad, dando como resultado un desequilibrio en la conservación y protección de los recursos naturales. (Castells & Velo, 2012)

Actualmente, las políticas gubernamentales limitan el respeto por el medio ambiente por el simple hecho de que el consumismo es el motor económico de un país, por ello, las autoridades ambientales incluyen normativas que son muy flexibles frente a esta situación. Por ello, la única oportunidad de cambio viene desde el individuo social



y ambientalmente responsable, buscando cambios en las conductas sociales alterando el pensamiento de las grandes masas. (Unión temporal OCODE LTDA et al., 2010)

Según (Cámara de Comercio de Bogotá, 2006), la principal metodología utilizada dentro de cualquier ámbito ya sea en el hogar, trabajo o área empresarial son las 4-R.

- Rechazar: concepto que es confundible a la primera vez, pero lo que indica es no adquirir productos que dentro de sus procesos de fabricación no tengan implicaciones ecológicas. Es de vital importancia reconocer que el consumidor reconozca los productos que son amigables con el ambiente y las políticas de responsabilidad ambiental de la empresa.
- Reducir: Con menor consumo se reduce los recursos naturales para su producción, es necesario identificar lo que necesitamos y estar consciente del impacto ambiental al desechar dicho producto.
- Reutilizar: la utilización al máximo del producto, usarlo en otras actividades, evitando el consumo de productos nuevos.
- Reciclar: es la recuperación del residuo usando diferentes técnicas, con el fin de introducirlo de nuevo en la cadena productiva.

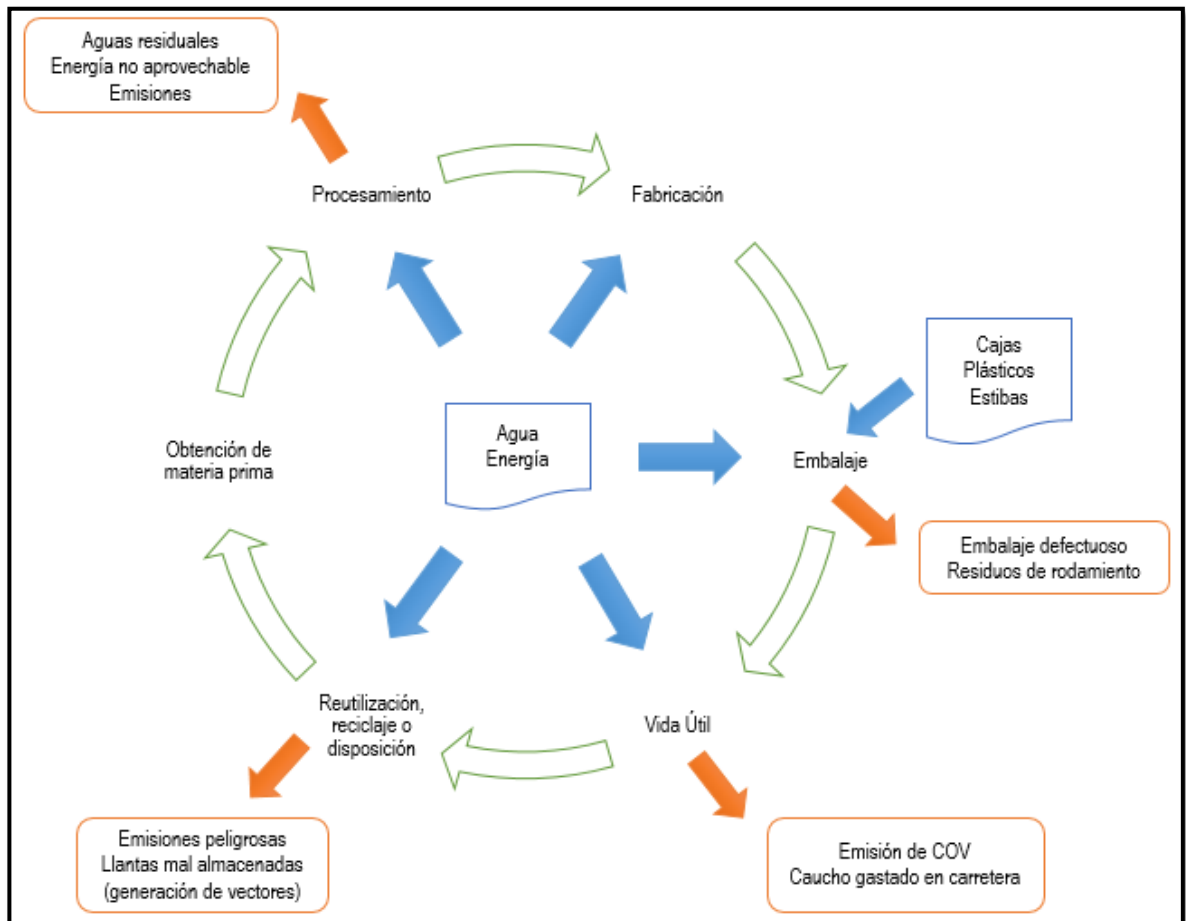
#### **4.2.6 Ciclo de vida de las llantas.**

Este está enfocado en los procesos para la producción final del objeto de estudio, en este caso la llantas requieren desde el uso de materias primas e insumo, de igual forma, se analiza que tanto entradas que son los insumos y servicios para la fabricación, y salidas que generan residuos que afectan negativamente el entorno. (Dommett, 2008)

Adicionalmente, la aplicación de metodologías de producción más limpia pertinentes a este proceso se limita a los proveedores de materias primas de los fabricantes del producto. Finalmente, se determina que la sociedad debe influir en la toma de decisión de las últimas etapas de este ciclo. (Dommett, 2008)

A continuación, se relaciona el ciclo de vida de la llanta, y sus entradas y salidas correspondientes.

Figura 8. Etapas del ciclo de vida de la llanta.



Fuente: Adaptado de (Cámara de Comercio de Bogotá, 2006)

### 4.3 MARCO LEGAL

A continuación, se presenta la normatividad ambiental presente relacionada con el uso y disposición de las llantas usadas y la herramienta análisis ciclo de vida pertinentes a este tipo de residuo.

En la tabla 4, se explica la normatividad pertinente al manejo y gestión de llantas y el análisis ciclo de vida.

Tabla 4. Normatividad sobre la gestión de llantas usadas y el análisis ciclo de vida.

Tipo	Número	Año	Contenido
Resolución	2309	1986	Regula lo relacionado con el manejo, uso, disposición y transporte de residuos sólidos.
Política	N/A	1997	Política Nacional de Producción más Limpia.
Decreto	1505	2003	Se modifica parcialmente el decreto 1713 de 2002 con relación a los planes de gestión integral de residuos sólidos.
Resolución	1045	2003	Se adopta la metodología para la elaboración de los planes de gestión integral de residuos PGIRS
Resolución	1488	2003	Por la cual se establecen los requisitos, las condiciones y los límites máximos permisibles de emisión, bajo los cuales se debe realizar la disposición final de llantas usadas y nuevas con desviación de calidad, en hornos de producción de clinker de plantas cementeras.
Resolución	182087	2007	Por la cual se modifican los criterio de calidad de los biocombustibles para su uso en motores diésel como componente de la mezcla con el combustible diésel de

			origen fósil en procesos de combustión.
Conpes	3510	2008	Lineamientos de política para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia.
Resolución	1457	2010	Se establecen los sistemas de recolección selectiva, y de gestión ambiental de llantas usadas.
Resolución	6981	2011	Se encuentran los lineamientos para el aprovechamiento de llantas y neumáticos usados, y llantas no conforme en el Distrito Capital. Art. 5 y 6: destacan los usos permitidos para el aprovechamiento de llantas y neumáticos usados, así como las prohibiciones para su manejo.
Resolución	0325	2012	Por la cual se aprueba un sistema de recolección selectiva y gestión ambiental de residuos de llantas usadas y se adoptan otras determinaciones.
Ley	1715	2014	Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional.
Resolución	1470	2014	Por la cual se modifica la resolución 0325 de 2012 y se toman otras determinaciones.
Decreto	442	2015	Crea el programa de aprovechamiento y valorización de llantas usadas en el distrito capital.

Resolución	2875	2015	Por la cual se modifica el artículo 20 de la resolución 481 de 2009 del ministerio de comercio, industria y turismo. Donde expide que los productores de llantas deben presentar al ANLA, un informe sobre el desarrollo del sistema de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas.
Resolución	1326	2017	Por la cual se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas y se dictan otras disposiciones.
Norma técnica colombiana	14040	2007	Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y Marco de Referencia.
Norma técnica colombiana	5334	NTC	Esta norma establece los términos y las definiciones usadas para el reencauche de llantas.
Norma técnica colombiana	1675	NTC	Esta norma establece los requisitos que debe cumplir el coque metalúrgico en sus aplicaciones principales.

Fuente: (Autor, 2019)

## **5. METODOLOGÍA**

### **5.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN**

Inicialmente, este trabajo toma el tipo de investigación teórica, la cual consiste en el compilado de conocimientos, sin tener en cuenta su aplicabilidad, y a partir de estos, establecerse a futuro otro tipo de investigaciones. En resumidas palabras, es una línea base fundamental del desarrollo de análisis ciclo de vida para el proceso de pirolisis para el desarrollo de otros trabajos.

Además, a partir de los conocimientos obtenidos y las investigaciones realizadas, se realiza un análisis si dicho proceso influye directamente como alternativa viable para la gestión de llantas; y toma como segunda parte, una investigación exploratoria, la cual consiste en un acercamiento puramente empírico a la teoría, permitiendo a investigaciones posteriores traten un análisis elemental de la temática tratada en este trabajo. Lo que se busca es que este documento sea un análisis de la problemática de gestión de este tipo de residuos y su posible solución.

### **5.2 DISEÑO METODOLOGICO**

Se realizó una revisión a profundidad de los textos, información general, trabajos de grado, e investigaciones asociadas al análisis ciclo de vida de la pirolisis dentro del contexto de las llantas usadas, siendo estas disponibles en las bases de datos y en internet. Esta información es comparada con el fin de evidenciar tendencias en cuanto al desarrollo del ACV y líneas de investigación para llegar a posibles resultados de búsqueda de oportunidades para la gestión de las llantas. A continuación, se describe en la tabla el desarrollo del trabajo.

Tabla 5. Diseño metodológico por desarrollar durante el trabajo.

Objetivo general	Objetivos específicos	Actividades	Productos
<b>Realizar una recopilación y síntesis de información documental recopilada que permita relacionar los aspectos más relevantes en el análisis de ciclo de vida de la pirólisis de llantas usadas.</b>	Identificar, conceptualizar y relacionar la teoría que integra los conceptos de análisis de ciclo de vida de la pirólisis de llantas usadas.	Revisión bibliográfica de todos los documentos pertinentes al análisis ciclo de vida en pirólisis de llantas usadas.	Línea base inicial sobre la pirólisis en llantas usadas y su ciclo de vida.
	Construir una caracterización de los estudios y publicaciones realizados sobre la herramienta del análisis de ciclo de vida de la pirólisis de llantas usadas.	Análisis inicial de la pirólisis en llantas usadas y análisis ciclo de vida para este proceso.	Estado del arte del análisis ciclo de vida en el proceso de pirólisis.
	Analizar sistemáticamente la información a fin de determinar la correlación entre el proceso pirolítico y la gestión de llantas.	Diseño de matriz que permita explicar los puntos críticos en el análisis ciclo de vida de la pirólisis.	Análisis hotspot de los puntos críticos en el proceso de pirólisis y el ciclo de vida de la llanta.

Fuente: (Autor, 2019)

## 6. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

A continuación, se describen los objetivos y su desarrollo a través del tiempo para el presente trabajo.

Tabla 6. Cronograma por desarrollar en cada una de las etapas del proyecto.

Objetivos	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Identificar, conceptualizar y relacionar la teoría que integra los conceptos de análisis de ciclo de vida de la pirólisis de llantas usadas.				
Construir una caracterización de los estudios y publicaciones realizados sobre la herramienta del análisis de ciclo de vida de la pirólisis de llantas usadas.				
Analizar sistemáticamente la información a fin de determinar la correlación entre el proceso pirolítico y la gestión de llantas				

Fuente: (Autor, 2019)



## 7. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

Como se pudo observar, a lo largo de la revisión bibliográfica, denota que el proceso de pirólisis incluye unas fases en donde se identificaron los siguientes impactos, estos están definidos en la tabla 7.

Tabla 7. Matriz de impactos ambientales siguiendo metodología análisis hotspots.

	ENTRADAS			SALIDAS			
	Energía	Materia Prima	Agua	Emisiones Atmosféricas	Residuos solidos	Vertimientos	
Llantas usadas	Crítico	Moderado	Menor	Crítico	Moderado	Moderado	
Proceso pirólisis	Crítico	Menor	Menor	Crítico	Moderado	Moderado	
Gas	Crítico	Moderado	Menor	Crítico	Menor	Menor	Crítico
Líquido pirolítico	Crítico	Moderado	Menor	Moderado	Moderado	Crítico	Significativo
Carbón (negro de humo)	Moderado	Menor	Moderado	Moderado	Crítico	Moderado	Moderado

Fuente: (Autor 2019)

Se puede observar que, mediante el análisis hotspot, en las entradas, el impacto ambiental más crítico es el de la energía, ya que, durante la fabricación, el mismo proceso pirólítico, la formación del subproducto gaseoso necesita mucha energía en forma de aumento de temperatura, dentro del mismo proceso que realizan las máquinas para la fusión de los materiales.

Mientras tanto, el menor impacto producido se da en el consumo de agua, ya que, dentro de la calidad del producto, al aumentar la temperatura, disminuye la humedad dentro, y de igual manera, en la formación del gas, al no haber oxígeno no se puede formar vapor de agua.

También se observa que en las salidas, las emisiones atmosféricas son un punto crítico porque la generación tanto de gases tóxicos como de material particulado se mantiene a lo largo del ciclo de vida de la llanta, adicionalmente, si el proceso de pirólisis no se controla perfectamente, se pueden producir fugas, las cuales, al entrar en contacto con el aire, produce combustión incompleta, generando gases contaminantes que alteran el entorno y la salud humana.

## 8. CONCLUSIONES

El crecimiento económico conlleva directamente al aumento de materiales no biodegradables que afectan el medio ambiente, y, por tanto, la calidad de vida de la sociedad. Las llantas son un problema de carácter urgente y su optimización es de vital importancia para reducir la contaminación y el consumo de combustibles fósiles. Este trabajo presentará una revisión bibliográfica del método de valorización energética más rentable para este tipo de residuos, según los estudios pertinentes y líneas de investigación en desarrollo; de igual manera, se evidencia que los resultados de esta investigación tienen alta relevancia científica, tanto por el problema ambiental originado de las llantas como por las diferentes utilidades de subproductos derivados del proceso de pirólisis como fuente de energías alternativas.

Al utilizar dicho proceso, se presentan ventajas considerable tales como:

- ✓ No es contaminante y dentro de su combustión interna permite la eliminación de las sustancias orgánicas nocivas que alteran la calidad de vida del ser humano y el entorno.
- ✓ El volumen de llantas usadas se reduce en más del 90%, permitiendo así su recuperación y posterior uso como combustible o materia prima.

Finalmente, esta investigación contribuye al desarrollo de un proyecto de investigación en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Libre, relacionado con la obtención de biocombustibles a partir de diversas biomásas y sus mezclas con llantas usadas a través de la pirólisis y su impacto energético como fuente de energía renovable, dando un valor agregado los resultados de este trabajo.

## 9. RECOMENDACIONES

A partir de los resultados de este trabajo, y posteriores investigaciones que se hagan del tema, es inevitable encontrar que las naciones del hemisferio norte del planeta llevan la delantera en cuanto al desarrollo tecnológico para este tipo de procesos tecnológicos, tanto para la optimización y el aprovechamiento de este tipo de residuos. Mientras que, en Colombia, la utilización de los productos derivados es principalmente como materia prima para la elaboración de suelas de zapatos, canchas sintéticas o aditivo para pavimentación con asfalto, en muy pocas ocasiones las industrias toman provecho de los productos derivados del proceso pirolítico.

Esto conlleva a la investigación de nuevas tecnologías como la pirolisis la cual ayudaría enormemente a reducir los residuos de llantas usadas, contribuyendo a disminuir el consumo de energías provenientes de combustibles fósiles.

No hay que desprestigiar el uso de las herramientas de producción más limpia, en este caso el análisis ciclo de vida es una ayuda muy útil para cualquier empresa, en el proceso pirolítico, permite identificar diversos puntos críticos de impactos ambientales en cada uno de los pasos.

Aunque la tecnología de pirolisis sea muy costosa y produzca un combustible pirolítico que es difícil de separar debido a sus componentes, los estudios futuros permitirán buscar alternativas que traten de conseguir más fácilmente dichos químicos, con lo cual, no se tendrá que recurrir a combustibles fósiles, ahorrando costos y minimizando impactos ambientales.

## 10. BIBLIOGRAFIA

- Amari et al. (1999). Resource recovery from used rubber tires. *Resources Policy*, 179-188.
- Aranda Usón, A., López-Sabirón, A., Ferreira, G., & Llera Sastresa, E. (2013). Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options. *Elsevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 242-260.
- Arregui, I., Van Der Gryp, P., & Görgens, J. (2018). A review on the demineralisation of pre- and post-pyrolysis biomass and tyre wastes. *Elsevier, Waste Management*, 667-688.
- Cámara de Comercio de Bogotá. (Octubre de 2006). *Guía para el manejo de llantas usadas*. Bogotá, D.C., Colombia: Editorial Kimpres Ltda.
- Cantanhede, A., & Monge, G. (Diciembre de 2002). *Estado del arte del manejo de llantas usadas en las Américas*. Obtenido de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/cd24/manejo.pdf>
- Castells, X., & Velo, E. (2012). Tratamiento y valorización energética de residuos. En *La pirólisis*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- Castro, D. (2018). *Evaluación del proceso de pirólisis aplicado al material lignocelulósico residual proveniente del pino patula en atmosfera de dióxido de carbono (Tesis de pregrado)*. Universidad Libre, Bogotá D.C, Colombia.
- Çengel, Y., & Boles, M. (2015). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. USA: McGraw-Hill.
- Dommett, L. (2008). *An introduction to Life Cycle*. Obtenido de Wiley InterScience: [www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com)
- Friego, S., Seggiani, M., Puccini, M., & Vitolo, S. (2014). Liquid fuel production from waste tyre pyrolysis and its utilisation in a Diesel engine. *Elsevier, Fuel*, 399-408.
- Gyung-Goo, C., Su-Hwa, J., Seung-Jin, O., & Joo-Sik, K. (2014). Total utilization of waste tire rubber through pyrolysis to obtain oils and CO<sub>2</sub> activation of pyrolysis char. *Elsevier, Fuel Processing Technology*, 57-64.

- Haya Leiva, E. (2016). *Análisis de Ciclo de Vida*. Obtenido de EOI Escuela de Organización Industrial: <http://www.eoi.es>
- Hita, I., Arabiourrutia, M., Olazar, M., Bilbao, J., Arandes, J., & Castaño, P. (2016). Opportunities and barriers for producing high quality fuels from the pyrolysis of scrap tires. *Elsevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 745-759.
- Jang et al. (1999). Discarded tire recycling practices in the United States, Japan and Korea. *Resources, Conservation and Recycling*, 14-19.
- Li, W., Bai, H., Yin, J., & Xu, H. (2016). Life cycle assessment of end-of-life vehicle recycling processes in China - take Corolla taxis for example. *Elsevier, Journal of Cleaner Production*, 176-187.
- Mancheno, M., Arévalo, P., Romero, J., Malo, I., Matute, D., & Ramos, R. (2017). Análisis fisicoquímico de combustibles líquidos obtenidos en el proceso de pirólisis de caucho vulcanizado. *La granja: Revista de ciencias de la vida*, 106-118.
- Miranda Guardiola, R., Segovia, C., & Sosa, C. A. (2006). Pirólisis de llantas usadas: Estudio cinético. *Ingenierías, Facultad de ciencias químicas, UANL*, 8-16.
- Ochoa, A., & Mahecha, D. (2018). *Evaluación del proceso de pirólisis para la obtención de combustibles a partir de llantas usadas (Tesis de pregrado)*. Universidad Libre, Bogotá D.C, Colombia.
- Ospina, J. A., & Villada Gil, S. (2011). Métodos para caracterizar combustibles líquidos y gaseosos obtenidos de llantas en desuso a través de las normas ASTM. *Lámpsakos*, 23-31.
- Parascanu, M., Puig Gamero, M., Sánchez, P., Soreanu, G., Valverde, J., & Sanchez-Silva, L. (2018). Life cycle assessment of olive pomace valorisation through pyrolysis. *Elsevier, Renewable Energy*, 589-601.
- 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. *Elsevier, Journal of Cleaner Production*, 754-762.

- Parra, P., González, A., & Sandoval, J. (2017). Estado del arte de métodos de gestión de residuos de llantas usadas en Colombia. *Semilleros Formación Investigativa Vol. 3*, 9-22.
- Peláez , G., Velásquez , S., & Giraldo , D. (2017). Aplicaciones de caucho reciclado: una revisión de la literatura. *Ciencia e ingeniería Neogranadina*, vol. 27, no. 2, 27-50.
- Suarez, R. (2016). El reciclaje de llantas, un mercado que todavía falta por explorar. *El Tiempo*.
- Unión temporal OCODE LTDA et al. (01 de Abri de 2010). *Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de Llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Bogotá*. Obtenido de [En línea]: [www.secretariadeambiente.gov.co/sda/libreria/pdf/.../2-Llantas.pdf](http://www.secretariadeambiente.gov.co/sda/libreria/pdf/.../2-Llantas.pdf)
- Vega, D. (2013). *Factibilidad Técnica y económica para la implementación de una planta de reciclaje de llantas (Tesis pregrado)*. Escuela politécnica del ejército, Sangolqui, Ecuador.
- Vera, A. (2016). *Estudio experimental del procesamiento de llantas usadas en la producción de biodiesel por medio de transesterificación supercrítica (Tesis de pregrado)*. Universidad de la Salle, Bogota D.C.