

**METODOLOGIA MAS EFICIENTE PARA DETERMINAR LA VIABILIDAD
AMBIENTAL DE LA TECNOLOGIA DE PIROLISIS DE LLANTAS USADAS EN
COLOMBIA**

LAURA GOYENECHÉ MIRANDA

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE EDUCACIÓN PERMANENTE Y AVANZADA
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2018**

**METODOLOGIAS MAS EFICIENTES PARA DETERMINAR LA VIABILIDAD
AMBIENTAL DE LA TECNOLOGIA DE PIROLISIS DE LLANTAS USADAS EN
COLOMBIA.**

LAURA GOYENECHÉ MIRANDA

**Monografía para optar por el título de Especialista en
Gestión Ambiental**

**Orientador(a):
INGENIERA DORA CAÑÓN
Ingeniera Química**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE EDUCACIÓN PERMANENTE Y AVANZADA
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2018**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Director de la Especialización

Firma del Calificador

Bogotá D.C, Noviembre de 2018

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos.

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Posgrado

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Decano Facultad de Educación Permanente y Avanzada.

Dr. Luis Fernando Romero Suárez

Director Especialización en Gestión Ambiental

Dra. Jenny Marelby Alarcón

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	14
OBJETIVOS	16
1. MARCO TEÓRICO	17
1.1.3. Tipos de pirolisis	21
1.1.3.1. Pirolisis térmica.	21
1.1.4 Parámetros que intervienen en la Pirolisis	23
1.2.1 Legislación Marco	26
1.2.2 Componente Hídrico	27
1.2.3 Componente Atmosférico	28
1.2.3.2 Distrital	29
1.2.4 Residuos Solidos	30
2. SUBPRODUCTOS GENERADOS EN PIROLISIS DE LLANTAS	32
2.1.3 Ciclo de vida de las llantas	38
2.2 ECOSISTEMA DE LA PIROLISIS	40
2.2.1 Cadena de Gestión	43
2.3 GENERACIÓN DE LLANTAS USADAS	45
2.4.1 Alternativas para la utilización de llantas usadas	51
2.4.1.1 Uso en asfaltos	51
3. METODOLOGIAS PARA LA EVALUCION DEL IMPACTO AMBIENTAL EN CONVERSION TERMICA O PIROLISIS	56
3.2.2 Productos de combustión incompleta o pirolitcos	61
3.2.3 Contaminación por llantas	63
3.3.2 Metodología Cualitativa	66
3.3.3 Metodología de la matriz de valoración de riesgos RAM (Risk Assessment Matrix).	68
3.3.4 Metodología de las Empresas Públicas de Medellín	72
3.3.5 Metodología de redes complejas	73
3.3.6 Metodología Battelle-Columbus	75
4. COMPARACION Y ELECCION DE METODOLOGIA IDONEA PARA EL PROCESO DE PIROLISIS DE LLANTAS USADAS	77
5. APLICACIÓN DE METODO ARBOLEDA O EPM EN PIROLISIS DE LLANTAS USADAS	80
5.1.1 Desagregación del proyecto en componentes	80
5.1.2 Identificación de los impactos	80
5.1.3 Evaluación de los impactos	80
5.2 LOS PARÁMETROS DE EVALUACIÓN	80

5.3 LA CALIFICACION AMBIENTAL DEL IMPACTO	82
5.4 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL PROCESO DE PIROLISIS DE LLANTAS USADAS	85
6. CONCLUSIONES	90
BIBLIOGRAFIA	94

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Características de los procesos de pirolisis.	22
Cuadro 2. Legislación Marco de residuos	26
Cuadro 3. Legislación Nacional de residuos que afecta el componente hídrico.	27
Cuadro 4. Legislación Distrital de residuos que afecta el componente hídrico.	27
Cuadro 5. Legislación Nacional de residuos que afecta el componente atmosférico.	28
Cuadro 6. Legislación Distrital de residuos que afecta el componente atmosférico.	29
Cuadro 7. Legislación Nacional de residuos solidos	30
Cuadro 8. Legislación Nacional de residuos llantas usadas	30
Cuadro 9. Composición típica de las llantas convencionales.	32
Cuadro 10. Cuadro resumen de alternativas estudiadas para el aprovechamiento de llantas usadas	48
Cuadro 11. Ventajas y desventajas de las alternativas, parte 1.	49
Cuadro 12. Criterios para la asignación de la probabilidad.	69
Cuadro 13. Matriz de valoración del riesgo RAM.	70
Cuadro 14. Análisis del riesgo.	71
Cuadro 15. Criterio de evaluación de la metodología de EPM	72
Cuadro 16. Matriz adyacente.	73
Cuadro 17. Ventajas y desventajas de las metodologías para evaluación de impacto ambiental, parte 1.	78
Cuadro 18. Resumen de criterios de evaluación y su ponderación.	82
Cuadro 19. Definición de la importancia del impacto ambiental dados por Ca.	84
Cuadro 20. Matriz para la evaluación del impacto ambiental generado por el proceso de pirolisis de llantas usadas.	85
Cuadro 20.(continuación)	86
Cuadro 20.(continuación)	87

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Descomposición de polímeros.	21
Ecuación 2. Formación de radicales libres	21
Ecuación 3 Formación de nuevos radicales	21
Ecuación 4. Adición de un protón:	23
Ecuación 5. Abstracción de un hidruro:	23
Ecuación 6. Ecuacion para impacto ambiental metodología cualitativa	67
Ecuación 7. Calificación ambiental según Arboleda- EPM	73
Ecuación 8. Calculo de unidades de impacto ambiental según B-C	76
Ecuación 9. Calculo de Calificación ambiental según Arboleda – EPM	82
Ecuación 10. Desgloce del calculo de Calificación ambiental según Arboleda – EPM	83
Ecuación 11. Ecuacion final Ca	83

LISTA DE GRAFICAS

	pág.
Gráfica 1. Esquema de un proceso de pirolisis.	20
Gráfica 2. Estructura típica de una llanta de automóvil.	33
Gráfica 3. Porcentaje de aprovechamiento de una llanta usada Vs desperdicio enviado a relleno sanitario.	34
Gráfica 4. Usos actuales de las llantas usadas.	35
Gráfica 5. Proyección generación de llantas año 2020.	36
Gráfica 6. Proyección cantidades aprovechadas en generación de llantas 2020 ..	37
Gráfica 7. Tipos de llantas	38
Gráfica 8. Ciclo de vida de las llantas	39
Gráfica 9. Esquema de los pasos implicados en el proceso de pirolisis.	40
Gráfica 10. Curvas DTG de la pirolisis de llantas usadas a diferentes velocidades de calentamiento: 1-5-10-20- 40 °C por minuto (ascendente)..	42
Gráfica 11. Curvas TG y DTG de la pirolisis de llantas usadas por el método de cuasi-isotermas.	42
Gráfica 12. Modelo para la cadena de gestión de las llantas	44
Gráfica 13. Esquema de fabricación de asfalto modificado con caucho por la vía húmeda	52
Gráfica 14. Esquema de fabricación de asfalto modificado con caucho por la vía seca	53
Gráfica 15. Origen de las partículas en función del tamaño	60
Gráfica 16. Deposición de las partículas según su diámetro.	61
Gráfica 17. Ejemplo del Resultado del análisis de grado de entrada saturado por propiedades.	74

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Generación de llantas en Bogotá por tipo de vehículo.	46
Tabla 2. Poder calorífico de los neumáticos y otros materiales.	57
Tabla 3. Matriz de Leopold	66
Tabla 4. Atributos de los impactos ambientales según la metodología cualitativa	67
Tabla 5. Escala de interpretación de la metodología cualitativa	68

GLOSARIO

APROVECHAMIENTO: se trata de un proceso que permite recuperar el valor remanente o el poder calorífico de los materiales que componen los residuos mediante la recuperación, el reciclado o la regeneración.

COMBUSTION: Reacción química producida entre el oxígeno y un oxido, que genera desprendimiento de energía y habitualmente muestra señales de llama.

COMBUSTIBLE: materiales biológicos o derivados que sirven como fuente de energía.

GASES DE EFECTO INVERNADERO: son gases de origen natural o antropogénico integrantes de la atmosfera causantes del efecto invernadero.

IMPACTO AMBIENTAL: todo tipo de variación en el sistema biótico, abiótico y socioeconómico, que sea desfavorable o provechoso, que pueda ser imputado al progreso de un proyecto u actividad.

MATERIAL PARTICULADO: conjunto de partículas sólidas y/o líquidas (excepto agua pura) presentes en suspensión en la atmosfera originadas de actividades naturales o antropogénicas.

PIRÓLISIS: se refiere al craqueo de moléculas por aumento de temperatura en ausencia de oxígeno. Generalmente de éste proceso se producen hidrocarburos de en estado líquido o sólido que pueden ser usados como combustibles.

RESUMEN

En la monografía se adelanta la revisión científica sobre el proceso de pirolisis, a partir de la información recopilada se presentan posibles opciones de aprovechamiento de llantas usadas, queriendo notar el dilema cuando aplicando la tecnología de pirolisis se reúsa un residuo, pero a la vez se desencadenan una serie de impactos ambientales críticos en mayor proporción que los originalmente generados por la inadecuada disposición de llantas usadas. Se analizan 6 metodologías para el estudio del impacto ambiental y se determina una de éstas como la más acertada para el proceso de pirolisis, aplicándola de manera teórica al proceso y determinando así su viabilidad ambiental.

Palabras Clave: Pirolisis, llantas usadas, viabilidad ambiental, impacto ambiental, reúso

REVIEW

In the present monograph the scientific review on the pyrolysis process is advanced, from the collected information possible alternatives of use of used tires are presented, wanting to notice the dilemma when applying the technology of pyrolysis, a waste is reused, but at the same time a series of critical environmental impacts are triggered in greater proportion than those originally generated by the inadequate disposal of used tires. Six methodologies are analyzed for the environmental impact study and one of these is determined as the most appropriate for the pyrolysis process, applying it theoretically to the process and determining its environmental viability.

Key Word: Pyrolysis, used tires, environmental viability, environmental impact, reuse

INTRODUCCIÓN

“Las llantas son una buena alternativa para la recuperación de energía, debido a que están compuestas de caucho en la forma de C_xH_y y poseen un valor calorífico de 33 MJ/kg. Diferentes opciones se han presentado para el tratamiento de llantas: Incineración, Gasificación y Pirolisis. El proceso de pirolisis puede ser usado fácilmente para la recuperación de energía, sin embargo, las emisiones producidas (dioxinas, furanos, etc.) no favorecen este proceso”¹; esta opción permite la reconversión de materiales que no se reprocessan con facilidad.

Según Miranda², en el 2016 en Bogotá se presentaba una grave problemática ocasionada por la generación de aproximadamente 18.000 Ton de llantas usadas por año, éstas representan un porcentaje de contaminación importante y la generación de un impacto a la salud, ocasionado por la vida útil tan corta y la inadecuada disposición final que se le da en este momento.

La producción de llantas usadas actualmente registra un volumen creciente a nivel mundial. Estos residuos son acumulados al final de su vida útil en mayor proporción en los rellenos sanitarios, generando así una problemática ambiental grave. En Colombia, de acuerdo con estudios realizados por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial “(...) la generación de residuos de llantas de automóvil, camioneta, camión y buseta se estima en 61 mil toneladas al año, como resultado del consumo de 4.500.000 llantas en el mismo periodo”³. En mayor proporción éstos residuos se disponen en sitios inapropiados e ilegales, en algunos casos se queman a cielo abierto para extracción de los metales que las componen, aumento así la problemática medioambiental existente.

En la actualidad debido a la elevada frecuencia del uso de vehículos, de equipos y maquinaria, cientos de toneladas de llantas se generan en el mundo entero. Algunos estudios reportan que en países con mayor desarrollo en el año una llanta es desechada por una persona y la opción viable que definen para su disposición final es el envío de las mismas a rellenos sanitarios, confinándolas al aire libre,

¹ MIRANDA, Rosa; SEGOVIA, Ciro y SOSA, Cesar. Estudio Cinético e Influencia de Variables de Operación, 2016. [Sitio Web]. México. P 7. [Consultado el 03 de Abril de 2018]. Archivo en pdf. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000200003

² CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ Guía para el manejo de llantas usadas. Guía Para El Manejo de Llantas Usadas, [Sitio Web]. Bogotá D.C. CO. sec. Publicaciones 2006. P. I, 56. [Consultado 03 de abril 2018]. Archivo en pdf. Disponible en: http://www.ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=ab80a611-f997-4864-bd6e-7aa0d8680067&groupId=10157

³ POLANIA TORO, Andrés Felipe y GONZALES MEDINA, Joan Sebastián. Estudio de Factibilidad para la creación de una planta de trituración de neumáticos usados en el departamento de Risaralda. [Practica de extensión]. Universidad Autónoma de Pereira. Pereira, Colombia. 2016. P 70. [Consultado el 28 de Marzo de 2018]. Disponible en: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/7512>

deteriorando así la salud y aumentando los riesgos de incendio; y aun peor, cuando a este tipo de residuos no se le da un adecuado uso, finaliza su vida en ríos, lagos, mares y cuerpos terrestres como parques y bosques aumentando en mayor proporción su potencial de contaminación.

De aquí parte la intención de la presente investigación, debido a que se pretende identificar y analizar con el presente estudio es la viabilidad real de la alternativa de pirolisis de llantas usadas como una alternativa amigable con el medio ambiente y que nos abre las puertas al reuso de residuos para la generación de subproductos alternativos para las actuales necesidades industriales que existen, o, si por el contrario, dicha alternativa genera un impacto ambiental negativo superior al que actualmente está generando la inadecuada disposición de este residuo.

Como dice Pino⁴, el proceso de pirolisis es una alternativa para el aprovechamiento de un residuo y tiene una connotación positiva respecto a los posibles impactos ambientales positivos, sigue generando como producto un combustible convencional con impactos negativos relevantes, por tal razón no debe verse como una solución final definitiva, sino como un paso más hacia la masificación y el consumo de energías renovables, pero hay una perspectiva que pocos autores han considerado, los combustibles generados entran nuevamente al mercado de los combustibles fósiles repitiendo la problemática ambiental presente en un proceso de combustión.

Notando esta situación actual el presente estudio pretende analizar la viabilidad ambiental de la pirolisis de llantas usadas a partir de la elección de una metodología idónea para este análisis, refutando o confirmando la teoría de que el proceso de pirolisis es sostenible ambientalmente respecto a los impactos generados actualmente con las malas prácticas de manejo que se tienen para las llantas usadas, una vez presentado dicho escenario la monografía buscará responder el interrogante ¿Cuál es la metodología más eficiente para determinar la viabilidad ambiental del proceso de pirolisis de llantas usadas?

⁴ PINO RANGEL, Sebastian. Impactos ambientales en el aprovechamiento de plástico para la generación de combustibles. [Documento Físico]. Monografía en Gestión Ambiental. Fundación Universidad de América. Bogotá. Colombia. 2016. P 14. [Consultado el 10 de abril de 2018]. Disponible en : Biblioteca Fundación Universidad De América

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Describir las metodologías más eficientes para determinar la viabilidad ambiental de la tecnología de pirolisis de llantas usadas a partir de los impactos ambientales que genera e proceso.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir la tecnología de conversión térmica o pirolisis.
- Identificar los subproductos generados en el proceso de pirolisis de llantas usadas.
- Analizar y comparar las metodologías que existen para la evaluación del impacto ambiental en tecnologías de conversión térmica o pirolisis.
- Elegir una metodología a partir de los resultados obtenidos en el objetivo anterior.
- Analizar los impactos ambientales generados por el proceso de pirolisis de llantas usadas aplicando la metodología electa.

1. MARCO TEÓRICO

Este trabajo ilustra las cualidades de la operación de la pirolisis como una prometedora opción para la gestión de llantas usadas. La gama de hidrocarburos obtenidos (C3 -C19) con la pirolisis catalítica, propios del rango de las gasolinas, valida el potencial de valorización de los desechos plásticos que tiene esta alternativa de reciclaje químico⁵. Este capítulo presentará de forma global la teoría en aspectos como pirolisis y los subproductos generados con este proceso, para así después de un análisis cualitativo determinar la viabilidad ambiental de dicha alternativa.

1.1 GENERALIDADES

Con el objetivo de entender de qué se trata el proceso de pirolisis a continuación se presentarán varias teorías para partir de la/las más representativa para el desarrollo del presente estudio.

1.1.1 Pirolisis

El proceso de pirolisis consiste en la descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno. En la pirolisis se generan tres productos en distinto estado de agregación (sólidos, líquidos y gases). Entre éstos, aquel que tiene mayor interés como combustible es el producto líquido (bio-oil). El bio-oil presenta las ventajas características de los combustibles líquidos, tales como un bajo costo de transporte, una alta densidad energética y la posibilidad de ser utilizado en sistemas de ciclo combinado de generación de electricidad. No obstante, este bio-combustible tiene como principal inconveniente para su uso directo el elevado contenido de agua que reduce su poder calorífico superior. Al respecto, algunos antecedentes indican que la desmineralización de las biomásas con soluciones ácidas conduce a la obtención de bio-oils con un menor contenido de agua⁶.

Trujillo⁷ menciona que, en el proceso de pirolisis en un medio anaerobio, la biomasa es destilada temperaturas superiores a los 250 °C. a través de este tipo de procesos se generan 3 tipos de residuos: un carbón como residuo sólido, alquitrán y agua como residuos líquidos y una mezcla de gases tales como hidrogeno, monóxido de

⁵ GUTIERREZ Omar. La Pirolisis como herramienta de tratamiento y valorización de residuos plásticos. [Artículo electrónico]. Instituto Tecnológico Metropolitano. Facultad de ciencias exactas y aplicadas. Medellín, Colombia. 2015. Tomo 79, No. 2, P 34-36 [Consultado: 10 de mayo 2018]. Disponible en: <https://search.proquest.com/openview/73641a9e12dc0b896ce5ce41729e7754/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2043241>

⁶ TRUJILLO Leonardo, RAMOS Boris, MARQUEZ Francisco, CALLEJO Alberto, PEREZ Jesús. Proceso de pirolisis rápida de los residuos sólidos de naranja, influencia de factores en el proceso. [Electrónico]. Artículo científico. Universidad de Zaragoza. España. 2015. [Consultado: 6 mayo de 2018]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612015000200005

⁷ Ibíd., p 10

carbono, nitrógeno, entre otros. Éstos tres elementos se generan en proporciones diferentes que dependen de las condiciones operativas y en mayor proporción de la biomasa y su composición química; así mismo como la temperatura y velocidades de calentamiento.

El gas producto de la pirolisis es de baja densidad de energía (3,5 – 8,9) MJ/m³N, con lo cual constituye un producto no económico para transportar a través de redes de tuberías, prefiriéndose su uso en el lugar donde este es producido, por lo cual el gas se debe envasar para el consumo fuera del lugar de generación. Si el gas se pretende utilizar en motores de combustión interna, debe ser sometido a un proceso previo de tratamiento, incluyendo limpieza para la remoción de vapores ácidos y partículas de suciedad, así como un procedimiento de limpieza. Además, la baja densidad energética aumentaría el tamaño de los motores. La pirolisis rompe las macromoléculas para formar moléculas más pequeñas, además se puede usar para convertir mezclas de residuos plásticos en combustibles y derivados, con los que se puede generar energía limpia. Los compuestos a base de carbono contenidos en el residuo se descomponen dando origen a una mezcla de gases, hidrocarburos condensables y un residuo carbonoso o char (coque)⁸.

Consultando otros autores, en 2015 Autores de la Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador, Mancheno⁹ define la pirolisis como el proceso de desintegración anaerobia a altas temperaturas, llegando desde los 400°C a los 1000°C, generando una fracción líquida, otra parte sólida y gaseosa con alto potencial de aprovechamiento. Este es un proceso se ha utilizado desde la década de los 80, y fue desarrollado por primera vez en Japón, para pirolizar residuos sólidos municipales para producir energía eléctrica. Luego, en España, mediante la pirolisis se logró comprobar que al elevar la temperatura se obtienen compuestos más estables térmicamente. Así mismo, en Colombia, con el proceso de pirolisis para residuos sólidos urbanos se obtienen subproductos de alto poder calorífico, aptos para generación de energía, finalmente el Ecuador, mediante una fase experimental, al usar polietilenos de alta densidad se evidenció la obtención de combustibles como gasolina y kerosene, en la fracción líquida resultante del proceso.

⁸ CASTELLS Xavier Elías, VELO GARCIA Enric. La pirolisis, tratamiento y valorización energética de residuos. [Libro físico]. 2013. p 494. [Consultado: 9 de Mayo de 2018]. Disponible en :Biblioteca Universidad Nacional de Colombia

⁹ MANCHENO Myriam, ASTUDILLO Servio, AREVALO Pablo, MALO Inés, NARANJO Tania y ESPINOZA Johana. Aprovechamiento Energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio de pirolisis. Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador [Artículo científico]. Cuenca, Ecuador. 2015. P 54. [Consultado 30 Mayo 2018]. Disponible en: file:///C:/Users/AULA%20503/Downloads/Dialnet-AprovechamientoEnergeticoDeResiduosPlasticosObteni-5969813.pdf

Arteaga¹⁰ menciona que la transformación de residuos de origen agroindustrial en combustibles en estado gaseoso y líquido puede darse por medio de procesos como la pirolisis. Dentro de estos procesos la pirolisis rápida que ha sido muy atractiva por su velocidad de reacción, tanto en la industria como en la academia, posee un alto rendimiento de conversión de la fracción líquida ya que éstos se pueden almacenar de forma fácil y así mismo movilizarlos o transportarlos. Una de las ventajas de la pirolisis rápida, frente a la pirolisis convencional es la elevada producción de líquidos, y tiene algunas características relevantes, tales como: transferencia de calor y tasas de calentamiento elevadas, el proceso puede llegar a manejar una temperatura de hasta 500°C en fase gaseosa vs cortos tiempos de residencia del vapor, inferiores a 3 segundos, y así mismo enfriamiento acelerado de los vapores para obtención de bio aceite. No obstante, el producto estrella de la pirolisis acelerada es la fracción líquida, sin embargo, también se generan residuos de carácter sólido y gases con alto potencial de aprovechamiento como fuente de energía para el mismo proceso de pirolisis, cerrando el círculo de producción para el gas, y en el sólido se puede usar como carbón activado. Los bio oil o bio aceites generados en el proceso de pirolisis rápida, la biomasa se calienta de forma acelerada en un medio anaerobio, como consecuencia, la biomasa se descompone en gases y estos gases se condensan para la generación de los bio oil o bio aceites.

1.1.2 Pirolisis de Residuos Sólidos. Según lo descrito por Pinedo¹¹ en su trabajo final de Máster de Investigación, define los residuos sólidos como un material generado en cualquier proceso de producción y/o transformación sin generar ningún valor económico. Ésta falta de valorización se debe a falta de tecnología para su recuperación o aprovechamiento para algunos, y para otros casos a la carencia de características de aprovechamiento de algunos productos.

La pirolisis se puede definir como la transformación de una muestra en una sustancia diferente solo con aplicación de calor. Este proceso puede llegar a conducir moléculas más pequeñas debido a la fisión térmica o puede darse un aumento del peso molecular a través de reacciones intermoleculares, dependiendo de las reacciones que se hayan definido.

únicamente. o puede resultar en un aumento del peso molecular por medio de reacciones intermoleculares, dependiendo de las reacciones elegidas.

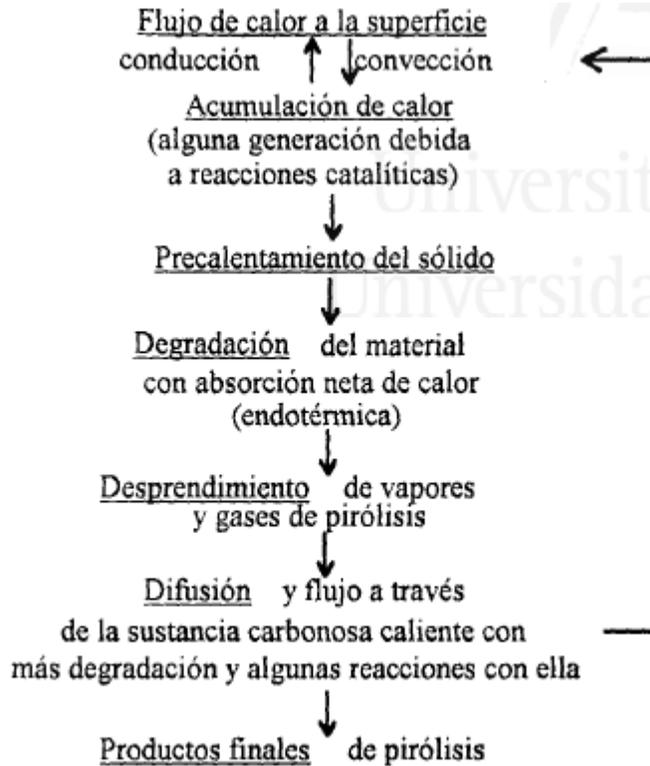
A continuación, se muestra un esquema la secuencia de un proceso de pirolisis. En el flujoograma a continuación se observan las etapas que pueden ser una a una o al

¹⁰ ARTEAGA Juan, ARENAS Erika, LOPEZ David, SANCHEZ Carlos, ZAPATA Zulamita. Obtención de biocombustibles producto de la pirolisis rápida de residuos de palma africana. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia. 2012. P 146. [Consultado 30 de Mayo de 2018]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v10n2/v10n2a17.pdf>

¹¹ PINEDO URIEN Andrea. Obtención de Biocarbones y Biocombustibles mediante pirolisis de Biomasa residual. Trabajo de fin de máster de investigación. Universidad Nacional de Educación a Distancia. España. 2013. P. 19. [Consultado 30 de mayo de 2018]. Disponible en: http://digital.csic.es/bitstream/10261/80225/1/BIOCARBONES_CENIM_CSIC.pdf

tiempo¹². En la gráfica 1. Se presentará de manera detallada el esquema global del proceso de pirólisis.

Gráfica 1. Esquema de un proceso de pirólisis.



Fuente: CONESA FERRER, Juan Antonio. Estudio de la pirólisis de residuos plásticos de polietileno y neumáticos usados. [Repositorio Digital]. Trabajo de grado Doctoral en Ingeniería Química. Universidad de Alicante. Facultad de Ciencias. España. 199. p 29- 30. [Consultado 02 de Marzo de 2018]. Disponible en: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/17030/1/Conesa-Ferrer-Juan-Antonio.pdf>

¹² CONESA FERRER, Juan Antonio. Estudio de la pirólisis de residuos plásticos de polietileno y neumáticos usados. [Repositorio Digital]. Trabajo de grado Doctoral en Ingeniería Química. Universidad de Alicante. Facultad de Ciencias. España. 199. p 29- 30. [Consultado 02 de Marzo de 2018]. Disponible en: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/17030/1/Conesa-Ferrer-Juan-Antonio.pdf>

1.1.3. Tipos de pirolisis

1.1.3.1. Pirolisis térmica. La pirolisis térmica es un proceso endotérmico de alta eficiencia que requiere altas temperaturas de hasta por lo menos 350 a 650 °C, dependiendo del polímero a degradar. En algunos procesos se requieren temperaturas de hasta 900 °C para alcanzar rendimientos de buenos productos.

La descomposición térmica de polímeros (olefinas) conlleva a la formación de hidrocarburos con pesos moleculares más altos y Char o coque, que se pueden presentar en diferentes cantidades según el material.

Ecuación 1. Descomposición de polímeros.



Fuente: KAMINSKY Walter, SCHEIRS John. Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics: converting waste plastics into diesel and other fuels. [Libro físico]. 2006. P 114-115. [Consultado 02 Marzo de 2018]. Disponible en : Biblioteca Universidad Nacional de Colombia

El craqueo térmico es una reacción de cadena con radicales libres (un radical libre es un átomo o grupo de átomos con un electrón libre). Los radicales libres reaccionan con los hidrocarburos obtenidos, produciendo nuevos hidrocarburos y nuevos radicales libres¹³.

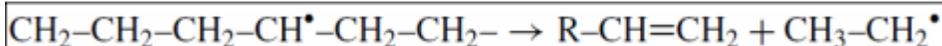
Ecuación 2. Formación de radicales libres.



Fuente: KAMINSKY Walter, SCHEIRS John. Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics: converting waste plastics into diesel and other fuels. [Libro físico]. 2006. P 114-115. [Consultado 02 Marzo de 2018]. Disponible en : Biblioteca Universidad Nacional de Colombia

Los radicales libres se pueden descomponer dando lugar a olefinas y nuevos radicales

Ecuación 3. Formación de nuevos radicales.



Fuente: KAMINSKY Walter, SCHEIRS John. Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics: converting waste plastics into diesel and other fuels. [Libro físico]. 2006. P 114-115. [Consultado 02 Marzo de 2018]. Disponible en : Biblioteca Universidad Nacional de Colombia

¹³ KAMINSKY Walter, SCHEIRS John. Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics: converting waste plastics into diesel and other fuels. [Libro físico]. 2006. P 114-115. [Consultado 02 Marzo de 2018]. Disponible en : Biblioteca Universidad Nacional de Colombia

En la siguiente tabla se sintetizan las diversas condiciones de trabajo que son característica fundamental de un proceso de pirolisis, así como el producto que se genera en mayor proporción.

En el Cuadro 1 podemos evidenciar las características principales de los procesos de pirolisis; suave, rápida y reactiva, donde se puede verificar el estado del subproducto que en su mayoría se genera, notando que solo la pirolisis suave y en especial tiene esta característica.

Cuadro 1. Características de los procesos de pirolisis.

	Tiempo residencia	V de calefacción	Temperatura máxima (°C)	Producto mayoritario
Pirólisis suave				
Carbonización	hrs-días	muy baja < 1 °C/min	400	sólido
Convencional	5-30 min.	baja <100 °C/min	600	gas, líq. y sólido
Pirólisis rápida				
Rápida	0.5-5 s.	bastante alta ≈ 100 °C/min	650	líquido
Flash	<1 s.	alta ≈ 1000 °C/min	<650	líquido
Flash	<1 s.	alta ≈ 1000 °C/min	>650	gas
Ultra	<0.5 s.	muy alta ≈ 3000 °C/min	1000	gas
Vacío	2-30 s.	media ≈ 100 - 1000 °C/min	400	líquido
Pirólisis reactiva				
Hidropirólisis	<10 s.	alta	<500	líquido
Metanopirólisis	<10 s.	alta	>700	líquido

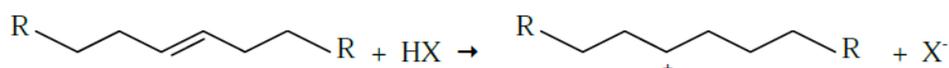
Fuente: CONESA FERRER, Juan Antonio. Estudio de la pirolisis de residuos plásticos de polietileno y neumáticos usados. [Repositorio Digital]. Trabajo de grado Doctoral en Ingeniería Química. Universidad de Alicante. Facultad de Ciencias. España. 199. p 48. [Consultado 02 de Marzo de 2018]. Disponible en: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/17030/1/Conesa-Ferrer-Juan-Antonio.pdf>

1.1.3.2. Pirolisis catalítica. “Éste mecanismo es muy similar a un mecanismo iónico, que involucra diferentes tipos de reacciones, y se puede determinar a partir de diferentes etapas que describiremos más adelante”¹⁴

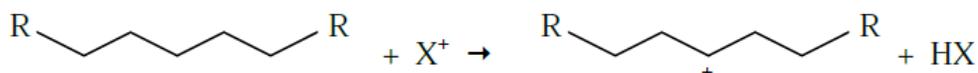
¹⁴ HERNANDEZ FERREZ, María del Remedío. Evaluación de la pirolisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. [Repositorio Digital]. Trabajo de Grado Doctoral en Ingeniería Química. Universidad de Alicante. Facultad de Ciencias. España. 2007, p 97. [Consultado 05 Mayo 2018]. Disponible en: <https://rua.ua.es/dspace/handle/10045/4088>

- Iniciación: “Tiene lugar en la superficie de la zeolita. Las macromoléculas del polímero reaccionan en los sitios activos de la superficie externa de los cristales del catalizador ya que presentan un tamaño de gran dimensión como para penetrar en los canales del polímero. Allí pueden tener lugar dos reacciones: la abstracción de un hidruro de la molécula del polímero, o la adición de un protón a los enlaces carbono – carbono” ¹⁵.

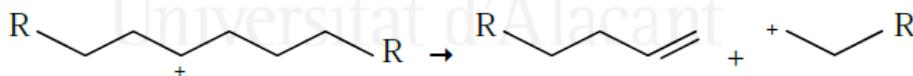
Ecuación 4. Adición de un protón:



Ecuación 5. Abstracción de un hidruro:



Los iones generados de este modo pueden estabilizarse mediante reacciones de transferencia de hidrogeno, isomerización, etc. o bien una rotura en posición Beta, respecto a la carga positiva, dando lugar a una olefina y un nuevo compuesto iónico.



Propagación: En esta etapa los productos de la ruptura inicial disminuyen su extensión a través de ataques permanentes por parte de la parte ácida del catalizador. Estas fracciones del polímero se mueven hacia el fondo del catalizador y continúan reaccionando en los centros ácidos internos mediante reacciones de segundo orden, generando así cadenas mas livianas que incitan la formación de una cadena gaseosa de un lado y una parte líquida del otro lado. Debido a que estas dos reacciones suceden en el interior de los poros del catalizador, el tamaño de estos poros es muy importante importancia en la selección de los productos obtenidos.

1.1.4 Parámetros que intervienen en la Pirolisis. En el proceso de pirolisis se generan tres porciones de diferentes tipos y características: solido, líquido y gas. La proporción de su generación depende de diversos elementos que intervienen en el proceso y pueden llegar a modificar su rendimiento.

¹⁵ Ibid., p. 96

Conocer la influencia de los parámetros anteriormente mencionados es muy importante ya que al modificar una pequeña parte de éstos se puede producir una alteración en los resultados que se pueden obtener e incluso una errada interpretación de los resultados. A continuación, se presentan algunos efectos:

1. Temperatura de reacción: es una variable muy significativa en el proceso de pirolisis, ya que a mayor temperatura mayor craqueo lo que admite que las partículas volátiles se vean beneficiadas, se pueden diferenciar tres regiones de temperatura en función del dominio de las fracciones que se generan durante el proceso, éstos pueden ser:
 - “Entre 220 y 330°C: en este rango se obtiene mayor fracción sólida
 - Entre 331 y 450 °C: en esta zona la fracción líquida alcanza rendimientos significativos, mientras que los compuestos gaseosos se generan en menor medida.
 - Superiores a los 500°C: se produce un mayor craqueo del material pirolizado y por tanto se obtiene un mayor rendimiento de la fracción de gas”¹⁶.
2. Velocidad de calefacción: Existen dos temas significativos en este parámetro, pirolisis lenta y flash, en la primera la velocidad de calefacción es de K/min o incluso K/hora; en una pirolisis flash se emplean velocidades de calefacción por encima de 250 K/Seg y contrariamente a la pirolisis lenta se favorece aquí la formación de gases y líquidos.
3. Tiempo de residencia de los gases en la reacción: a menor tiempo de descomposición mayor predominio del tiempo de estancia sobre los compuestos ligeros que se obtienen en la reacción.
4. “Cantidad de muestra y tamaño de la partícula: afectan directamente la transferencia de materia y la transmisión de calor en el reactor debido a que las partículas de gran tamaño no se calientan tan fácil como las pequeñas, y el tamaño de partícula afecta de manera directa la efectividad de la degradación debido a la influencia del tamaño del poro y el catalizador ácido sobre el proceso de craqueo”¹⁷.
5. Densidad y humedad: la elevada densidad de la muestra provoca anclaje de productos como alquitranes que favorecen una mayor degradación.
6. Tipo de contacto material vs catalizador: éste tipo de contacto modifica la actividad de la catalización y varía la distribución de productos obtenidos en el proceso.

¹⁶ Ibid., p. 77

¹⁷ Ibid., p. 79

7. Tipo de reactor que se usa: para este proceso se usan varios tipos de reactores, dentro de los que se destacan: reactor de tornillo, reactor extrusor, reactor de tanque agitado, reactor de lecho fijo, autoclave, reactor de esferas, reactor de lecho fluidizado, entre otros.

En seguida se abordará la descripción de las llantas para ampliar los conceptos sobre los cuales se van a trabajar en la presente investigación, la cual se encuentra enfocada en el proceso de pirolisis de llantas usadas y los subproductos generados en ésta conversión térmica.

1.2 NORMATIVIDAD APLICABLE EN COLOMBIA

Como punto de partida se identifica la importancia que desde hace pocos años se le dio a la problemática existente con el inadecuado manejo de las llantas posterior a su uso, el gobierno Colombiano se vio en la necesidad de regular éste mercado, su cadena de producción y a los consumidores hasta la etapa final de éste proceso.

El ministerio de Ambiente desde aproximadamente el año 2000 ha buscado la forma de enfocar sus esfuerzos en regular el consumo y desecho de las llantas a nivel Nacional, promoviendo programas para su adecuada disposición y años más tarde para pos consumo y/o aprovechamiento.

Las llantas usadas no son consideradas en Colombia como un residuo peligroso, sin embargo 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.

“El uso de las llantas usadas como combustible está regulado por la Resolución 1488 de 2003”.¹⁸

Según la secretaria distrital de medio ambiente¹⁹ en este capítulo se presenta el marco jurídico relacionado con los diversos impactos que causan a los recursos naturales el inadecuado manejo y disposición final de las llantas usadas.

¹⁸ Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – Min Ambiente. Productores y comercializadores de llantas en el país deberán tener un Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas. [Sitio Web]. Bogotá D.C. CO. Sec. Normativa. Julio de 2017. [Consultado 14 Junio 2018]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/248-plantilla-asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana-sin-galeria-14#plan-posconsumo-llantas-usadas>

¹⁹ SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE. Guía para el manejo de llantas usadas. [Sitio Web]. Bogotá D.C. CO. Sec. Programas y proyectos. Septiembre 2006. [Consultado 08 mayo 2018]. Archivo en PDF. Disponible en: http://www.ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=ab80a611-f997-4864-bd6e-7aa0d8680067&groupId=10157

1.2.1 Legislación Marco

Cuadro 2. Legislación Marco de residuos

CONSTITUCION NACIONAL	
Ley 23 de 1973	Mediante la cual se faculta al Gobierno Nacional para expedir el CRN
Decreto Ley 2811 de 1975	Código de Recursos Naturales
Ley 9 de 1979	Código Único Sanitario Nacional
Ley 99 de 1993	Ley del Medio Ambiente
Ley 142 de 1994	Servicios Públicos Domiciliarios
Decreto 948 de 1995	Marco de las acciones y mecanismos administrativos de las autoridades ambientales para preservar el Aire
Decreto 979 de 2006	Norma de Calidad del Aire

Fuente: Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. Marco normativo ambiental colombiano aplicable al proyecto. [Sitio Web]. Bogotá D.C. Anexo 1. [Consultado 25 de septiembre de 2018]. Archivo en PDF. Disponible en: <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/20013/160805%20ANEXO%201%20-%20MARCO%20NORMATIVO%20.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

1.2.2 Componente Hídrico

1.2.2.1 Nacional

Cuadro 3. Legislación Nacional de residuos que afecta el componente hídrico.

NORMATIVA NACIONAL	
Decreto 1541 de 1978	Establece las normas para el acceso y el uso de las corrientes de aguas
Decreto 1594 de 1984	Por medio del cual se reglamenta el uso del agua y el manejo de los residuos líquidos
Ley 373 de 1997	Por medio de la cual se instaura el programa de ahorro y uso eficiente del agua
Resolución 273 de 1997	Tasas retributivas por vertimientos líquidos
Decreto 901 de 1997	Tasas retributivas por la utilización directa o indirecta del agua

Fuente: Secretaria Distrital de Ambiente. Guía para el manejo de llantas usadas. [Sitio Web]. Bogotá D.C. CO. Sec. Programas y proyectos. Septiembre 2006. [Consultado 08 Mayo 2018]. Archivo en PDF. Disponible en: http://www.ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=ab80a611-f997-4864-bd6e-7aa0d8680067&groupId=10157

1.2.2.1 Distrital

Cuadro 4. Legislación Distrital de residuos que afecta el componente hídrico.

NORMATIVA DISTRITAL	
Resolución 1074 de 1997	Estándares ambientales en materia de vertimientos
Resolución 339 de 1999	Por medio de la cual se establecen las unidades de contaminación
Resolución 1596 de 2001	Modifica la Resolución 1074 con relación a los estándares

Fuente: Secretaria Distrital de Ambiente. Guía para el manejo de llantas usadas. [Sitio Web]. Bogotá D.C. CO. Sec. Programas y proyectos. Septiembre 2006. [Consultado 08 Mayo 2018]. Archivo en PDF. Disponible en: http://www.ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=ab80a611-f997-4864-bd6e-7aa0d8680067&groupId=10157

1.2.3 Componente Atmosférico

1.2.3.1 Nacional

Cuadro 5. Legislación Nacional de residuos que afecta el componente atmosférico.

NORMATIVA NACIONAL	
Decreto 948 de 1995	Calidad del Aire
Resolución 619 de 1997	Se establecen parcialmente los factores a partir de los cuales se requiere permiso de emisión atmosférica para fuentes fijas
Resolución 0058 de 2002	Se establecen normas y límites máximos permisibles de emisión para incineradores y hornos crematorios de residuos sólidos y líquidos
Resolución 1488 de 2003	Requisitos, condiciones y límites máximos permisibles de emisión para la disposición final de llantas usadas en hornos de producción de clinker
Resolución 0970 de 2001	Se establecen los límites máximos permisibles de emisión, bajo las cuales se debe realizar la eliminación de plásticos contaminados con plaguicidas en hornos de producción de clinker de plantas cementeras
Resolución 0458 de 2002	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 1488 de 2003	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
Decreto 979 de 2006	Por el cual se modifican los artículos 7, 10, 93, 94 y 108 del Decreto 948 de 1995. Relacionados con las normas de calidad del aire (niveles máximos permisibles y períodos de exposición), niveles de prevención, alerta y emergencia por contaminación del aire, medidas para la atención de episodios, planes de contingencia para la atención de episodios, programas de reducción de la contaminación
Resolución 601 de 2006	Por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia

Fuente: Secretaria Distrital de Ambiente. Guía para el manejo de llantas usadas. [Sitio Web]. Bogotá D.C. CO. Sec. Programas y proyectos. Septiembre 2006. [Consultado 08 Mayo 2018]. Archivo en PDF. Disponible en: http://www.ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=ab80a611-f997-4864-bd6e-7aa0d8680067&groupId=10157

1.2.3.2 Distrital

Cuadro 6. Legislación Distrital de residuos que afecta el componente atmosférico.

NORMATIVA DISTRITAL	
Resolución 391 de 2001	Establece normas técnicas y estándares ambientales para la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire en el perímetro urbano de la Ciudad de Bogotá
Acuerdo Distrital 19 de 1996	Por el cual se adopta el Estatuto General de Protección Ambiental del Distrito Capital de Bogotá y se dictan normas básicas necesarias para garantizar la preservación y defensa del patrimonio ecológico, los recursos naturales y el medio ambiente
Acuerdo Distrital 79 de 2003	Por el cual el Concejo Distrital expide el Código de Policía de Bogotá
Resolución 1208 de 2003	Por medio de la cual se dictan las normas técnicas y estándares ambientales para la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire en el perímetro urbano de la ciudad de Bogotá, D.C.
Resolución 618 de 2003	Por medio de la cual se reglamentan las condiciones ambientales para declarar los Estados de Alarma Ambiental
Decreto 174 de 2006	Por medio del cual se adoptan medidas para reducir la contaminación y mejorar la calidad del aire en el distrito capital
Resolución 1689 de 2006	Por medio de la cual se adoptan los términos de referencia del programa de autorregulación ambiental aplicable dentro del perímetro urbano del Distrito Capital

Fuente: Secretaría Distrital de Ambiente. Guía para el manejo de llantas usadas. [Sitio Web]. Bogotá D.C. CO. Sec. Programas y proyectos. Septiembre 2006. [Consultado 08 Mayo 2018]. Archivo en PDF. Disponible en: http://www.ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=ab80a611-f997-4864-bd6e-7aa0d8680067&groupId=10157

1.2.4 Residuos Solidos

Cuadro 7. Legislación Nacional de residuos solidos

NORMATIVA NACIONAL - RESIDUOS SOLIDOS	
Resolución 2309 de 1986	Se regula lo relacionado con el manejo, uso, disposición y transporte de los residuos sólidos con características especiales
Ley 142 de 1994	Establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios, entre los que se encuentran los servicios de aseo y reglamenta su administración a cargo de los municipios
Decreto 1713 de 2002	Reglamenta la Ley 142 de 1994 y otras disposiciones en relación con la prestación del servicio público de aseo
Decreto 1505 de 2003	Por medio del cual se modifica parcialmente el Decreto 1713 de 2002 en relación con los planes de gestión integral de residuos sólidos
Resolución 1045 de 2003	Por medio de la cual se adopta la metodología para la elaboración de los planes de gestión integral de residuos PGIRS

Fuente: Secretaria Distrital de Ambiente. Guía para el manejo de llantas usadas. [Sitio Web]. Bogotá D.C. CO. Sec. Programas y proyectos. Septiembre 2006. [Consultado 08 Mayo 2018]. Archivo en PDF. Disponible en: http://www.ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=ab80a611-f997-4864-bd6e-7aa0d8680067&groupId=10157

1.2.5 Llantas usadas

Cuadro 8. Legislación Nacional de residuos llantas usadas

NORMATIVA NACIONAL - LLANTAS USADAS	
Resolucion 0481 de 2009	Por la cual se expide el Reglamento Técnico para llantas neumáticas que se fabriquen, importen o se reencauchen y se comercialicen para uso en vehículos automotores y sus remolques.
Resolucion 1457 de 2010	Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas y se adoptan otras disposiciones.
Decreto 442 de 2015	Por el cual se crea el Programa de aprovechamiento y/o valorización de llantas usadas en el Distrito Capital y se adoptan otras disposiciones.
Resolucion 1326 de 2017	Por la cual se establecen los sistemas de recoleccion selectiva y gestion mabiental de llantas usadas y se dictan otras disposiciones

Fuente: Autor

En la sección 1.2 se aborda un tema fundamental de gran importancia para la presente investigación, debido a que la normatividad aplicable en los procesos medioambientales desempeña un papel de gran relevancia tanto para los productores como para los generadores y aun mas para los dispositivos finales, o el que se espera que sea el fin de la cadena del residuo. En Colombia la regulación de residuos viene adquiriendo poder desde el año 1986 con la Resolución 2309, la cual establece que los residuos generados por las industrias no son de igual caracterización que los residuos ordinarios normalmente tratados, tendiendo los primeros un carácter especial que los hace mas peligrosos y los obliga a tener otro tipo de almacenamiento, tratamiento y disposición final. El Gobierno ha sido consiente del precio que debemos pagar por aumentar la industria en el país, y éste precio se ve directamente relacionado con el impacto ambiental generado por la industria, por esto ha intentado regular a las industrias para que sus emisiones y generaciones sean de poca afectación o sean compensadas ambientalmente por otras alternativas (Compensación forestal, reforestación, entre otros).

Por lo anterior a partir del 2010 mediante la Resolución 1457, se hace efectiva la regulación de uno de los residuos de mayor relevancia en la actualidad, debido a su alto potencial de aprovechamiento y a su elevado impacto ambiental al no gestionarlo de manera adecuada, así se tendrá durante el presente escrito una visión global de las obligaciones de los generadores y dispositivos finales, para darle mayor peso al potencial de aprovechamiento que tienen las llantas usadas.

2. SUBPRODUCTOS GENERADOS EN PIROLISIS DE LLANTAS

2.1 LLANTAS

Según un informe realizado en el año 2017 por la Secretaría Distrital de Gobierno; y debido a las arduas afectaciones que puede sufrir el ambiente ante el mal manejo de llantas usadas que hacen los ciudadanos y establecimientos de la ciudad, la Administración Distrital determinó que solucionar este problema sería una de sus prioridades. De acuerdo con la Secretaría Distrital de Ambiente²⁰, solo en Bogotá resultan más de tres millones y medio de llantas usadas en el año. De esta cantidad por lo menos el 30% son abandonadas en espacio público, mientras otras tantas son quemadas a cielo abierto para recuperar el material ferroso que a su interior tienen. Adicional, una sola llanta puede demorarse hasta 150 años en degradarse, y cuando éstas no tienen un manejo adecuado generan proliferación de roedores e insectos, deterioro del paisaje, riesgo inminente de incendio, entre otras.

“(…) Las llantas están compuestas de una gran cantidad de materiales que les dan, dependiendo del uso al cual se destinan, sus características especiales como resistencias a la carga, posibilidad de manejar alta presión, características de adherencia, entre otros. El cuadro 9, nos enseña la composición típica de las llantas radiales”²¹

Cuadro 9. Composición típica de las llantas convencionales.

TIPO DE MATERIAL	COMPOSICION (%) TIPO VEHICULO: AUTOMOVILES	COMPOSICION (%) TIPO VEHICULO: CAMIONES
Caucho natural	14	27
Caucho sintético	27	14
Negro de humo	28	28
Acero	14	15
Antioxidantes y rellenos	17	16

Fuente: Secretaria Distrital de Ambiente. Guía para el manejo de llantas usadas. [Sitio Web]. Bogotá D.C. CO. Sec. Programas y proyectos. Septiembre 2006. P 17. [Consultado 08 Mayo 2018]. Archivo en PDF. Disponible en: http://www.ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=ab80a611-f997-4864-bd6e-7aa0d8680067&groupId=10157

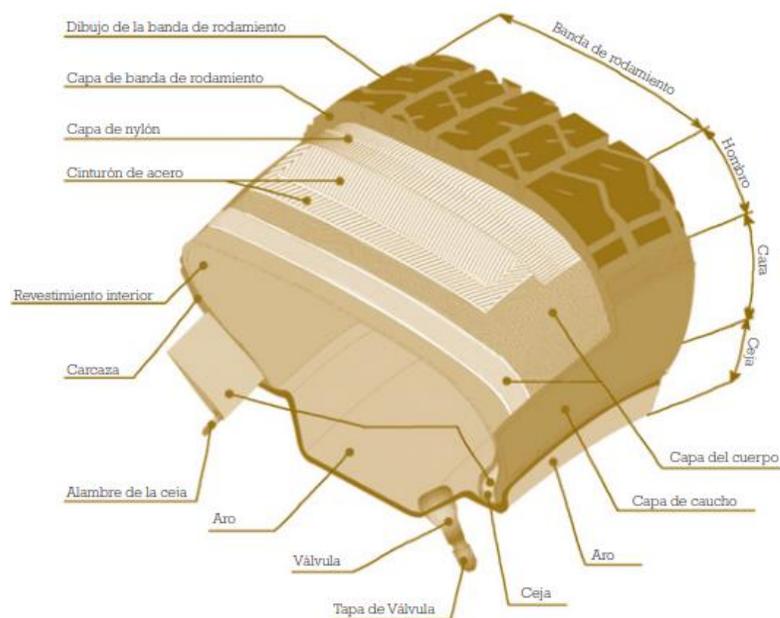
²⁰ Secretaria Distrital de Gobierno. Distrito ha recolectado más de 69mil llantas usadas. [Sitio Web]. Bogotá D.C. CO. Sec. Noticias. Diciembre 2017. [Consultado 02 Abril 2018]. Disponible en: <http://www.gobiernobogota.gov.co/noticias/nivel-central/distrito-ha-recolectado-mas-69-mil-llantas-usadas>

²¹ Secretaria Distrital de Ambiente. Guía para el manejo de llantas usadas. [Sitio Web]. Bogotá D.C. CO. Sec. Programas y proyectos. Septiembre 2006. [Consultado 08 Mayo 2018]. Archivo en PDF. Disponible en: http://www.ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=ab80a611-f997-4864-bd6e-7aa0d8680067&groupId=10157

En el cuadro 9 se evidencia el negro de humo como uno de los elementos encontrados en las llantas en mayor proporción, el material que las llantas contienen actual como un antioxidante en el producto ligante, mitigando su deterioro y por así mismo aumentando la capacidad de adherencia en el tiempo y adicional puede ser utilizado posteriormente en mayor proporción como materia prima para la generación de subproductos, en gran proporción también se encuentran los componentes metálicos; éstos son de gran aprovechamiento y representa un insumo cuyo valor en el mercado puede ser representativo, es por esto que es viable la posibilidad y evaluación de la alternativa de realizar un proceso de pirolisis para éste residuo en búsqueda de subproductos aptos para nuevos usos, identificando la viabilidad ambiental y económica al reusar algunos de los materiales luego de un despiece que generalmente es manual.

2.1.1 Estructura de las llantas. La llanta es una mezcla de componentes que se elaboran e interconectan con el objetivo de garantizar su buen funcionamiento. Todos y cada uno de los elementos que contiene posee su propia función en particular.

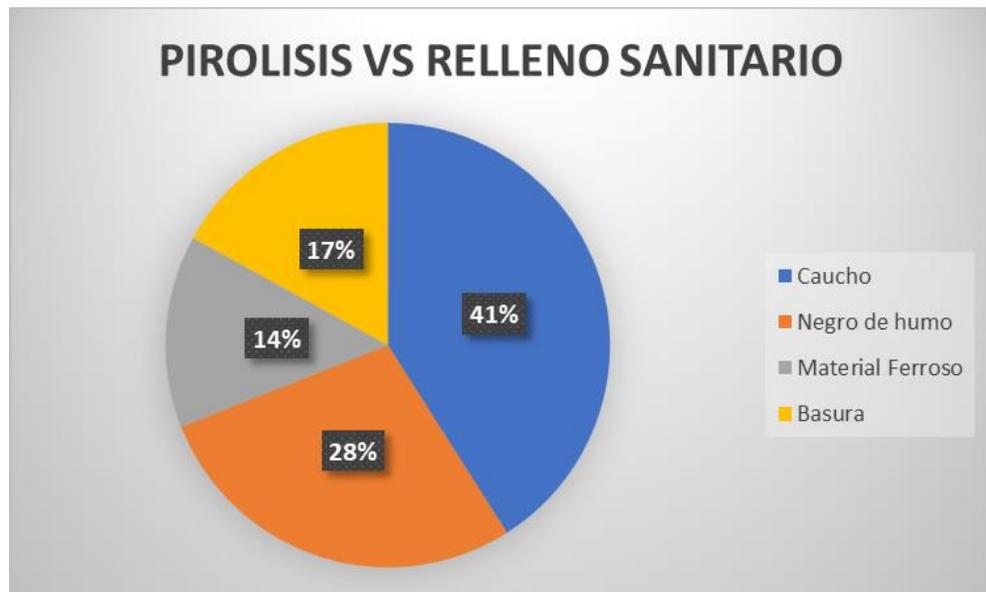
Gráfica 2. Estructura típica de una llanta de automóvil.



Fuente: ESTRADA, M. y POESGEN, S. Estudio ambiental, económico y social de alternativas de reutilización y reciclaje de llantas usadas en la ciudad de Bogotá. [Repositorio Digital]. Trabajo de grado. Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Bogotá D.C., Colombia. 2005. P 18. [Consultado el 06 de Mayo]. Disponible en: <http://repository.lasalle.edu.co/handle/10185/1>

El gráfico 2 muestra la estructura típica de una llanta de automóvil, ésta demuestra cada una de las capas del elemento demostrando que este tipo de elementos requieren de un despiece minucioso para su aprovechamiento parcial o de tecnología de punta para este despiece. Del total de una llanta usada, tan solo el 17% de sus materiales debe ir a relleno sanitario, el 41% corresponde a caucho sintético y natural que puede ser reutilizado en procesos posteriores, el 28% corresponde a negro de humo, el cual de igual forma puede ser reutilizado en múltiples industrias como materia prima en la elaboración de diferentes artículos de la industria del caucho, por ejemplo: pisos en caucho, bases para motor, cojines de llantas, bandas transportadoras, defensas marinas, etc. El negro de humo semi reforzante se usa con prioridad en la elaboración de artículos extruidos y moldeados, carcasas de llantas, mangueras, bandas, entre otros. Así mismo se utilizan como pigmentos en la elaboración de tintas y bases de pinturas negras, para potencializar su color, artículos de plástico, entre otros; sus usos a nivel industrial son múltiples. El 14% restante corresponde a material ferroso, que es altamente apetecido en la industria actualmente ya que al fundirse y crearse aleaciones con otros metales o con los mismos puede ser reutilizado como materia prima en construcción, obra civil vías, vehículos, entre otros.

Gráfica 3. Porcentaje de aprovechamiento de una llanta usada Vs desperdicio enviado a relleno sanitario.

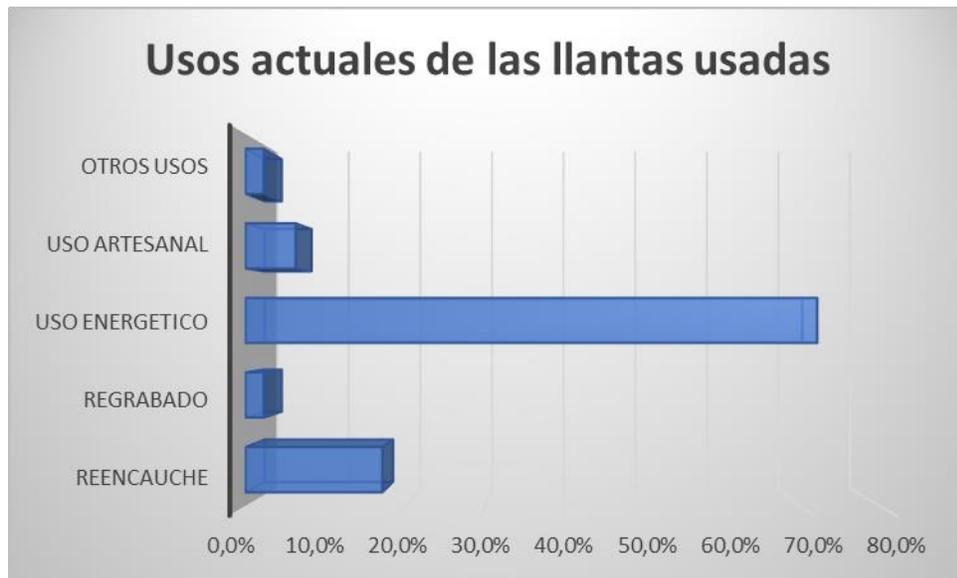


Fuente: Autor

En el gráfico 3 podemos notar al detalle, que el 69% de los materiales que contienen las llantas puede ser aprovechado mediante proceso de pirolisis, mientras que el 17% ya queda como basura y puede ser enviado a relleno sanitario, ésta información refleja que aproximadamente el 50% de los residuos que van a relleno sanitario tienen alto potencial de aprovechamiento, actualmente estamos

llenándolos de residuos innecesarios, de los cuales se pueden generar subproductos útiles como materia prima para nuevos procesos.

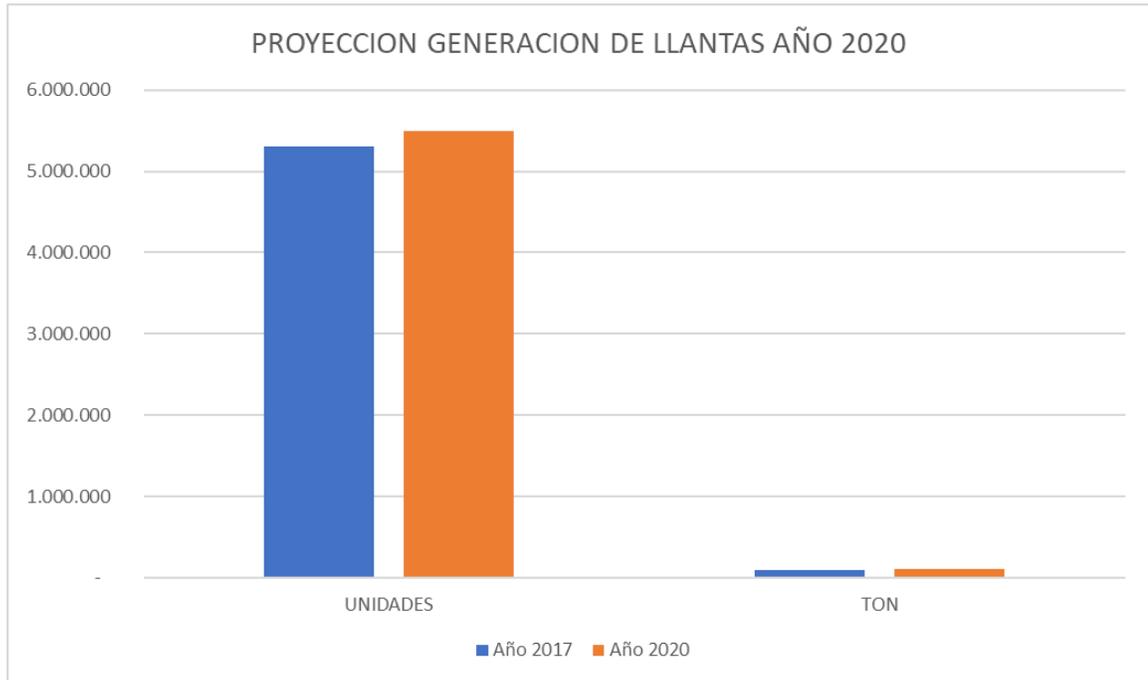
Gráfica 4. Usos actuales de las llantas usadas.



Fuente: Secretaria Distrital de Ambiente. Guía para el manejo de llantas usadas. [Sitio Web]. Bogotá D.C. CO. Sec. Programas y proyectos. Septiembre 2006. P 51. [Consultado 08 Mayo 2018]. Archivo en PDF. Disponible en: http://www.ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=ab80a611-f997-4864-bd6e-7aa0d8680067&groupId=10157

En Bogotá se tienen tres tipos generales de aprovechamiento final de los residuos, los cuales son: Reencauche, donde tiene un aprovechamiento energético y se usa la llanta como materia prima para la fabricación de artículos de caucho. También se tiene aprovechamiento térmico, éste es el proceso de mayor demanda del residuo, donde se puede aprovechar el residuo en hasta un 72% aproximadamente. Éste uso se envía directamente a los hornos de producción de panela del occidente de Cundinamarca, esta actividad genera impactos ambientales y de salud pública debido a las emisiones de COV y HAP, los cuales son contaminantes cancerígenos y mutagénico y algunos otros que causan otro tipo de afecciones dados al sistema respiratorio y circulatorio.

Gráfica 5. Proyección generación de llantas año 2020.



Fuente: Periódico El Tiempo. [Sitio Web]. Bogotá D.C. CO. Sec. Archivo / Documento. 2017. [Consultado 09 junio 2018]. Digital. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-15317455>

En el grafico 5, se puede identificar la generación en el año 2017 de llantas usadas en Colombia, la generación de llantas usadas para éste año ascendió a 5.300.000 unidades, que en peso representan aproximadamente 100.000 Ton, se estima un crecimiento en la economía para el año 2020 del 3.7%, según la perspectiva económica de Fedesarrollo

Gráfica 6. Proyección cantidades aprovechadas en generación de llantas 2020



Fuente: Autor

En el gráfico 6 se representa la cantidad en unidades y Ton de llantas potencialmente aprovechables proyectadas para el año 2020, se estima que en el 2020 se puedan recuperar mediante pirolisis de llantas usadas 71.553 Ton, que actualmente posiblemente se estén disponiendo en forma inadecuada en rellenos sanitarios y desechándose en ríos y quebradas, 2.553 Ton más que en el 2017, con ésta cantidad se estima la generación de 714Ton de negro de humo y 1.047 Ton de retal de caucho, que actualmente pueden ser utilizadas en la construcción de vías y carreteras ya que al crear una mezcla con el asfalto genera mayor resistencia, casi en un 30% más que el asfalto convencional. De igual forma se obtendría una recuperación de 358 Ton de material ferroso apto para construcción y fundición, recuperación, mezcla y reuso como materia prima.

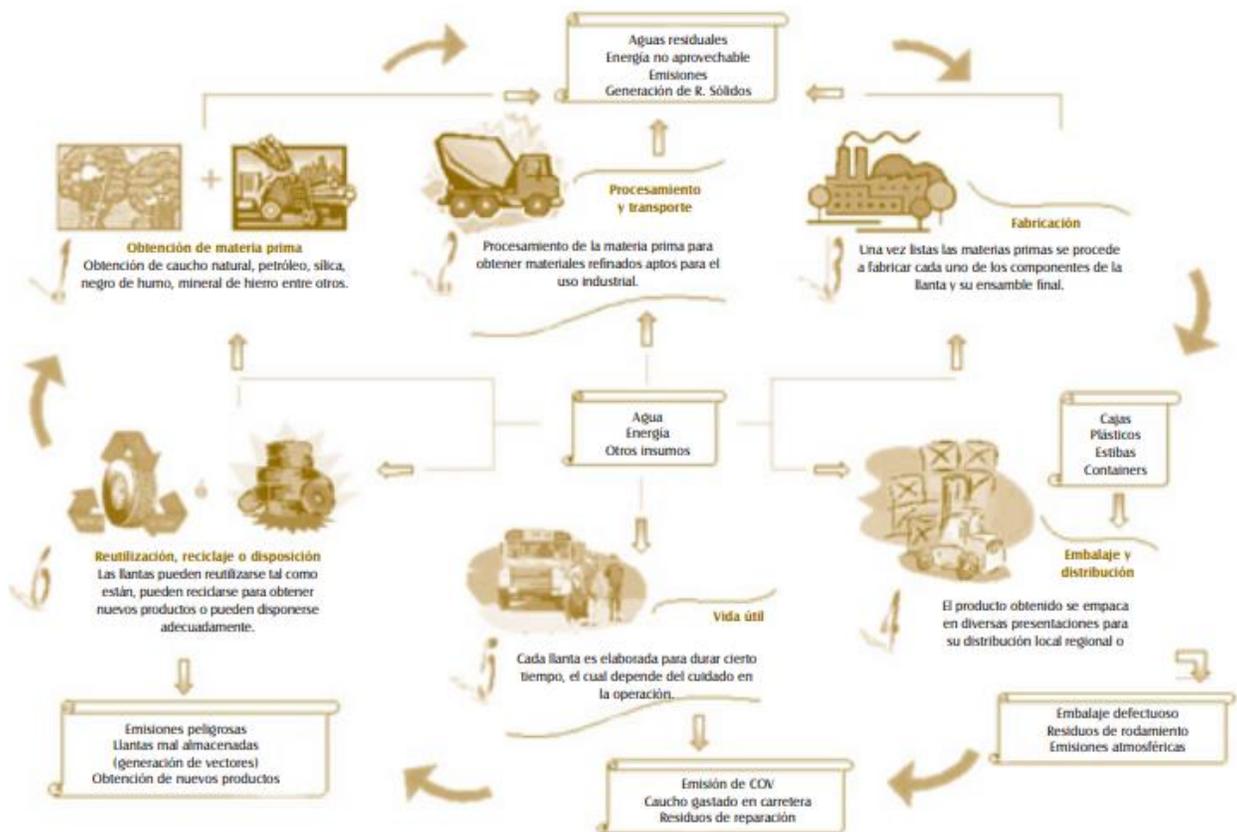
2.1.2 Tipos de llantas en el mercado. En el mercado actual encontramos dos tipos de llantas:

- Llantas radiales²²: las fibras de la capa inicial van dirigidas hacia el interior de la llanta. Sobre éstas se ajustan las fibras de la capa estabilizadora que van direccionadas diagonalmente y generan estabilidad en la llanta. Éste tipo de llanta necesita menor cantidad de material para soportar una carga fuerte, produce menor fricción y genera mas estabilidad, otorgando así mayor

²² Secretaria Distrital de Ambiente. Guía para el manejo de llantas usadas. [Sitio Web]. Bogotá D.C. CO. Sec. Programas y proyectos. Septiembre 2006. [Consultado 08 Mayo 2018]. Archivo en PDF. Disponible en: http://www.ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=ab80a611-f997-4864-bd6e-7aa0d8680067&groupId=10157

En la gráfica 8 se identifican todas las etapas del ciclo de vida de una llanta, notando que requieren del uso de materias primas e insumos, de igual forma, absolutamente todos los procesos generan residuos, y las llantas no son la excepción, generan subproductos que dependiendo de su uso pueden generar afectaciones positivas o negativas al medio ambiente. En el gráfico también podemos ver que el impacto ambiental generado está anclado a las 4 primeras etapas del ciclo de vida de las llantas, limitado exclusivamente a los proveedores de materias primas y fabricantes de éstas, no obstante, los ciudadanos que respetan y valoran su entorno debemos estar en influencia directa y de maneja positiva en todas las etapas del ciclo.

Gráfica 8. Ciclo de vida de las llantas.



Fuente: Secretaria Distrital de Ambiente. Guía para el manejo de llantas usadas. [Sitio Web]. Bogotá D.C. CO. Sec. Programas y proyectos. Septiembre 2006. [Consultado 08 Mayo 2018]. Archivo en PDF. Disponible en: http://www.ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=ab80a611-f997-4864-bd6e-7aa0d8680067&groupId=10157

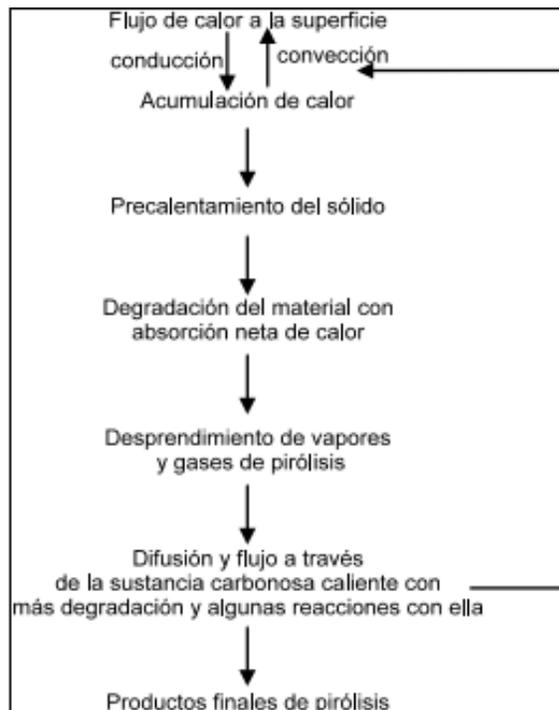
Como podemos ver en la gráfica 8 el ciclo de vida de la llanta comienza desde la obtención de la materia prima en fuentes minerales y recursos no renovables, como el petróleo y el mineral de hierro, entre otros, luego al realizar el proceso de producción y transformación para su uso industrial, consumiendo agua y energía además de algunos reactivos químicos, generando emisiones y más residuos

peligrosos en el proceso de producción , la vida útil de cada llanta varia de las aleaciones primarias utilizadas en el proceso de producción, así como del uso que se le dé, una vez éste tiempo culmina la llanta sin uso pasa a ser un residuo más, de allí parte la decisión trascendental; si botarla a los rellenos sanitarios, a los ríos, y /o algún otra fuente de vida, o por el contrario identificar y estructurar la forma de su reutilización.

La pirolisis es un proceso muy complejo en el que intervienen múltiples reacciones químicas y varias etapas. En la Grafica 9. Se sintetiza el proceso de pirolisis.

2.2 ECOSISTEMA DE LA PIROLISIS

Gráfica 9. Esquema de los pasos implicados en el proceso de pirolisis.



Fuente: FULLANA FONT, Andrés. Pirolisis y Combustión de Neumáticos Usados y Lodos de Depuradora. [Repositorio Digital]. Trabajo de Grado Doctoral en Ingeniería Química. Universidad de Alicante. Facultad de Ciencias. España. 2001. p 13. [Consultado 16 de Julio 2018]. Disponible en: file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/AndresFullana Tesis.pdf

Conforme el estudio realizado por Sosa²⁵ para el estudio cinético de la pirolisis de llantas usadas, el objetivo principal del estudio se basa en la identificación analizaron cuantitativamente los principales componentes de una llanta (Natural Rubber - NR, Styrene-Butadiene Rubber- SBR y polybutadiene rubber- BR) y plastificantes (PLZ), simulando las curvas DTG. Éste estudio relaciona las llantas usadas halladas en el relleno sanitario de Nuevo León, menciona que el contenido de humedad al recibir la muestra fue del 2% peso. La llanta se corta y pulveriza mediante molinos de bolas y nitrógeno líquido; se clasifica el polvo por tamaño de partícula con varios tamices y luego se procede a secar en un horno de laboratorio a una temperatura de 105°C por 24 horas seguidas.

Con el fin de identificar y contabilizar los diferentes componentes de una llanta, se utilizó para este estudio el método cuasi exotérmico

Para el proceso se utilizó el siguiente algoritmo²⁶

- 1) Rampa de calentamiento de 20°C/min hasta que la velocidad de degradación sea mayor al 0.1 %peso/min.
- 2) Isotherma hasta que la velocidad de degradación sea menor a 0.025 %peso/min.
- 3) Vuelve al paso 1 hasta alcanzar 1000°C.

Se establecen para el estudio de las variables un límite máximo y un mínimo para las principales variables que intervienen en el proceso: Dp, flujo de gas (80 y 200mL/min) y peso de muestra (1 y 20 mg). Se realizaron las pruebas con dos variables constantes y modificando solamente la variable de interés. Se usaron como condiciones estándar: 5mg, 0.250mm y 60mL/min.

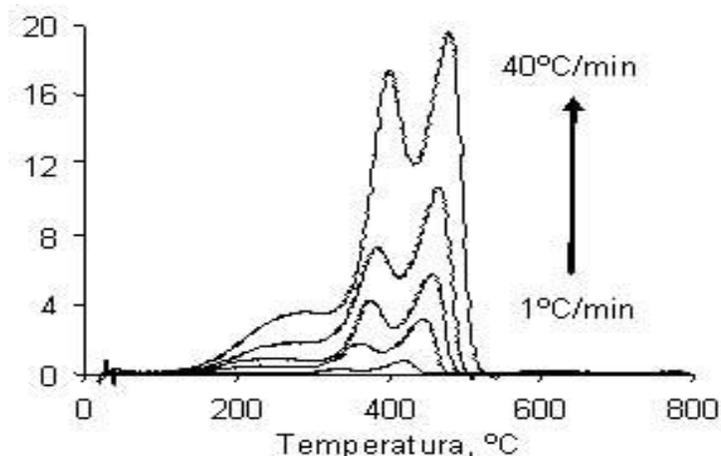
El estudio presento los resultados que se muestran a continuación:

En la gráfica 10 se puede observar el proceso de desintegración de llantas en tres etapas de desintegración o degradación, éstas se definieron por los picos máximos demostrados. La primera etapa se evidencia entre 120°C y 320 °C con su mayor pico a 256°C. La segunda etapa se presenta entre 280°C y 440°C con su pico máximo a 380 °C; y la tercera y ultima etapa se nota entre 400 y 520 °C con su pico máximo a 460°C. Por lo anterior se concluye con éste estudio que la pirolisis de llantas a una presión atmosférica arroja resultado la formación de 67 % peso de compuestos volátiles y 33 %peso de compuestos sólido.

²⁵ SOSA BLANCO, Cesar Alberto. Pirolisis de llantas usadas, Estudio cinético. Artículo científico. Universidad Autónoma de Nuevo León. México.2006. P 9- 15. [Digital].[Consultado el 14 de Junio de 2018]. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000200003

²⁶ Op cit, SOSA BLANCO.

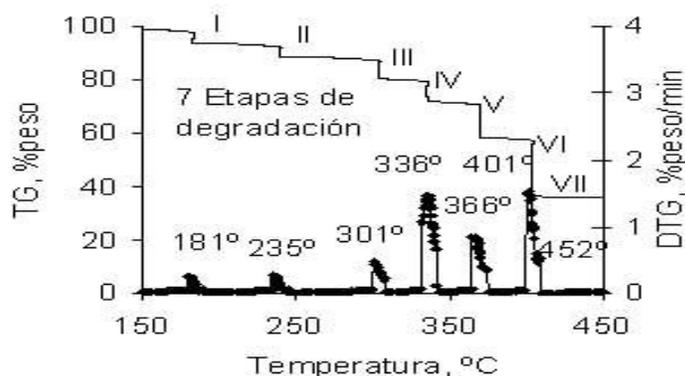
Gráfica 10. Curvas DTG de la pirolisis de llantas usadas a diferentes velocidades de calentamiento: 1-5-10-20- 40 °C por minuto (ascendente).



Fuente: SOSA BLANCO, Cesar Alberto. Pirolisis de llantas usadas, Estudio cinético. Artículo científico. Universidad Autónoma de Nuevo León. México.2006. P 11. [Digital]. [Consultado el 14 de Junio de 2018]. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000200003

Con este proceso se identificaron varios subproductos como: plásticos, caucho natural y sintético, combustibles, entre otros, pero no se logro distinguir el tipo de caucho existente.

Gráfica 11. Curvas TG y DTG de la pirolisis de llantas usadas por el método de cuasi-isotermas



Fuente: SOSA BLANCO, Cesar Alberto. Pirolisis de llantas usadas, Estudio cinético. Artículo científico. Universidad Autónoma de Nuevo León. México.2006. P 12. [Digital]. [Consultado el 14 de Junio de 2018]. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000200003

El análisis realizado por Sosa²⁷ los resultados obtenidos por el método cuasi isotérmico los podemos evidenciar en la gráfica 11, datos experimentales exponen 7 picos principales, de los cuales los primeros dos picos denotan una pérdida del 11% en peso y esto se puede asignar a la volatilización de los plastificantes. El tercer y cuarto pico son debidos al NR y BR respectivamente, con un 9% en peso de cada uno. El quinto se debe a la descomposición de la mezcla NR y SBR con 13% en peso, y el sexto y séptimo con un 24% en peso de aporte, representa al BR. Se genera un residuo final de 35%, correspondiente a carbón y 5% en cenizas.

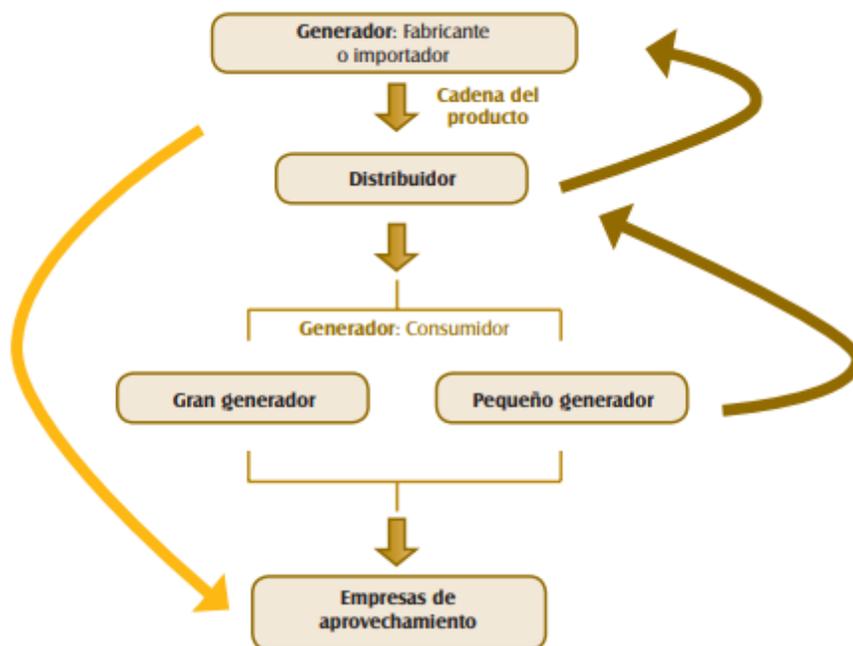
Sosa concluye su artículo experimental con lo siguiente:

- El proceso de pirolisis de llantas usadas evidencia 3 etapas de desintegración térmica entre los 120°C y los 520°C, que son debidos a la volatilización de plastificantes y a la degradación del caucho.
- La termo gravimetría muestra un resultado de pérdida de peso del 67% y 33% de peso de solido residual, que corresponden a carbón y cenizas.
- No se identifica con clara evidencia la presencia del SBR en la muestra analizada, pero si se evidencia la formación de NR, BR, PLZ.

2.2.1 Cadena de Gestión. La cadena de gestión de un producto, se puede definir como la estructura que permite la producción y comercialización a mayoristas y usuarios y del producto y también la recuperación del residuo que se genera una vez finaliza su vida útil.

²⁷ Ibid., p. 12

Gráfica 12. Modelo para la cadena de gestión de las llantas



Fuente: Grupo MICHELIN. Consejos de Bibendum para el manejo de las llantas. [Consultado el 06 de Mayo de 2018]. Disponible en: <https://www.michelin.es/neumaticos/consejos>

Según lo menciona la guía²⁸ lo que la Gráfica 12 propone es una responsabilidad compartida donde cada uno de los actores involucrados en la cadena del proceso de producción sean responsables con la gestión del producto y del residuo que genera:

- El productor encargado de la elaboración del producto desde su responsabilidad instaurada al interior de su compañía de producción debe ser igual con los residuos que los productos que se general al interior de la fabrica.
- Los distribuidores, adicional a la comercialización del producto, sirven como canal de almacenamiento temporal del residuo mientras se entrega éste a la fabrica directamente o a una empresa avalada que pueda aprovecharlo.
- Las empresas transportadoras, como grandes usuarios de llantas, dentro del marco de responsabilidad ambiental entregan las llantas usadas a las empresas autorizadas o a los dos anteriormente mencionados.

²⁸ Ibid., p. 24

- Finalmente, las empresas de aprovechamiento que muchas veces son los mismos fabricantes, ya que utilizan este residuo para la elaboración de nuevos subproductos o realizan algún otro tipo de aprovechamiento como reencauche o similares.

Adicional a la cadena de gestión de los productos debe existir una cadena de aprovechamiento de los residuos generados por estos productos tanto para grandes como para pequeños generadores.

2.3 GENERACIÓN DE LLANTAS USADAS

“En Colombia se generan cada año más de 5 millones de llantas usadas, el equivalente a 100.000 toneladas de residuos de este tipo”; ²⁹es lo expresado por el Ministerio de Ambiente en Junio de 2017. Conforme lo menciona Ocade³⁰ el diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Bogotá a continuación se relaciona la Tabla 1 lo resultados del análisis realizado, el cual refleja cifras aproximadas.

²⁹ Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – Min Ambiente. Productores y comercializadores de llantas en el país deberán tener un Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas. [Sitio Web]. Bogotá D.C. CO. Sec. Noticias. Julio de 2017. [Consultado 02 Abril 2018]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/3055-productores-y-comercializadores-de-llantas-en-el-pais-deberan-tener-un-sistema-de-recoleccion-selectiva-y-gestion-ambiental-de-llantas-usadas-minambiente>

³⁰ Unión Temporal Ocade Ltda./Saniplan/Ambiental S.A. Diagnóstico Ambiental Sobre el Manejo Actual de Llantas y Neumáticos Usados Generado por el Parque Automotor de Santafé de Bogotá. [Sitio Web]. Bogotá Colombia. Año 2000. [consultado 02 Abril 2018]. Archivo PDF. P 2. Disponible en: <http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/0/Llantas.pdf>

Tabla 1. Generación de llantas en Bogotá por tipo de vehículo.

TIPO DE VEHÍCULO	A	B	C	D	E	F	G
			A x B		A x D	C x 0.03	E - F
PARTICULAR (91%)	Número de vehículos	Llantas / Vehículo ¹	Total llantas en uso	I _{GLL} ²	Llantas Generadas al año	Reencauche	Ajuste por Reencauche
Automóvil R-13	637,637	4	2,550,548	1.72	1,096,735		1,096,735
Automóvil R-14	63,063	4	252,252	1.72	108,468		108,468
Camión	18,200	6	109,200	4.50	81,900	31,121	50,779
Camioneta	81,900	4	327,600	2.60	212,940		212,940
Campero	72,800	4	291,200	1.68	122,304		122,304
Motos	36,400	2	72,800	1.32	48,048		48,048
SUB - TOTAL	910,000		3,603,600		1,670,395	31,121	1,639,274
PÚBLICO (9%)	Número	Llantas / Vehículo	Total llantas en uso	I _{GLL}	Llantas Generadas al año	Reencauche	Ajuste por Reencauche
Taxi R-13	49,959	4	199,836	4.00	199,836		199,836
Taxi R-14	4,941	4	19,764	4.00	19,764		19,764
Bus	11,700	6	70,200	7.20	84,240	32,011	52,229
Buseta	9,900	4	39,600	4.00	39,600	15,048	24,552
Camioneta	5,400	4	21,600	2.80	15,120		15,120
Campero	3,600	4	14,400	2.00	7,200		7,200
Microbus / Colectivo	4,500	4	18,000	5.20	23,400		23,400
SUB - TOTAL	90,000		383,400		389,160	47,059	342,101
TOTAL	1,000,000		3,987,000		2,059,555	78,180	1,981,375

Fuente: Unión Temporal Ocade Ltda./Saniplan/Ambiental S.A. Diagnóstico Ambiental Sobre el Manejo Actual de Llantas y Neumáticos Usados Generado por el Parque Automotor de Santafé de Bogotá. [Sitio Web]. Bogotá Colombia. Año 2000. [Consultado 02 Abril 2018]. Archivo PDF. P 2 Disponible en: <http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/0/Llantas.pdf>

En la Tabla 1 podemos ver la generación anual de llantas usadas en Bogotá, siendo la capital de Colombia y la ciudad más representativa en éste aspecto, la tomaremos de referencia para el presente estudio. Es posible ver que de la generación anual más del 90% corresponde a generación por vehículos particulares y casi el 10% corresponde a vehículos de servicio público.

En seguida se abordarán las técnicas usadas actualmente a nivel nacional para el manejo y disposición y/o aprovechamiento adecuado de las llantas usadas en Bogotá.

2.4 ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO DEL RESIDUO

Conforme el estudio realizado por la unión temporal Ocade Ltda.; Saniplan; Ambiental S.A.³¹ se plantearon 4 alternativas aplicadas al entorno actual con el fin

³¹ Ibid., p. 6

de buscar la mejor alternativa para aprovechar el residuo conforme a sus propiedades, se estudiaron las siguientes alternativas:

1. Aprovechamiento energético y opción de materia prima para hornos, fundamentada en la llanta usada como combustible alternativo al carbón por su alto potencial calorífico; sustituye además el hierro utilizado en el proceso por el contenido de chatarra en las llantas.
2. Aprovechamiento energético de llantas usadas en termoeléctricas, por su elevado calorífico para generar energía eléctrica.
3. Uso como materia prima para producción de asfalto o pavimento asfáltico, este uso se ha venido presentando en países desarrollados como³² Canadá, Estados Unidos y España, entre algunos otros, basado en el aditamento del caucho de llanta en polvo durante la fabricación del pavimento asfáltico. El caucho de llanta en polvo le provee al pavimento particularidades de flexibilidad y elasticidad que aumentan su vida útil en mínimo un 50% a un costo menor que el convencional.
4. Se usa el caucho para arreglos domésticos, como alfombras, pisos adornos, entre otros.

³² *Ibid.*, p. 6

Cuadro 10. Cuadro resumen de alternativas estudiadas para el aprovechamiento de llantas usadas

Nombre	Alternativa 1 <i>Aprovechamiento energético y materias primas en fábricas de Cementos</i>	Alternativa 2 <i>Aprovechamiento energético en calderas de termoeléctricas</i>	Alternativa 3 <i>Materias primas para producción de pavimento asfáltico en Santa Fe de Bogotá</i>	Alternativa 4 <i>Trituración para generar materias primas para productos de caucho</i>	
Descripción	Llanta fragmentada como combustible alterno al carbón y materia prima (hierro) en los hornos de producción de cemento.	Llanta pulverizada como combustible alterno al carbón en las termoeléctricas	Llanta pulverizada como aditivo en el ligante asfáltico para mejorar sus propiedades plásticas y de adherencia.	Utilización de caucho de llantas pulverizado como producto para la industria del caucho y obras civiles.	
Materia prima para el aprovechamiento	Llanta fragmentada de tamaño 8" x 8" con textil y acero.	Caucho de llanta tamaño malla 200 sin textil ni acero.	Caucho de llanta tamaño malla 80 sin textil o acero	Llanta entera.	
Producto final	<ul style="list-style-type: none"> - Energía - Cemento con materia prima de la llanta (hierro) 	<ul style="list-style-type: none"> - Textil - Acero - Energía 	<ul style="list-style-type: none"> - Textil - Acero - Asfalto con caucho de llanta 	<ul style="list-style-type: none"> - Caucho tamaño malla 80 - Textil - Acero 	
Tecnología	Existente, con uso intensivo a nivel mundial.	<ul style="list-style-type: none"> - Tecnología conocida y utilizada en diferentes compañías a nivel mundial. - No existe experiencias reconocidas para la granulometría requerida - Se debe desarrollar investigación 	Con amplio uso en E. U, Canadá y Europa. Sin embargo se debe desarrollar previamente la investigación con pilotos para establecer las condiciones locales.	Existente y de fácil implementación, con uso intensivo a nivel mundial. Todas las alternativas requieren de esta etapa en la utilización de la llanta.	
Inversión Inicial (USD x 10 ³)	1,422	4,114	4.468	4,068	
Viabilidad económica ⁵	Costo unitario actual	USD0.87/MBTU	USD0.87/MBTU	USD 21.1/ton Pavimento	USD693/ton caucho malla 80
	Costo unitario alternativa	USD1.90/MBTU ⁶ (USD1.27/MBTU)	USD5.75/MBTU (USD3.85/MBTU)	USD 14.1/ton Pavimento	USD238/ton caucho malla 80 (CIF USA) (USD159.5/ton caucho malla 80 (CIF USA))
	Diferencia Unitaria	-USD1.03/MBTU = -USD/ton(31.59 - 6.78 _{hierro}) = -USD24.81/ton llanta (-USD0.40/MBTU = -USD/ton(12.24 - 6.78 _{hierro}) = -USD5.46/ton llanta)	-USD4.88/MBTU = -USD196.8/ton caucho (-USD2.98/MBTU = -USD120.1/ton caucho)	USD7/ton Pavimento	Aprox: USD455/ton caucho (Aprox USD533.5/ton caucho)
	Total (Miles USD)	-444/año (-98/año)	-2,632/año (-1,606/año)	16,384/año	6,085/año (7,135/año)

Fuente: Unión Temporal Ocade Ltda./Saniplan/Ambiental S.A. Diagnóstico Ambiental Sobre el Manejo Actual de Llantas y Neumáticos Usados Generado por el Parque Automotor de Santafé de Bogotá. [Sitio Web]. Bogotá Colombia. Año 2000. [Consultado 08 Abril 2018]. Archivo PDF. P 8. Disponible en: <http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/0/Llantas.pdf>

Cuadro 11. Ventajas y desventajas de las alternativas, parte 1.

Item		Alternativa 1 Aprovechamiento energético y materias primas en fábricas de Cementos	Alternativa 2 Aprovechamiento energético en calderas de termoeléctricas	Alternativa 3 Materias primas para producción de pavimento asfáltico en Santa Fe de Bogotá	Alternativa 4 Trituración para generar materias primas para productos de caucho	Situación actual/ hornilla panelera (85% en peso llanta)
Económico	Ventajas	Vlr agregado al residuo	Vlr agregado al residuo	<ul style="list-style-type: none"> - Disminución de costos asociados a los programas de pavimentación en la ciudad - Vlr agregado al residuo 	<ul style="list-style-type: none"> - Generación de ingresos por su exportación o utilización en nuevos mercados - Vlr agregado al residuo 	Algunos sectores de la industria Panelera utilizan la llanta como combustible con costos del orden de \$220/kg de llanta en el trapiche, equivalente a un 18% de valor de venta de la panela.
	Desventajas	Costo de inversión alto sin rentabilidad	Altos costos de inversión sin rentabilidad	- Costos asociados a estudio piloto	Ninguna	
Social	Ventajas	Generación de Empleo Directo: 19	Generación de Empleo Directo: 15	<ul style="list-style-type: none"> - Calidad de vida en la ciudad por mejores vías - Generación de Empleo Directo: 50 	Generación de Empleo Directo: 50	<p>Existen aproximadamente 430 personas que laboran informalmente en toda la cadena de manejo de la cadena hasta el aprovechamiento con una ocupación entre el 10 % y el 50% en esas labores.</p> <p>Los transportadores de la panela que venden la llanta a los trapiches la transportan como carga de compensación a su regreso de la ciudad de Bogotá</p> <p>Los trapiches que utilizan la llanta lo realizan en combinación con el bagazo. CORPOICA adelanta proceso de tecnificación de los hornos para utilizar solamente bagazo.</p>
	Desventajas	Pérdida gradual entre el 10% y el 50% de la ocupación de los trabajadores informales de la cadena de manejo de la llanta usada	Pérdida gradual entre el 10% y el 50% de la ocupación de los trabajadores informales de la cadena de manejo de la llanta usada	Pérdida gradual entre el 10% y el 50% de la ocupación de los trabajadores informales de la cadena de manejo de la llanta usada	Pérdida gradual entre el 10% y el 50% de la ocupación de los trabajadores informales de la cadena de manejo de la llanta usada	

Cuadro 11. (Continuación)

Item		Alternativa 1 Aprovechamiento energético y materias primas en fábricas de Cementsos	Alternativa 2 Aprovechamiento energético en calderas de termoelectricas	Alternativa 3 Materias primas para producción de pavimento asfáltico en Santa Fe de Bogotá	Alternativa 4 Trituración para generar materias primas para productos de caucho	Situación actual/ hornilla panelera (85% en peso llanta)
Ambiental	Ventajas	Todos los componentes de la llanta quedan dentro del cemento- No quedan residuos de la llanta La empresa cementera estudiada tiene sistemas de control de emisiones que garantizan los niveles permisibles de emisión de acuerdo a la reglamentación vigente	La empresa cuenta con equipos de control que garantizan los niveles de vertimientos, emisión y manejo de residuos sólidos (escoria y cenizas)	No existe posibilidad de emisión de compuestos peligrosos	No existe posibilidad de emisión de compuestos peligrosos	Grandes impactos ambientales y de salud pública. Los registros de salud señalan que el 50% de las 10 primeras causas de consulta en la región panelera tienen relación con efectos posibles por la combustión incompleta de la llanta en los trapiches
	Desventajas	Ante eventuales fallas en el sistema de combustión y/o de control de emisiones se pueden generar compuestos peligrosos	<ul style="list-style-type: none"> – Quedan residuos de la llanta a disponer (emisiones de azufre en combustión y fibra en la fragmentación). – Ante eventuales fallas en el sistema de combustión y/o de control de emisiones se pueden generar compuestos peligrosos 	Se deben disponer residuos de la llanta (fibra) en la fragmentación.	Se deben disponer residuos de la llanta (fibra) en la fragmentación	
Actividades previas por el Distrito y la Secretaría Distrital de Ambiente para iniciar controles		<ul style="list-style-type: none"> – Gestión para reglamentación de leyes – Resoluciones complementarias para montaje de programa – Fortalecimiento institucional para vigilancia y control 	<ul style="list-style-type: none"> – Gestión para reglamentación de leyes – Resoluciones complementarias para montaje de programa – Fortalecimiento institucional para vigilancia y control 	<ul style="list-style-type: none"> – Gestión para reglamentación de leyes – Resoluciones complementarias para montaje de programa – Fortalecimiento institucional para vigilancia y control 	<ul style="list-style-type: none"> – Gestión para reglamentación de leyes – Resoluciones complementarias para montaje de programa – Fortalecimiento institucional para vigilancia y control 	

Fuente: Unión Temporal Ocade Ltda./Saniplan/Ambiental S.A. Diagnóstico Ambiental Sobre el Manejo Actual de Llantas y Neumáticos Usados Generado por el Parque Automotor de Santafé de Bogotá. [Sitio Web]. Bogotá Colombia. Año 2000. [Consultado 08 Abril 2018]. Archivo PDF. P 9. Disponible en: <http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/0/Llantas.pdf>

La información recopilada hasta el momento es de gran interés y aplicabilidad en la presente investigación, debido a que nos enfoca en el proceso y el residuo en particular que se está estudiando, el cual es, las llantas usadas, ya se logró identificar la funcionalidad del proceso de pirolisis, sus características, sus aplicabilidades, y de igual forma se realizó una descripción global de las llantas, la problemática actual que se tiene en Colombia con éste residuo, y se describen las ventajas y desventajas de las 4 posibles alternativas que hasta el momento se han planteado para mitigar la problemática actual de la inadecuada disposición de las llantas usadas en Bogotá y aún más en Colombia.

A continuación se presentará la normatividad aplicable en Colombia para el manejo de llantas usadas y su progresión en el tiempo.

2.4.1 Alternativas para la utilización de llantas usadas

2.4.1.1 Uso en asfaltos. Según lo reportado por el IDU en su tercer boletín³³ en el estudio denominado “Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de Llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Bogotá” la primera etapa consistía en el estudio sobre algunas posibles aplicabilidades de acuerdo con experiencias en otros países.

De acuerdo con los resultados que se obtuvieron mediante la caracterización de este tipo de residuos, así mismo los usos que le dan en el extranjero, en búsqueda de un referente, se plantean algunas alternativas de aprovechamiento tales como³⁴:

1. Realizar un aprovechamiento energético debido a que éste insumo funciona muy bien como materia prima en hornos para la industria del cemento.
2. Realizar aprovechamiento energético en centrales termoeléctricas para generar energía.
3. Uso de la llanta triturada como aditivo en la producción de pavimento asfáltico.
4. Uso de la llanta triturada como materia prima para elaboración de elementos de caucho, adornos, suelas, etc.

Basado en ésta información el Instituto de Desarrollo Urbano y la Universidad de los Andes celebraron el Contrato IDU 366-2001 con el objeto de realizar un “estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas” para e

³³ *Ibíd.*, p. 5

³⁴ ROMERO CONDE, Faber Jean Pierre. Aprovechamiento de Llantas Usadas. Monografía Especialización en gestión ambiental. Universidad de América. Bogotá, Colombia. 2017. P 29. [Consultado el 14 de Junio 2018]. Disponible en : físico Biblioteca Universidad de América Sede Posgrados

Identificar una metodología que fuera ideal y así optimizar las propiedades mecánicas y la durabilidad de las mezclas que se realizan con cauchos, provenientes de la trituración de llantas usadas; analizando así una alternativa muy viable para el alto impacto ambiental generado por el inadecuado manejo que le dan a las llantas hoy en día, residuo que esta generando alerta a nivel mundial. El estudio da inicio con la recopilación de información que estuviera relacionada con la construcción de carreteras y vías con pavimentos con aditivo de caucho aportado por llantas usadas, teniendo como referencia experiencias internacionales se encontraron 2 tecnologías asociadas al uso de éste tipo de aditivos en las mezclas de asfalto:

- Proceso por vía húmeda:

Se basa en la producción de un ligante transformado (betún-caucho) mediante el aditamento de partículas de caucho de neumático reciclado a un betún convencional, bajo ciertas condiciones de mezclado³⁵. El GCR se mezcla con asfalto y genera una reacción físico - química entre estos dos elementos y así resulta la mezcla modificada de asfalto y caucho, como se muestra en la grafica 13.

Gráfica 13. Esquema de fabricación de asfalto modificado con caucho por la vía húmeda



Fuente: BISSO FERNANDEZ, Ricardo. Llantas usadas en pavimentos. XI Congreso Nacional Del Asfalto y II Concreto. [Blog digital]. Perú. 2010. [Consultado 02 Junio 2018]. Disponible en: <http://ligante-asfaltico.blogspot.com/p/llantas-usadas-en-pavimentos.html>

³⁵ BISSO FERNANDEZ, Ricardo. Llantas usadas en pavimentos. XI Congreso Nacional Del Asfalto y II Concreto. [Blog digital]. Perú. 2010. [Consultado 02 Junio 2018]. Disponible en: <http://ligante-asfaltico.blogspot.com/p/llantas-usadas-en-pavimentos.html>

- Proceso por vía seca: El neumático es triturado reemplazando una fracción de áridos; esto consiste en concentrar directamente al mezclador la cantidad exacta para cada bache, o mezclarlo preliminarmente con algún compuesto petreo antes de la fabricación. El GDR se debe adicionar directamente a la mezcla caliente.

Gráfica 14. Esquema de fabricación de asfalto modificado con caucho por la vía seca



Fuente: BISSO FERNANDEZ, Ricardo. Llantas usadas en pavimentos. XI Congreso Nacional Del Asfalto y El Concreto. [Blog digital]. Perú. 2010. [Consultado 02 Junio 2018]. Disponible en: <http://ligante-asfaltico.blogspot.com/p/llantas-usadas-en-pavimentos.html>

Apenas concluye la etapa de recopilación de información, se comienza a evaluar en laboratorio las propiedades mecánicas de la mezcla mejorada, buscando identificar el nuevo comportamiento de la mezcla y su comportamiento frente a los mas importantes problemas que se evidencian en los pavimentos y se deben a : fisuramiento por fatiga, ahuellamiento, o falta de adherencia. Esto disminuye su vida útil y aumenta el costo de mantenimiento de vías y carreteras. Para esta esta etapa del proyecto construyeron dos pequeños tramos de prueba con la misma estructura para comparar el comportamiento de un pavimento convencional y uno con aditivo de caucho. Los resultados obtenidos del estudio están relacionados con la densidad

de fisura, perfiles transversales, deformación y temperatura. Para los cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

- Los gránulos de caucho reciclado se pueden usar de manera confiable para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas de asfalto, usándolo como aditivo al ligante. Ésta alternativa es viable ambientalmente .
- El proceso por vía seca no fue el esperado, ya que la mezcla presento poca adherencia y resistencia baja durante los ensayos realizados.

2.4.1.2 Uso industrial. Según la guía para el manejo de llantas usadas³⁶, existe gran cantidad de productos que pueden ser fabricados a partir de llantas usadas; los productos hechos en el ámbito industrial como antideslizantes, superficies de tráfico pesado y soportes requieren de una inversión pequeña en equipos e instalaciones. A continuación se describen algunos de ellos:

- Fabricación de baldosas y pistas deportivas: larga vida útil y espacios sin humedad.
- Fabricación de recubrimientos antideslizantes: se genera efecto antideslizante con el caucho y se da una textura corrugada a la capa de caucho.

2.4.1.3 Uso artesanal. Según la guía para el manejo de llantas usadas³⁷ los productos artesanales pueden ser elaborados con una reducida inversión en instalaciones y equipos poco especializados. Tales como: bebederos para animales, materas, decoración interna y externa de hogares, entre otros.

En el Capítulo 2 se trató de forma precisa el proceso de pirolisis, identificando los subproductos generados mediante el proceso de pirolisis de llantas, indicando cuál de los materiales que contiene la llanta usada posee mayor porcentaje de recuperación, se identifica el ciclo de vida de las llantas en Bogotá. así como su cadena de gestión y las cifras de generación de llantas a nivel Distrital, de igual forma se realiza una descripción detallada de las alternativas actuales que se utilizan para aprovechamiento de éste residuo identificando sus ventajas y desventajas a nivel social, económico y ambiental, identificando una de estas alternativas como un gran apoyo para el aprovechamiento de éste tipo de residuos, y finalmente se menciona la normatividad Nacional y Distrital aplicable actualmente que rige el uso y aprovechamiento de residuos. Con ésta información se cuenta con una visión 360° del residuo y sus alternativas actuales, permitiendo contar con

³⁶ Secretaria Distrital de Ambiente. Guía para el manejo de llantas usadas. [Sitio Web]. Bogotá D.C. CO. Sec. Programas y proyectos. Septiembre 2006.P45. [Consultado 08 Mayo 2018]. Archivo en PDF. Disponible en: http://www.ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=ab80a611-f997-4864-bd6e-7aa0d8680067&groupId=10157

³⁷ *Ibíd.*, P 45

información global y particular de gran aporte para los siguientes capítulos de la investigación.

En el siguiente capítulo se abordará todo lo concerniente a las Metodologías de evaluación de impacto ambiental existentes en la actualidad, y que puedan ser viables para la evaluación del impacto ambiental en tecnologías de conversión térmica o pirolisis.

3. METODOLOGIAS PARA LA EVALUCION DEL IMPACTO AMBIENTAL EN CONVERSION TERMICA O PIROLISIS

3.1 IMPACTO AMBIENTAL DEL PROCESO DE PIROLISIS DE LLANTAS

Según la docente Perevochtchikova³⁸, en su artículo La Evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales define "(...)el término impacto se forma de *impactus* que en latín representa literalmente "chocar". No obstante, en el año 1960 se le otorgó el toque figurativo de acción fuerte y perjudicial. Así, en conjunción con la palabra ambiental, se le dio un significado de efecto producido en el ambiente y los procesos naturales por la actividad humana en un espacio y un tiempo determinados".

De este modo se puede decir que el impacto ambiental (IA) involucra los efectos desfavorables con ecosistemas, la sociedad y el clima, por actividades humanas como uso de recursos naturales no renovables, disposición de residuos de forma inadecuada, contaminación del suelo, del aire, entre otros.

El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial,³⁹: mediante las disposiciones generales del Decreto 2820 de 2010 define "(...)el impacto ambiental como cualquier alteración en el sistema biótico, abiótico y socioeconómico, que sea adverso o beneficioso, total o parcial, que pueda ser atribuido al desarrollo de un proyecto, obra o actividad". Para 1999, la Asociación Internacional para Evaluación del Impacto en cooperación con el Instituto de Evaluación Ambiental del Reino Unido⁴⁰ define la evaluación del Impacto Ambiental como el proceso para "identificar, predecir, evaluar y mitigar los efectos biofísicos, sociales y otros efectos relevantes de propuestas de desarrollo teniendo como prioridad la toma de decisiones y los compromisos que se puedan generar estableciendo 4 objetivos de la evaluación", así

- Hay que asegurar que los factores ambientales sean considerados e incorporados en la toma de decisiones en el desarrollo del proceso.

Así mismo, el Decreto 1076 de 2015, en su artículo 2.2.2.3.1.1 define un impacto

³⁸ PEREVOCHTCHIKOVA María. La evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales. [Revista Scielo]. Artículo científico.Mexico.2012. p 5. [Consultado 29 de Mayo de 2018]. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-10792013000200001

³⁹ PINO RANGEL, Sebastian. Impactos ambientales en el aprovechamiento de plástico para la generación de combustibles. [Documento Físico]. Monografía en Gestión Ambiental. Fundación Universidad de América. Bogotá. Colombia. 2016. P 49. [Consultado el 10 de abril de 2018]. Disponible en : Biblioteca Fundación Universidad De América

⁴⁰ SENÉCAL, Pierre. International Association for Impact Assessment. Principles Of Environmental Impact Assessment Best Practice. [electrónico]. Enero 1999. [consultado: 31, mayo, 2016] Disponible en: http://www.iaia.org/uploads/pdf/principlesEA_1.pdf

ambiental como “cualquier alteración en el medio ambiental biótico, abiótico y socioeconómico, que sea adverso o beneficioso, total o parcial, que pueda ser atribuido al desarrollo de un proyecto, obra o actividad”⁴¹.

3.2 VIABILIDAD AMBIENTAL EN PROCESO DE PIROLISIS DE LLANTAS USADAS

Para Fullana ⁴² los residuos de neumáticos contienen una elevada energía química. En la Tabla 2., se compararán las energías de varios combustibles sólidos. Se puede apreciar que, por ejemplo, los neumáticos tienen más poder calorífico que el carbón bituminoso.

Tabla 2. Poder calorífico de los neumáticos y otros materiales.

COMBUSTIBLE	kJ/kg
Madera	10,178
Residuo solido urbano	12,374
Lignito	16,987
Carbon bituminoso	29,660
Neumatico	33,035
Neumatico sin alambres de acero	36,060

Fuente: Autor, basado en FULLANA FONT, Andrés. Pirolisis y Combustión de Neumáticos Usados y Lodos de Depuradora. [Repositorio Digital]. Trabajo de Grado Doctoral en Ingeniera Química. Universidad de Alicante. Facultad de Ciencias. España. 2001. p 06. [Consultado 16 de Julio 2018]. Disponible en: <file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/AndresFullanaTesis.pdf>

En la tabla 2 se puede evidenciar que los neumáticos usados y aún más los neumáticos despiezados contienen un poder calorífico superior al del mismo carbón bituminoso y la madera, triplicando éste último, los neumáticos usados se pueden utilizar como combustibles directamente en centrales eléctricas, fábricas de

⁴¹ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO Sostenible – Min Ambiente. Decreto 1076 de 2015. Sección 1. [Sitio Web]. Bogotá D.C. CO. Sec. Normativa. 2015. [Consultado 20 Junio 2018]. Disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=62511>

⁴² FULLANA FONT, Andrés. Pirolisis y Combustión de Neumáticos Usados y Lodos de Depuradora. [Repositorio Digital]. Trabajo de Grado Doctoral en Ingeniera Química. Universidad de Alicante. Facultad de Ciencias. España. 2001. p 06. [Consultado 16 de Julio 2018]. Disponible en: <file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/AndresFullanaTesis.pdf>

cementos, fábricas de papel y mezclado con otros residuos en incineradores de residuos para aumentar el poder calorífico de la mezcla. Otra posibilidad es la fabricación de combustible mediante tratamientos de pirolisis. La principal ventaja del combustible obtenido frente al neumático sin tratar es que es más fácil de transportar y utilizar en equipos sin tener que hacer ninguna transformación importante en éstos. Es importante destacar que los productos de pirolisis en muchos casos pueden ser utilizados en otras aplicaciones como puede ser la obtención de carbón activo o productos químicos de síntesis

La forma más común de aprovechamiento energético de los residuos de neumáticos es la combustión. La combustión es un proceso en el que se hace reaccionar el material con el oxígeno a altas temperaturas. El proceso de combustión también puede ser denominado incineración. Frecuentemente el concepto de combustión e incineración se usan indistintamente. La diferencia fundamental estriba en el fin que se le da al proceso; si se pretende obtener energía se habla de combustión y si lo que se pretende es la eliminación de residuos se habla de incineración.

Fullana⁴³ Menciona en su primer capítulo, que los procesos de tratamiento térmico tienen sin lugar a dudas un gran número de ventajas: reducción de masa del residuo, total destrucción de contaminación biológica, destrucción de compuestos orgánicos tóxicos, recuperación energética, etc. No obstante, las instalaciones de incineración pueden producir contaminación.

La contaminación derivada de estas instalaciones se puede dividir en tres partes:

1. Emisiones a la atmósfera.
2. Producción de un residuo acuso con contaminantes.
3. Cenizas.

Las emisiones a la atmósfera son sin lugar a duda la fuente de contaminación más importante de las incineradoras. Desde un punto de vista medioambiental, los compuestos emitidos más importantes son:

- Partículas de sólidos
- Gases ácidos como el cloruro de hidrógeno, dióxido de azufre y fluoruro de hidrogeno
- Metales pesados tales como mercurio, cadmio, plomo...etc.,
- Monóxido de carbono
- Compuestos orgánicos.

⁴³ Ibid., p 16

Estos compuestos orgánicos, a pesar de significar un volumen pequeño frente a los otros compuestos, se han convertido en de gran importancia en los últimos años por su elevada toxicidad. También son llamados micropoluentes, y se destacan : PACs (compuestos aromáticos policíclicos) y los PCDD/Fs (policlorodibenzodioxinas y policlorodibenzofuranos) conocidos como dioxinas. Los contaminantes del aire en la incineración pueden tener varios orígenes:

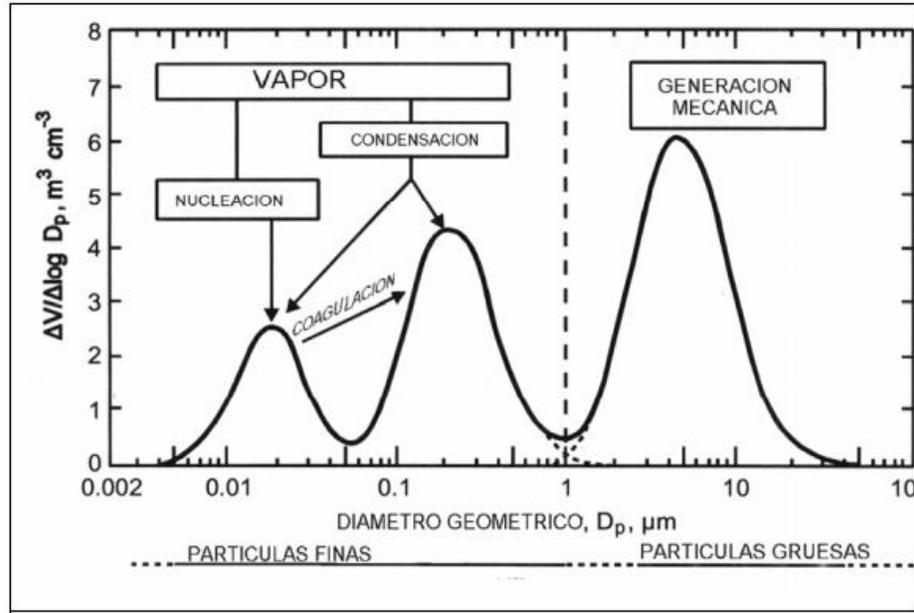
1. Emisiones durante el almacenamiento de los residuos antes de la combustión.
2. Cenizas arrastradas por las corrientes gaseosas.
3. Metales o compuestos metálicos que se evaporan en el horno y que en el gas de salida forman aerosoles o macropartículas.
4. Si los residuos presentan una concentración importante de azufre y cloro se produce cloruro de hidrógeno y dióxido de azufre como productos de combustión completa. Si se queman compuestos nitrogenados o a temperatura del horno elevada, se pueden formar óxidos de nitrógeno (NOx).
5. Productos de pirolisis o combustión incompleta. Si la destrucción térmica o la oxidación por diversas razones no se produce de forma completa se puede formar monóxido de carbono, PACs, PCDD/Fs, hollín y otros.

Es necesario tener en cuenta que además de las emisiones a la atmósfera se debe tener en cuenta la producción de aguas contaminadas y la de cenizas. La producción de aguas contaminadas tiene su principal origen en los sistemas de tratamiento de gases que se suelen emplear en las plantas incineradoras. Los contaminantes que aparecen son por lo tanto los mismos que aparecen en los gases: partículas sólidas, metales pesados, ácidos, PACs y PCDD/Fs. Tanto los PACs como los PCDD/Fs, por tratarse de compuestos insolubles en agua, no se encuentran en grandes cantidades diluidas en el agua pero si aparecen grandes cantidades en las partículas sólidas que presenta esta agua. El tratamiento de estas aguas por lo general se basa en un tratamiento en medio básico con hidróxido cálcico y posterior eliminación de sólidos (precipitados y partículas sólidas).

3.2.1 Efectos de los contaminantes generados en el proceso de combustión por pirolisis. En referencia a las partículas sólidas, éstas tienen diversos efectos en la contaminación atmosférica: por un lado las partículas de pequeño tamaño pueden producir efectos contaminantes por sí mismas (tanto partículas inertes como químicamente activas) aumentando el efecto invernadero y tapando las hojas evitando de que realicen la fotosíntesis de forma correcta; también tienen un efecto negativo sobre el sistema respiratorio en los animales y el hombre, y por otro lado, las partículas sólidas son un medio de transporte importante de todos los demás contaminantes. La presencia de otros contaminantes en las partículas sólidas se debe a la condensación de vapores en algunos casos y a la adsorción en otros.

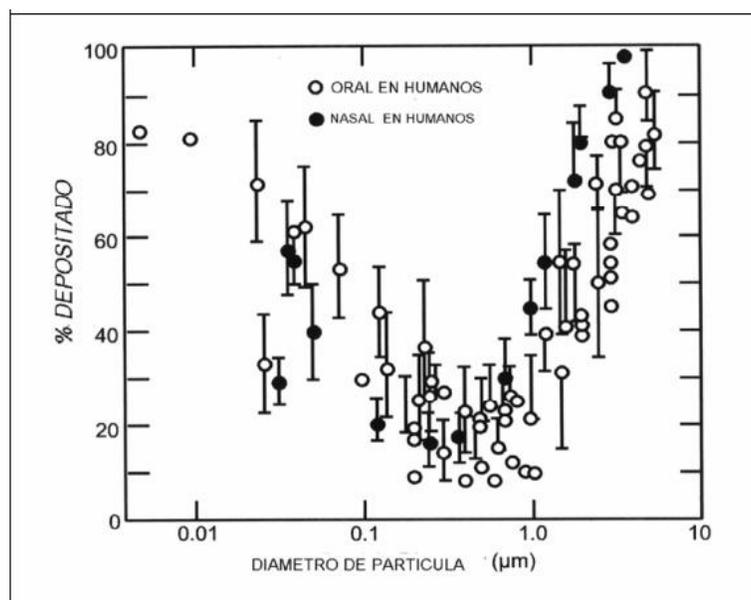
En las gráficas 15 y 16 se puede evidenciar el origen de las partículas en función del tamaño generadas por un pirolizador y deposición de las partículas según su diámetro.

Gráfica 15. Origen de las partículas en función del tamaño



Fuente: FULLANA FONT, Andrés. Pirolisis y Combustión de Neumáticos Usados y Lodos de Depuradora. [Repositorio Digital]. Trabajo de Grado Doctoral en Ingeniería Química. Universidad de Alicante. Facultad de Ciencias. España. 2001. p 19. [Consultado 16 de Julio 2018]. Disponible en: <file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/AndresFullanaTesis.pdf>

Gráfica 16. Deposición de las partículas según su diámetro.



Fuente: FULLANA FONT, Andrés. Pirolisis y Combustión de Neumáticos Usados y Lodos de Depuradora. [Repositorio Digital]. Trabajo de Grado Doctoral en Ingeniería Química. Universidad de Alicante. Facultad de Ciencias. España. 2001. p 19. [Consultado 16 de Julio 2018]. Disponible en: file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/AndresFullanaTesis.pdf

La distribución de tamaños de partícula es de gran importancia a la hora de evaluar los posibles efectos tóxicos de las partículas sólidas. Las figuras 15 y 16 nos permiten ver el porcentaje de partículas depositadas en humanos en función del diámetro de estas. Las partículas más grandes se depositan en la parte exterior del sistema respiratorio por sedimentación, y conforme disminuye el tamaño de las partículas la sedimentación es menor. Cuando las partículas alcanzan un tamaño inferior a $0.1 \mu\text{m}$, la deposición se produce en la parte más interna del sistema respiratorio por difusión y deposición electrostática. Las partículas pequeñas son tóxicas tanto por sí solas porque bloquean los alvéolos produciendo enfermedades respiratorias. Las partículas de tamaño mayor por lo general tienen efecto tóxico cuando éstas llevan compuestos tóxicos, ya que se depositan en la boca, nariz o tráquea.

3.2.2 Productos de combustión incompleta o pirolíticos. Fullana menciona que⁴⁴, el producto de combustión incompleta más importante en cuanto a volumen es el monóxido de carbono. El monóxido de carbono se utiliza como indicador de la eficacia de la combustión y en los incineradores se trabaja en condiciones donde la

⁴⁴ Ibid., p 21

concentración de este es inferior a 0.1 % en volumen. El CO tiene efectos sobre la hemoglobina produciendo el bloqueo de los centros activos de ésta frente al oxígeno. En concentraciones mayores del 5 % produce la muerte.

Otro producto de combustión incompleta de importante volumen es el hollín, que aunque pertenece a este grupo por su origen se estudia como partícula sólida por sus características físicas. Los productos minoritarios o micropolulentes orgánicos debido a su alta toxicidad tienen una gran importancia ambiental. Estos compuestos pueden tener dos orígenes: pueden provenir del residuo que se está incinerando y haber escapado a la combustión o pueden haberse formado como consecuencia de los procesos térmicos que suceden en el horno. Por lo general el segundo grupo es el de mayor importancia debido a que las temperaturas normales de combustión producen la degradación de la mayoría de compuestos y solamente compuestos intermedios en el proceso de pirólisis resisten las condiciones térmicas del horno. Los micropolulentes generados en el proceso de pirólisis se pueden clasificar según la zona en la que se producen. Esta clasificación está formada por dos grupos: los compuestos formados en la zona de alta temperatura como consecuencia de reacciones complejas de tipo radicalarias y los compuestos formados en la zona de postcombustión como consecuencia de reacciones catalizadas en su mayoría por las partículas sólidas presentes en el gas.

Como se mencionó en apartados anteriores existen algunas prácticas inadecuadas para el manejo de las llantas usadas, estas prácticas traen consigo consecuencias medioambientales y para la salud que afectan de manera silenciosa pero letal.

Según se indica en la guía para el manejo de llantas usadas⁴⁵ el factor mutagénico de las emisiones provenientes de la quema de llantas es mucho mayor al de otros tipos de combustiones, como la del petróleo, carbón o leña en una proporción de 3 a 4°C más. Cabe resaltar que un compuesto con características mutagénicas es el que ocasiona un cambio en el material genético de una célula en el cuerpo humano, que se ven reflejadas en defectos al nacer, abortos espontáneos, cáncer, entre otros. Los efectos adversos también se producen en sistemas arcaicos donde usan la llanta directamente como combustible alternativo, ya que no se controlan las emisiones generadas y en la mayoría de los casos son actividades realizadas en espacios pequeños con poca ventilación, como el caso puntual de las hornillas paneleras de algunas zonas de Colombia, que adicional tiene un agravante más por la transferencia de componentes en industrias como la panela y posterior consumo humano. Por lo anterior se evidencia la obligación de elaboración de normas más estrictas que regulen con más rigor la quema de llantas a cielo abierto y especialmente en industrias de alimentos.

⁴⁵ Ibid., P 48

Existen 4 impactos principales asociados con el acopio incorrecto de éste tipo de residuos, los cuales son:

1. Propagación de mosquitos y roedores por el estancamiento de aguas en zonas de difícil acceso, llantas enteras se convierten en un recipiente para agua.
2. Elevado riesgo de incendio por apilamiento de grandes cantidades de llantas con una inadecuada distribución y pocas medidas de control.
3. Alto riesgo de derrumbe al apilar cantidades incontrolables de llantas en lugares poco estables.
4. Deterioro paisajístico.

3.2.3 Contaminación por llantas. Según el boletín No.3 del IDU⁴⁶ frente al residuo de llantas usadas y conforme a los resultados obtenidos en el “Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Bogotá” llama la atención debido a que en todas las etapas de la vida de las llantas se requieren de grandes cantidades de materias primas y procesos que generan un impacto negativo directo al suelo, agua y atmósfera; así mismo todas sus subetapas generan residuos peligrosos y no peligrosos que de igual forma generan un impacto medioambiental negativo, principalmente por un inadecuado manejo y disposición. Algunas de las malas prácticas de manejo y disposición de llantas son:

- Quema de llantas a cielo abierto: ésta mala práctica genera niveles de contaminación elevados al aire, debido a que su combustión emite gases contaminantes como CO, SO_x, NO_x, y COVs. Así mismo se generan en alguna medida hidrocarburos aromáticos – PAHs, dioxinas y furanos, cloruro de hidrógeno, benceno, bifenilos y algunos metales como arsénico, cadmio, zinc, mercurio, que afectan de forma directa la salud en órganos como piel, ojos, mucosas, SNC, entre otros.
- Almacenamiento inadecuado de llantas: debido al inadecuado almacenamiento de estos residuos, se relacionan impactos negativos significativos como: incendios incontrolables, proliferación de roedores e insectos, daño paisajístico. Basado en esta necesidad se requiere de manera urgente la búsqueda de

⁴⁶ IDU. Boletín Técnico No. 3. Mejoras mecánicas de las mezclas asfálticas con grano de caucho reciclado-GCR. Instituto de desarrollo urbano. [Sitio WEB]. Bogotá. 2015. [Consultado 14 06 2018]. Disponible en: https://www.idu.gov.co/Archivos_Portal/Transparencia/Informacion%20de%20interes/SIIPVIALES/Innovaci%C3%B3n/Portafolio/2017/09%20Septiembre/Boletines%20T%C3%A9cnicos/02%20boletin_grano_caucho_reciclado_2015.pdf

alternativas de aprovechamiento y recuperación para este residuo, encontrando varias oportunidades una de éstas es el uso como aditivo para la mezcla de asfalto con el caucho de llanta triturado.

3.3 METODOLOGÍAS APLICADAS PARA EVALUAR EL IMPACTO AMBIENTAL EN UN PROCESO DE PIROLISIS

En el presente se capitulo se realiza la explicación de las metodologías aplicadas para la evaluación de los impactos ambientales en diferentes procesos, enfocándonos directamente al proceso que nos compete, la pirolisis.

En este capítulo se abordan los estudios de impacto ambiental existentes que permitan establecer mediante un posterior análisis la viabilidad ambiental del aprovechamiento de los residuos plásticos para la generación de combustibles.

El Ministerio de Ambiente⁴⁷, Vivienda y Desarrollo Territorial, mediante las disposiciones generales del “Decreto 2820 de 2010 define el impacto ambiental como cualquier alteración en el sistema biótico, abiótico y socioeconómico, que sea adverso o beneficioso, total o parcial, que pueda ser atribuido al desarrollo de un proyecto, obra o actividad” . Para 1999, la Asociación Internacional para Evaluación del Impacto en cooperación con el Instituto de Evaluación Ambiental del Reino Unido⁴⁸ definieron “la evaluación del Impacto Ambiental como el proceso para identificar, predecir, evaluar y mitigar los efectos biofísicos, sociales y otros efectos relevantes de propuestas de desarrollo teniendo como prioridad la toma de decisiones y los compromisos que se puedan generar estableciendo 4 objetivos de la evaluación”, así:

- Hay que asegurar que los factores ambientales sean considerados e incorporados en la toma de decisiones en el desarrollo del proceso.
- Para anticipar, evitar, minimizar o compensar los efectos adversos biofísicos, sociales y otros significativos en el desarrollo del proceso.
- Proteger la productividad y la capacidad de los sistemas naturales y los procesos ecológicos manteniendo sus funciones
- Promover el desarrollo sostenible, optimizar los recursos y gestionar las oportunidades de mejora.

⁴⁷ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO. Decreto 2820. (Febr 2010). Por el cual se designa ... Diario Oficial. Bogotá. 2010. Art.1.

⁴⁸ SENÉCAL, Pierre. International Association for Impact Assessment. Principles Of Environmental Impact Assessment Best Practice. [electrónico]. Enero. 1999. [Consultado: 19 de Julio de 2018]. Disponible en: http://www.iaia.org/uploads/pdf/principlesEA_1.pdf

Por otro lado el Decreto 1076 de 2015⁴⁹, en su artículo 2.2.2.3.1.1 define un impacto ambiental como “cualquier alteración en el medio ambiental biótico, abiótico y socioeconómico, que sea adverso o beneficioso, total o parcial, que pueda ser atribuido al desarrollo de un proyecto, obra o actividad”

Varios tipos de métodos han sido desarrollados y utilizados en el proceso de evaluación del impacto ambiental de proyectos. No obstante, ningún método puede ser usado por sí solo para cubrir los tipos de actividades y variedad de elementos que tienen que ver en un estudio de impacto, de allí parte que sabemos que la llave para estas actividades está en seleccionar de forma adecuada los métodos más apropiados para suplir las necesidades de cada tipo de estudio de impacto⁵⁰.

Con lo anterior y con el propósito de establecer los elementos metodológicos más adecuados para realizar la evaluación de los impactos ambientales de la tecnología de Pirolisis, utilizada en llantas usadas para su aprovechamiento, se presentan a continuación las metodologías de mayor uso en el ámbito nacional e internacional, definidos por la universidad Nacional de Colombia⁵¹

3.3.1 Metodología de Leopold. La metodología de Leopold fue el primer método que se estableció para las evaluaciones de impacto ambiental, siendo desarrollado por el Servicio Geológico del Departamento de Interior de Estados Unidos, en el año de 1971. Consiste en una matriz de doble entrada en la que se disponen en las filas, los factores ambientales que pueden ser afectados y en las columnas, las actividades que van a tener lugar en un proyecto. Considerando a estas últimas como la causa de los posibles impactos. Cada celda de la matriz se divide por una línea diagonal, con lo cual se generan dos áreas triangulares, la superior correspondiente a la magnitud (m) y la inferior correspondiente a la importancia (I) como se muestra en la Tabla 3. Estos atributos son evaluados en una escala de 1 a 10, asignando el valor de 1 a la alteración mínima y 10 a la máxima. El carácter positivo o negativo del impacto se señala mediante un signo (+/-) que antecede la calificación.

⁴⁹ Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo. Decreto 1075 .Artículo 2. . [Electrónico]. 2015. [Consultado: 19 de Julio de 2018]. Disponible en: http://www2.igac.gov.co/igac_web/normograma_files/Decreto%201076%20de%202015.pdf

⁵⁰ GARCIA, Leyton. Metodologías de evaluación del impacto ambiental. Tesis. [Electrónico]. [Consultado el 17 de Julio 2018]. Disponible en: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6830/04LagI04de09.pdf>

⁵¹ Metodología para la Evaluación de impactos ambientales. Universidad nacional de Colombia. Oficina de Gestión Ambiental. Bogotá. [Electrónico]. [Consultado el 19 julio 2018]. Disponible en: <http://oga.bogota.unal.edu.co/wp-content/uploads/2016/08/Metodologia-para-la-evaluaci%C3%B3n-de-impactos-ambientales.pdf>

Tabla 3. Matriz de Leopold

	Acción 1	Acción 2	Acción n
Factor Ambiental 1			
Factor Ambiental 2			
Factor Ambiental n			

Fuente: Metodología para la Evaluación de impactos ambientales. Universidad nacional de Colombia. Oficina de Gestión Ambiental. Bogotá. P 11. [Electrónico]. [Consultado el 19 julio 2018]. Disponible en: <http://oga.bogota.unal.edu.co/wp-content/uploads/2016/08/Metodologia-para-la-evaluaci%C3%B3n-de-impactos-ambientales.pdf>

La *magnitud* expresa el grado, extensión o escala del impacto, por lo que se puede relacionar con el área afectada o área de influencia del impacto. La *importancia*, por su parte, expresa el grado de alteración del factor ambiental, por lo que debe tenerse en cuenta su estado inicial, y las consecuencias de la acción analizada sobre dicho factor ambiental.

Si bien este método es uno de los más sencillos, debido a que evalúa 2 atributos (magnitud e importancia), es también uno de los más subjetivos, ya que no se definen escalas para evaluarlos. Tampoco se define claramente que operaciones se deben realizar con las calificaciones para entregar un concepto frente al impacto, y no se proporciona un marco para la interpretación de los resultados. De acuerdo a los autores, los impactos que obtienen las mayores calificaciones, son considerados significativos y debe profundizarse su análisis en un documento que da soporte a la evaluación, sin embargo no especifica a partir de qué valor.

Otras limitaciones de esta metodología son la carencia de la dimensión temporal en el análisis, la ausencia de un mecanismo de comparación en el escenario con y sin proyecto (línea base), y la falta de análisis de las relaciones de causalidad entre los impactos, las cuales solo cobran sentido cuando se complementa con el análisis detallado de los impactos en el documento soporte.

3.3.2 Metodología Cualitativa. Propuesta para España en el año de 1996, por Vicente Conesa, esta metodología se basa en la calificación de 11 atributos que buscan describir de manera detallada el impacto ambiental. Cada atributo es evaluado de manera subjetiva, empleando escalas cualitativas o adjetivos (como alto, medio, bajo, etc.) a los cuales se les ha asignado un valor numérico, de manera que éste se incrementa en la medida que describe una situación indeseable.

Tabla 4. Atributos de los impactos ambientales según la metodología cualitativa.

Atributo	Característica	Opciones
Naturaleza (+/-)	Describe si el impacto es positivo o negativo	(+) (-)
Intensidad (In)	Evalúa el grado de destrucción o transformación del factor ambiental	Baja (1) Media (2) Alta (4) Muy alta (8) Total (12)
Extensión (Ex)	Evalúa el área de influencia o afectación	Puntual (1) Parcial (2) Extensa (4) Total (8) Crítica (+4)
Momento (Mo)	Se califica de acuerdo con el tiempo transcurrido entre la actividad y la manifestación del impacto.	Largo plazo (1) Mediano plazo (2) Corto plazo (3) Inmediato (4) Crítico (+4)
Persistencia (Pe)	Evalúa el tiempo de permanencia del impacto	Fugaz o momentáneo (1) Temporal o transitorio (2) Pertinaz o persistente (3) Permanente o constante (4)
Reversibilidad (Rv)	Se califica de acuerdo con el tiempo que puede transcurrir entre la finalización de la actividad que origina el impacto y la reconstrucción del factor ambiental por medios naturales.	Corto plazo (1) Mediano plazo (2) Largo plazo (3) Irreversible (4)
Recuperabilidad (Rc)	Evalúa la posibilidad de reconstruir el factor ambiental por medios técnicos y el tiempo requerido para esto.	Recuperable de manera inmediata (1) Recuperable en el corto plazo (2) Recuperable en el mediano plazo (3) Recuperable en el largo plazo (4) Mitigable, sustituible o compensable (4) Irrecuperable (8)
Sinergia (Si)	Evalúa la capacidad del impacto para interactuar con otros, de forma que se potencialice sus efectos.	Sin sinergismo o simple (1) Sinergismo moderado (2) Muy sinérgico (4)
Acumulación (Ac)	Califica el incremento progresivo del impacto.	Simple (1) Acumulativo (4)
Efecto (Ef)	Evalúa la relación causa-efecto del impacto.	Indirecto o secundario (1) Directo o primario (4)
Periodicidad (Pr)	Tiene en cuenta la regularidad de la manifestación del impacto.	Irregular, aperiódico y esporádico (1) Periódico o de regularidad intermitente (2) Continuo (4)

Fuente: Metodología para la Evaluación de impactos ambientales. Universidad nacional de Colombia. Oficina de Gestión Ambiental. Bogotá. P 12. [Electrónico]. [Consultado el 19 julio 2018]. Disponible en: <http://oga.bogota.unal.edu.co/wp-content/uploads/2016/08/Metodologia-para-la-evaluaci%C3%B3n-de-impactos-ambientales.pdf>

En la tabla 4 se muestran los atributos empelados en ésta metodología. Esta metodología define la importancia del impacto, mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 6. Ecuación para impacto ambiental metodología cualitativa

$$I = \pm [(3 In) + (2 Ex) + Mo + Pe + Rv + Rc + Si + Ac + Ef + Pr]^{52}$$

⁵² Ibíd., P 13.

Para interpretar el resultado de la evaluación se aplica la escala mostrada en la Tabla 5:

Tabla 5. Escala de interpretación de la metodología cualitativa

Categoría	Calificación
Irrelevante	<25
Moderado	25-50
Severo	50-75
Critico	>75

Fuente: Metodología para la Evaluación de impactos ambientales. Universidad nacional de Colombia. Oficina de Gestión Ambiental. Bogotá. P 13. [Electrónico]. [Consultado el 19 julio 2018]. Disponible en: <http://oga.bogota.unal.edu.co/wp-content/uploads/2016/08/Metodologia-para-la-evaluaci%C3%B3n-de-impactos-ambientales.pdf>

Aunque esta metodología integra más elementos al análisis que la metodología de Leopold, sigue teniendo un carácter altamente subjetivo. Ya que al ser más las decisiones que toma el evaluador en cada uno de los atributos, la incertidumbre de la evaluación es mayor.

Otros aspectos a considerar, dentro de las limitaciones de la metodología, son el uso de atributos que no aportan a la estimación de la importancia del impacto. Por ejemplo la *reversibilidad*, ya que aunque el impacto puede tener esta característica, el factor ambiental afectado no necesariamente volverá a su condición inicial una vez cese la actividad que genera el impacto, ya que esto dependerá de la voluntad humana de restituir dicho factor.

El atributo *momento* también presenta esta misma limitación, ya que un impacto muy significativo, como por ejemplo la extinción de una especie, no es más grave si ocurre en el corto o mediano plazo, en cualquiera de los dos lapsos la especie terminará extinguiéndose. Si bien este atributo es útil para fijar los tiempos de aplicación de las medidas de manejo, es inconveniente incluirlo para definir la significancia del impacto.

Adicionalmente al no hacer uso de información cuantitativa no permite establecer metas u objetivos de gestión.

3.3.3 Metodología de la matriz de valoración de riesgos RAM (Risk Assessment Matrix). Ésta matriz es evaluada mediante el análisis cualitativo los riesgos y facilita así la clasificación de amenazas al medio ambiente, a la salud y a

la seguridad, así como la relación con clientes y la imagen de la empresa. La Columna vertebral de esta matriz corresponde a las consecuencias y a la probabilidad.

Según el documento elaborado por Ecopetrol⁵³, “para determinar el nivel de las consecuencias se utiliza una escala de "0" a "5"; para evaluar la probabilidad se utiliza una escala de “A” a “E”, basándose en la experiencia o evidencia histórica en que las consecuencias identificadas se han materializado dentro de la industria, la empresa o el área; representa la probabilidad de que se desencadenen las consecuencias potenciales o reales estimadas, según el caso”. Al cruzar estas dos escalas de determina la evaluación y la clasificación de forma cualitativa del riesgo. Para el caso de RAM, no es una ciencia exacta la estimación de las consecuencias y la probabilidad, debido a que la primera se basa en la respuesta de ¿Qué ocurrió?, y la segunda se basa en información histórica de casos ocurridos tiempo atrás en condiciones semejantes a las actuales.

Cuadro 12. Criterios para la asignación de la probabilidad.

Letra	Característica
A	No ha ocurrido en la industria
B	Ha ocurrido en la industria
C	Ha ocurrido en la empresa
D	Sucede varias veces por año en la empresa
E	Sucede varias veces por año en la Unidad, Superintendencia o Departamento.

Fuente: Metodología para la Evaluación de impactos ambientales. Universidad nacional de Colombia. Oficina de Gestión Ambiental. Bogotá. P 14. [Electrónico]. [Consultado el 19 julio 2018]. Disponible en: <http://oga.bogota.unal.edu.co/wp-content/uploads/2016/08/Metodologia-para-la-evaluaci%C3%B3n-de-impactos-ambientales.pdf>

Para la evaluación de la probabilidad, se asigna una letra entre la “A” y la “E”, dependiendo de la experiencia o evidencia histórica de ocurrencia de los resultados identificadas. Como criterios para la asignación de la letra se tienen en cuenta las características establecidas en el Cuadro 12.

Posteriormente se procede a la clasificación riesgos. Para este paso se tiene en cuenta la categoría con la que se relaciona la situación en particular, ya sea Personas, Económica, Ambiental, Cliente o Imagen. El valor asignado a la consecuencia (0-5) y el nivel de probabilidad del suceso (A-E).

⁵³ Uso de la matriz de valoración de riesgos – RAM. Ecopetrol S.A. Dirección de Responsabilidad Integral. [Electrónico]. P 4. marzo 2008. [Consultado 229 de mayo de 2018]. Disponible en: <https://positivaeduca.positiva.gov.co/matriz/web/archivo/img/10-4-2015-16-13-513.pdf>

Dado el resultado de la clasificación, se procede a valorar el riesgo según la Matriz de Valoración de Riesgos RAM (Cuadro 13) y analizar los resultados, empleando los criterios definidos en el Cuadro 12.

Cuadro 13. Matriz de valoración del riesgo RAM.

CONSECUENCIAS					PROBABILIDAD					
					A	B	C	D	E	
Personas	Económica	Ambiental	Cientes	Imagen de la Empresa	No ha ocurrido en la Industria	Ha ocurrido en la industria	Ha ocurrido en la Empresa	Sucede varias veces al año en la Empresa	Sucede varias veces al año en la Unidad, Superintendencia o Departamento	
Una o más fatalidades	Catastrófica > \$10M	Contaminación Irreparable	Veto como proveedor	Internacional	5	M	M	H	H	VH
Incapacidad permanente (parcial o total)	Grave \$1M a \$10M	Contaminación Mayor	Pérdida de participación en el mercado	Nacional	4	L	M	M	H	H
Incapacidad temporal (>1 día)	Severo \$100k a \$1M	Contaminación Localizada	Pérdida de clientes y/o desabastecimiento	Regional	3	N	L	M	M	H
Lesión menor (sin incapacidad)	Importante \$10k a \$100k	Efecto Menor	Quejas y/o reclamos	Local	2	N	N	L	L	M
Lesión leve (primeros auxilios)	Marginal <\$10k	Efecto Leve	Incumplir especificaciones	Interna	1	N	N	N	L	L
Ninguna lesión	Ninguna	Ningún efecto	Ningún impacto	Ningún impacto	0	N	N	N	N	N

Fuente: Metodología para la Evaluación de impactos ambientales. Universidad nacional de Colombia. Oficina de Gestión Ambiental. Bogotá. P 16. [Electrónico]. [Consultado el 19 julio 2018]. Disponible en: <http://oga.bogota.unal.edu.co/wp-content/uploads/2016/08/Metodologia-para-la-evaluaci%C3%B3n-de-impactos-ambientales.pdf>

Cuadro 14. Análisis del riesgo.

COLOR	RIESGO	TOMANDO DECISIONES	PARA EJECUTAR TRABAJOS
VH	Muy Alto	Intolerable.	Buscar alternativas. Si se decide hacer el trabajo, la alta dirección (Vicepresidente o Director) define el equipo para la elaboración del ATS y lo aprueba.
H	Alto	Deben buscarse alternativas que presenten menor riesgo. Si se decide realizar la actividad se requiere demostrar cómo se controla el riesgo y los cargos de niveles iguales o superiores a Gerente, Gerente General, Gerente de Negocio o Jefe de Unidad deben participar y aprobar la decisión.	Buscar alternativas. Si se decide hacer el trabajo, el Gerente, Gerente General, Gerente de Negocio, Jefe de Unidad o Jefe de Departamento del área involucrada nombra el equipo para elaborar ATS y lo aprueba.
M	Medio	No son suficientes los sistemas de control establecidos; se deben tomar medidas que controlen mejor el riesgo.	El coordinador nombra el equipo para elaborar ATS y lo aprueba.
L	Bajo	Se deben gestionar mejoras a los sistemas de control establecidos (procedimientos, listas de chequeo, responsabilidades, protocolos, etc.).	Efectuar Tres Ques: <ul style="list-style-type: none"> • ¿Qué puede salir mal o fallar? • ¿Qué puede causar que algo salga mal o falle?
N	Ninguno	Riesgo muy bajo, usar los sistemas de control y calidad establecidos (procedimientos, listas de chequeo, responsabilidades, protocolos, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • ¿Qué podemos hacer para evitar que algo salga mal o falle?

Fuente: Uso de la matriz de valoración de riesgos – RAM. Ecopetrol S.A. Dirección de Responsabilidad Integral. [Electrónico]. P 8. Marzo 2008. [Consultado 229 de mayo de 2018]. Disponible en: <https://positivaeduca.positiva.gov.co/matriz/web/archivo/img/10-4-2015-16-13-513.pdf>

Aunque la metodología aborda diferentes dimensiones para el impacto y se basa en datos reales, para el caso de definición de la probabilidad, cuenta con varias limitaciones a considerar.

La primera es que algunos de los criterios definidos para la evaluación no son relevantes para la determinar la significancia o gravedad de los impactos, por ejemplo *la afectación a la imagen de la empresa*. Para ilustrar este hecho se puede considera un impacto de alta significancia -como por ejemplo la extinción de una especie endémica- el cual puede no tener ningún efecto sobre la imagen de la empresa, si la especie es poco conocida o poco valorada por los habitantes cercanos al proyecto.

La segunda limitación es que al incorporar la probabilidad de ocurrencia, como criterio de evaluación, se pueden subvalorar impactos que se presentan con una baja frecuencia. Finalmente, y como tercera limitación, esta metodología tiene un alto grado de subjetividad, ya que los criterios a tener en cuenta no son fáciles de evaluar.

3.3.4 Metodología de las Empresas Públicas de Medellín. Esta fue desarrollada en Colombia por las Empresas Públicas de Medellín fundamentándose en las metodologías de Leopold y Conesa. A pesar de que su propósito inicial fue el de evaluar los proyectos hidroeléctricos, puede ser empleada para la evaluación de otro tipo de actividades tras la realización de los ajustes pertinentes.

De acuerdo a la universidad Nacional,⁵⁴ su aplicación puede dividirse en tres etapas:

- La primera etapa consiste en organizar las actividades del proyecto o intervención, de manera que se obtengan acciones agrupadas por características semejantes.
- La segunda etapa toma las acciones determinadas e identifica los impactos ambientales, a través de diagramas de redes o de flujo. Dichos diagramas representan la relación entre la acción, el efecto y el impacto, lo que permite un proceso secuencial para la identificación. Es necesario aclarar que esta parte se realiza de forma gráfica, sin que medie un análisis cuantitativo.
- Finalmente, en la tercera etapa se evalúa los impactos. Luego de haberse identificado, la significancia ambiental de los impactos es valorada a través del cálculo del índice de Calificación Ambiental (Ca), empleado los criterios del cuadro 15...

Cuadro 15 Criterio de evaluación de la metodología de EPM

Atributo	Descripción
Clase (C)	Indica el sentido del cambio producido por la acción pudiendo ser positivo (+) o negativo (-).
Presencia (P)	Representa como un porcentaje de posibilidad de ocurrencia. Al no tener certeza absoluta sobre la ocurrencia de todos los impactos, este criterio representa la probabilidad de que el impacto se genere.
Duración (D)	Expresada en función del tiempo que permanece el impacto y sus consecuencias de forma activa (corta, larga, muy larga, etc.).
Evolución (E)	Indica la velocidad en la que se desarrolla un impacto hasta alcanzar todas sus consecuencias (rápido, lento, etc.)
Magnitud (M)	Califica el tamaño del cambio ambiental producido por la actividad, representada de manera absoluta o relativa (porcentaje) a través de la comparación de los elementos ambientales con o sin proyecto.

Fuente: Metodología para la Evaluación de impactos ambientales. Universidad nacional de Colombia. Oficina de Gestión Ambiental. Bogotá. P 18. [Electrónico]. [Consultado el 19 julio 2018]. Disponible en: <http://oga.bogota.unal.edu.co/wp-content/uploads/2016/08/Metodologia-para-la-evaluaci%C3%B3n-de-impactos-ambientales.pdf>

Para el cálculo de la calificación ambiental se aplica la ecuación:

⁵⁴ Óp. cit., P 18

Ecuación 7. Calificación ambiental según Arboleda- EPM

$$Ca = C (P[aEM + bD])^{55}$$

Donde *a* y *b* son constantes de ponderación para equilibrar los pesos de cada parte de la ecuación y cuya suma debe ser igual a 10.

Como se puede apreciar en la Tabla 16, estos criterios son similares a los de la metodología cualitativa, por lo que presenta las mismas limitaciones. Es decir una alta subjetividad, dificultades para la definición de las escalas de evaluación, y falta de información para establecer metas u objetivos de gestión, al no hacer uso de mediciones cuantitativas. Adicionalmente, al hacer uso de la probabilidad de ocurrencia genera un sesgo mayor, ya que como se mencionó anteriormente, se pueden subvalorar impactos que son significativos, pero ocurren con una baja frecuencia.

3.3.5 Metodología de redes complejas. Desarrollada por Martínez Bernal⁵⁶, se basa en el “análisis de las relaciones de causalidad que se muestran entre las actividades del proyecto y los impactos ambientales. Para esto hace uso de una matriz de adyacencia (Cuadro 16) en la que se ubican, tanto en las filas como en las columnas, las actividades y los impactos ambientales potenciales”

Esta matriz se diligencia con uno o cero, obedeciendo de si existe o no la relación de causalidad entre los elementos analizados.

Cuadro 16. Matriz adyacente.

	A-01	A-02	A-n	I-01	I-02	I-n
A-01	0	0	0	1	0	0
A-02	0	0	0	0	1	0
A-n	0	0	0	1	0	0
I-01	0	0	0	0	1	0
I-02	0	0	0	0	0	1
I-n	0	0	0	0	0	0

Fuente: MARTINEZ BERNAL, Liven Fernando. Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de: Magister en Medio Ambiente y Desarrollo. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2013. [Repositorio Digital]. [Consultado el 12 de junio de 2018]. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/40046/1/08905141.2013.pdf>

⁵⁵ *Ibíd.*, P 18

⁵⁶ MARTINEZ BERNAL, Liven Fernando. Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de: Magister en Medio Ambiente y Desarrollo. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2013. [Repositorio Digital]. [consultado el 12 de junio de 2018]. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/40046/1/08905141.2013.pdf>

Esta metodología ha sido empleada para el análisis de impactos ambientales generados por la industria de hidrocarburos, y para la identificación y evaluación de las problemáticas asociadas a los humedales de Bogotá –por parte de la Secretaria de Ambiente Distrital SDA-, entre otros.⁵⁷

3.3.6 Metodología Battelle-Columbus. Esta metodología fue desarrollada por los laboratorios Battelle-Columbus y consiste en una lista de chequeo que pondera las características ambientales, a través de una unidad conmensurable que permite su comparación. De esta forma, las diferentes unidades de medida, como por ejemplo mg/L O₂ de la demanda química de oxígeno (DQO) o el número de UFC/100ml de *Escherichia coli*, son convertidas a unidades de Calidad Ambiental (CA), a través de funciones de transformación.

Su aplicación puede resumirse en cuatro etapas⁵⁸ :

- La asignación de valores a los parámetros ambientales.
- La transformación de los indicadores de calidad ambiental (CA).
- La asignación de Unidades de Importancia a los factores ambientales.
- El cálculo de las Unidades de Impacto Ambiental.

La asignación de valores a los parámetros ambientales consiste en su medición (a través de trabajo en campo) y predicción (mediante modelación o conocimiento experto), para las situaciones con y sin proyecto. Estas mediciones se reportan en sus unidades de medida habituales.

La transformación de los indicadores de calidad ambiental, toma los diferentes valores de los parámetros obtenidos y sus respectivas unidades de medida para convertirlos a unidades de calidad ambiental (CA), por medio de las funciones de transformación. Como resultado se obtienen valores que oscilan entre cero y uno, donde cero (0) significa una mala calidad ambiental y uno (1) la calidad ambiental óptima.

Obtenidos los CA, se procede a la adjudicación de Unidades de Importancia de los factores. Dado a que cada factor ambiental tiene una función y grado de importancia diferente en el sistema, se distribuyen 1000 Unidades de Importancia del Parámetro (UIP) entre los indicadores para realizar su ponderación. De esta forma las UIP representan el grado de importancia relativa de cada factor.

Finalmente, se realiza el cálculo de las Unidades de Impacto Ambiental (UIA). En esta etapa se calculan los efectos ambientales a través de los cambios derivados de la realización del proyecto. Es decir, la diferencia entre las sumas ponderadas de los parámetros con y sin proyecto.

⁵⁷ *Ibíd.*, P 20.

⁵⁸ *Ibíd.*, P 21.

Así pues, cada CA es multiplicado por su UIP y sumado de acuerdo a su origen (sin proyecto o con proyecto) para posteriormente calcular la diferencia total de las Unidades de Impacto Ambiental. Este proceso se realiza empleando la siguiente ecuación:

Ecuación 8. Calculo de unidades de impacto ambiental según B-C

$$\Delta (UIA) = \sum_{i=1}^m (CAi)1 * UIPi - \sum_{i=1}^m (CAi)2 * UIPi$$

59

Para la ecuación se tiene que⁶⁰:

UIA: Unidades de Impacto Ambiental

(CAi)1: Unidades de Calidad Ambiental con proyecto

(CAi)2: Unidades de Calidad Ambiental sin proyecto

UIP: Unidades de Importancia del Parámetro

m: Número de parámetros ambientales

Aunque esta metodología presenta importantes limitaciones cuando se realiza de forma predictiva, ya que es necesario modelar el comportamiento de cada parámetro ambiental en el escenario con proyecto; es factible de aplicar en la fase de funcionamiento, ya que cada parámetro se puede evaluar y contrastar con una medición anterior. Otra ventaja de la metodología es que al basarse en información cuantitativa, reduce al mínimo la subjetividad e incertidumbre de la evaluación, y permite establecer indicadores, objetivos y metas, para evaluar las medidas de manejo y el desempeño ambiental de la organización.

⁵⁹ Metodología para la Evaluación de impactos ambientales. Universidad nacional de Colombia. Oficina de Gestión Ambiental. Bogotá. P 21. [Electrónico]. [Consultado el 19 julio 2018]. Disponible en: <http://oga.bogota.unal.edu.co/wp-content/uploads/2016/08/Metodologia-para-la-evaluaci%C3%B3n-de-impactos-ambientales.pdf>

⁶⁰ Metodología para la Evaluación de impactos ambientales. Universidad nacional de Colombia. Oficina de Gestión Ambiental. Bogotá. P 21. [Electrónico]. [Consultado el 19 julio 2018]. Disponible en: <http://oga.bogota.unal.edu.co/wp-content/uploads/2016/08/Metodologia-para-la-evaluaci%C3%B3n-de-impactos-ambientales.pdf>

4. COMPARACION Y ELECCION DE METODOLOGIA IDONEA PARA EL PROCESO DE PIROLISIS DE LLANTAS USADAS

Es posible analizar basado en la información obtenida que Leopold hace un análisis netamente lineal donde no diferencia entre factores ambientales, da el mismo valor de importancia independiente al grado de afectación, todos son iguales, de igual forma Vicente Conesa mediante su Metodología Cualitativa no define escalas para la evaluación de los atributos, quedan sujetos a la interpretación del evaluador, por lo que la misma categoría en dos estudios diferentes puede hacer referencia aspectos que no tienen nada que ver el uno con el otro. Por otro lado Ecopetrol en su instauración y definición de la Matriz RAM aborda diferentes dimensiones para el impacto y se basa en datos reales, pero cuenta con algunas limitaciones en su definición de probabilidad, ya que, a incorporar la probabilidad de ocurrencia como un criterio de evaluación, se pueden valorar impactos que se presentan con poca frecuencia de forma inadecuada, y de igual forma que las dos anteriores tiene un alto grado de subjetividad debido a que sus criterios solo los puede evaluar personal totalmente capacitado, generando riesgo en que el evaluador sea el idóneo y ofrezca resultados realmente certeros. En cuanto a Bernal con su matriz de redes complejas, es un método bastante bueno y acertado ya que genera una serie de redes basadas en métodos y análisis numéricos y esto permite identificar los impactos ambientales primarios de manera acertada, hacia los cuales se debe dirigir la atención para la generación de planes de acción inmediatos, reduce su subjetividad ya que no es el evaluador quien toma las decisiones, pero no nos aplica para la presente investigación debido a que se requiere de información detallada y practica con la que no contamos, además de un software especializado para su respectiva ejecución y análisis, lo que hace que de igual forma que las anteriores quede fuera de las alternativas viables para la presente investigación. Battelle-Columbus es una metodología creada para la planificación de recursos hídricos de los Estados Unidos, y a pesar de que es una metodología que abarca muchos beneficios y es aterrizada a números, continua siendo una lista de chequeo un poco más especializada (sobre todo al tipo de industria para la que fue creada), por lo cual no es fácilmente aplicable a cualquier tipo de proyecto y no aplica para la presente investigación.

Finalmente Conesa que luego al unirse a Arbeláez estructura de una forma más acertada su metodología, cuenta con factores o corrientes que permiten analizar cada uno de los atributos de forma individual, es un método mixto pues permite la caracterización y la estimación de los impactos ambientales, ha sido aceptado por las autoridades ambientales Colombianas y por entidades internacionales como el Banco Mundial y el BID, por ende es posible identificar que la elección de la metodología es FACTIBLE para la identificación del impacto ambiental es el Método Arboleda o EPM, a partir de Conesa se realiza una ponderación real utilizando factores que determinan el nivel de importancia para algunos de los atributos que contiene esta información.

Cuadro 17. Ventajas y desventajas de las metodologías para evaluación de impacto ambiental, parte 1.

METODOLOGIAS PARA EVALUACION DE IMPACTO AMBIENTAL						
VENTAJAS	MATRIZ DE LEOPOLD	METODOLOGIA CUALITATIVA	MATRIZ DE VALORACION DE RIESGOS RAM (Risk Assessment Matrix)	METODOLOGIA EPM (Empresas Publicas de Medellin)	REDES COMPLEJAS	BATELLE - COLUMBUS
	* Es uno de los metodos mas sencillos, debido a que evalua dos atributos (magnitud e importancia)	* Se basa en la calificacion de 11 atributos que buscan describir de manera detallada el impacto ambiental.	* Es una herramienta para la evaluacion cualitativa de los riesgos y facilita la clasificacion de las amenazas a la salud, seguridad, medio ambiente, relacion con clientes, bienes e imagen de la empresa.	* Recopila informacion de las metodologias Leopold y Conesa	* Hace uso de una matriz de adyacencia en la que se ubican en filas y columnas las actividades y su potencial impacto ambiental.	* Cuenta con una ecuacion para la determinacion de Unidades de Impacto Ambiental, lo que la hace mas acertada en sus resultados
	* No requiere medios sofisticados para aplicarla	* Es mas precisa debido a que le atribuye un valor a cada atributo y por medio de una matriz se obtiene un resultado.	* Cuenta con matriz para la valoracion de los riesgos y su respectivo cuadro de colores.	* Puede ser utilizada para varios tipos de actividades	* Con la informacion recopilada en la matriz se elabora un diagrama de redes	* Es factible de usar en la fase de funcionamiento del proyecto, ya que los parametros se pueden contrastar con una medicion anterior.
	* Presenta una vision muy completo del proyecto	* Posee una escala de interpretacion: Irrelevante, Moderado, Severo, Critico.	* Fue instaurada y es usada por Ecopetrol S.A para el analisis y evaluacion de sus operaciones Nacionales.	* Cuenta con un amplio criterio de evaluacion de los resultados obtenidos	* Son resultado de analisis numerico, lo que hace que su respuesta sea mas exacta.	* Se pueden obtener evaluaciones cuantificables del proyecto de forma global.
* Facil uso		* Cuenta con una matriz de analisis del riesgo	* Aplicable a todo tipo de proyectos		* Reduce la subjetividad e incertidumbre	

Cuadro 17. (Continuación)

DESVENTAJAS	* Es uno de los metodos mas subjetivos, ya que no define escala para evaluar.	* Sigue siendo altamente subjetiva	* Algunos criterios definidos n son relevantes para determinar la significancia o gravedad de los impactos, por ejm "la afectacion a la imagen de la empresa"	* Puede llegar a ser subjetiva	* Atemporalidad de la evauacion, ya que no incorpora la variable tiempo en sus analisis.	* La asigancion de valores a los parametros ambientales se debe hacer mediante visita a campo
	* No se definen claramente las operaciones a realizar con las calificaciones obtenidas para generar un concepto tecnico frente al impacto.	* Dentro de una de las limitaciones de esta metodologia se encuentra el uso de atributos que no aportan a la estimacion de la importancia del impacto, por ejm la "reversabilidad" y "momento"	* Al incorporar la probabilidad de ocurrencia, como cirterio de evaluacion, se pueden subvalorar impactos que se presentan con una baja frecuencia.	* Se pueden subvalorar impactos que son significativos	* Dificultad para dimensionar el grado de afectacion o cambio del factor ambiental relacionado con el impacto.	* Cuando se realiza de forma predictiva se debe modelar elcomprotamiento de cada parametro ambiental.
	* No se proporciona un marco para la interpretacion de los resultados y posee carencia de dimension temporal en el analisis.		* Tiene un alto grado de subjetividad		* Disponibilidad del Software para la graficacion de la matriz de adyacencia	* Requiere una base extensa base de informacion del ambiente afectable * No Permite visualizar la temporalidad de los impactos y requiere de evaluadores experimentados
APLICA PARA PROCESO DE PIROLISIS	X	X		X		

Fuente: Información en base a: Metodología para la Evaluación de impactos ambientales. Universidad nacional de Colombia. Oficina de Gestión Ambiental. Bogotá. P 21. [Electrónico]. [Consultado el 19 julio 2018]. Disponible en: <http://oga.bogota.unal.edu.co/wp-content/uploads/2016/08/Metodologia-para-la-evaluaci%C3%B3n-de-impactos-ambientales.pdf>

5. APLICACIÓN DE METODO ARBOLEDA O EPM EN PIROLISIS DE LLANTAS USADAS

5.1 PROCEDIMIENTO A EFECTUAR

5.1.1 Desagregación del proyecto en componentes. en este paso se divide el proyecto en actividades que requieran acciones similares para desarrollo y se puedan agrupar en un mismo nombre.

5.1.2 Identificación de los impactos. Aquí se identifican los impactos producidos en el proyecto.

5.1.3 Evaluación de los impactos: Se deben evaluar los impactos anteriormente identificados por medio de factores de calificación, que luego por medio de la ecuación propuesta en ésta metodología se articularán.

5.2 LOS PARÁMETROS DE EVALUACIÓN

Para la evaluación de los impactos se propone una expresión o índice denominado "Calificación ambiental" (Ca), obtenido con base en cinco criterios o factores característicos de cada impacto⁶¹:

- **Clase (C):** Puede ser Positiva (P o +) o Negativa (N o -), dependiendo de si mejora o degrada el medio ambiental.
- **Presencia (P):** Este criterio verifica la alternativa de que el impacto se de o no se de y esta expresado en un porcentaje % de probabilidad de ocurrencia así⁶²:

Cierta: si la probabilidad de que el impacto se presente es del 100% (se califica con 1.0)

Muy probable: si la probabilidad está entre 70 y 100 % (se califica entre 0.7 y 0.99)

Probable: si la probabilidad está entre 40 y 70 % (0.4 y 0.69)

Poco probable: si la probabilidad está entre 20 y 40 % (0.2 y 0.39)

Muy poco probable: si la probabilidad es menor a 20 % (0.01 y 0.19)

⁶¹ ARBOLEDA, Jorge. Manual de evaluación de impacto ambiental de proyectos, obras o actividades. Capítulo 4. Identificación y evaluación de impactos ambientales. Medellín – Colombia. P 84. 2008. [Digital]. [Consultado el 29 de Julio de 2018]. Disponible en: https://www.kpesic.com/sites/default/files/Manual_EIA_Jorge%20Arboleda.pdf

⁶² Óp. cit., P 85

- **Duración (D):** con este se evalúa el periodo de existencia del impacto de forma activa, desde el momento en que comienzan sus consecuencias hasta la duración de los efectos sobre el medio ambiente. Esta expresado en función del tiempo de vida del impacto de la siguiente forma:

Muy larga o permanente: si la duración del impacto es mayor a 10 años (se califica con 1.0)

Larga: si la duración es entre 7 y 10 años (0.7 – 0.99)

Media: si la duración es entre 4 y 7 años (0.4 y 0.69)

Corta: si la duración es entre 1 y 4 años (0.2 y 0.39)

Muy corta: si la duración es menor a 1 año (0.01 y 0.19)

- **Evolución (E):** Este parámetro considera la velocidad con la que se e el impacto, se expresa en términos del tiempo transcurrido entre el inicio de la afectación y el momento en que el impacto alcanza sus consecuencias máximas.

Muy rápida: cuando el impacto alcanza sus máximas consecuencias en un tiempo menor a 1 mes después de su inicio (se califica con 1.0)

Rápida: si este tiempo está entre 1 y 12 meses (0.7 – 0.99)

Media: si este tiempo está entre 12 y 18 meses (0.4 y 0.69)

Lenta: si este tiempo está entre 18 y 24 meses (0.2 y 0.39)

Muy lenta: si este tiempo es mayor a 24 meses (0.01 y 0.19)

- **Magnitud (M):** éste califica el tamaño del cambio en el medio ambiente analizado por alguna acción del proyecto. Se expresa en términos de % de afectación y se denomina también magnitud relativa, ésta puede ser:

Muy alta: si la afectación del factor es mayor al 80%, o sea que se destruye o cambia casi totalmente (se califica con 1.0)

Alta: si la afectación del factor está entre 60 y 80 %, o sea una modificación parcial del factor analizado (se puede calificar 0.7 – 0.99)

Media: si la afectación del factor está entre 40 y 60 %, o sea una afectación media del factor analizado (0.4 y 0.69)

Baja: si la afectación del factor está entre 20 y 40 %, o sea una afectación baja del factor analizado (0.2 y 0.39)

Muy baja: cuando se genera una afectación o modificación mínima del factor considerado, o sea menor al 20 % (0.01 y 0.19).

Cuadro 18. Resumen de criterios de evaluación y su ponderación.

PRESENCIA	DURACIÓN	EVOLUCIÓN	MAGNITUD	PUNTAJE
Cierta	Muy larga o permanente (> 10 años)	Muy rápida (< 1mes)	Muy alta (Mr> a 80%)	1.0
Muy probable	Larga (> 7 años y < 10 años)	Rápida (> 1 mes y < 12 meses)	Alta (> 60 %y < 80 %)	0.7<0.99
Probable	Media (> 4 años y < 7 años)	Media (> 12 meses y < 18 meses)	Media (> 40 % y < 60 %)	0.4<0.69
Poco Probable	Corta (> 1 años y < 4 año)	Lenta (> 18 meses y < 24 meses)	Baja (> 20 % y < 40 %)	0.2<0.39
No probable	Muy corta (< 1 año)	Muy lenta (> 24 meses)	Muy baja (< 19%)	0.01<0.19

Fuente: ARBOLEDA, Jorge. Manual de evaluación de impacto ambiental de proyectos, obras o actividades. Capítulo 4. Identificación y evaluación de impactos ambientales. Medellín – Colombia. P 86. 2008. [Digital]. [Consultado el 29 de Julio de 2018]. Disponible en: https://www.kpesic.com/sites/default/files/Manual_EIA_Jorge%20Arboleda.pdf

5.3 LA CALIFICACION AMBIENTAL DEL IMPACTO

Según Arboleda ⁶³ “La calificación ambiental (Ca) es la expresión de la acción conjugada de los criterios con los cuales se calificó el impacto ambiental y representa la gravedad o importancia de la afectación que este está causando”.

Para este método se desarrolló una ecuación para la calificación ambiental que permite manifestar las relaciones que se tienen entre los criterios evaluados y el resultado de la siguiente ecuación

Ecuación 9. Calculo de Calificación ambiental según Arboleda – EPM

$$Ca = C (P [E x M +b D])^{64}:$$

Donde⁶⁵::

Ca= Calificación ambiental (varía entre 0,1 y 10,0)

C= Clase, expresado por el signo + o - de acuerdo con el tipo de impacto

P= Presencia (varía entre 0,0 y 1,0)

E= Evolución (varía entre 0,0 y 1,0)

M= Magnitud (varía entre 0,0 y 1,0)

D= Duración (varía entre 0,0 y 1,0)

⁶³ Ibíd., P 87

⁶⁴ Ibíd., P 87

⁶⁵ Ibíd., P 87

Sin embargo, según Conesa Fernández⁶⁶ “las primeras aplicaciones de la ecuación mostraron unos resultados en los que la calificación ambiental era muy diferente respecto de la que se obtenía con otras metodologías. Un análisis del asunto determinó que los criterios utilizados tenían un peso relativo diferente en la ecuación, por lo que debían ser afectados por unas constantes de ponderación que los equilibraran. Mediante un análisis de sensibilidad se determinaron las siguientes constantes de ponderación: a = 7.0 y b = 3.0”.

Luego de esto se obtiene la ecuación que se presenta a continuación para expresar la Calificación ambiental de un impacto ⁶⁷:

Ecuación 10. Desglose del cálculo de Calificación ambiental según Arboleda – EPM

$$Ca = C (P [a E M + b D])$$

Donde reemplazando los valores de a y b se obtiene:

Ecuación 11. Ecuación final Ca

$$Ca = C (P [7.0xEM+3.0xD])$$
 ⁶⁸

Dependiendo de las calificaciones asignadas de forma individual a cada uno de los criterios, el valor absoluto de Ca será mayor que “0” o menor o igual que “10”.

La calificación ambiental cuenta con relaciones de dependencia entre sus factores, esta ecuación de proporcionalidad directa y se ve afectada al operar mediante multiplicaciones y sumas todos sus factores; la evolución y la magnitud están multiplicados en el mismo nivel, éstos dos aportan la naturaleza de éste impacto, ya que están multiplicados por una constante definida como “a” la cual posee un valor de ponderación del 70%, ésta constante se le atribuye a la multiplicación de estos factores ya que al ser críticos definen el comportamiento del impacto ya que no nos va a definir solo el impacto presente, sino su trayectoria en el tiempo. Por otro lado la Metodología Arboleda – EPM, tiene en cuenta el tiempo de duración del impacto en una proporción elevada, respecto a las demás metodologías, le atribuye un 30%

⁶⁶ CONESA FERNANDEZ, Vicente. Guía Metodológica para la evaluación del impacto Ambiental. 4ta Edición. 2010. Madrid - España. [Consultado el 29 de Julio de 2018]. P 343. Libro físico. Disponible en : Biblioteca Fundación Universidad de América

⁶⁷ CONESA FERNANDEZ, Vicente. Guía Metodológica para la evaluación del impacto Ambiental. 4ta Edición. 2010. Madrid - España. [Consultado el 29 de Julio de 2018]. P 343. Libro físico. Disponible en : Biblioteca Fundación Universidad de América

⁶⁸ CONESA FERNANDEZ, Vicente. Guía Metodológica para la evaluación del impacto Ambiental. 4ta Edición. 2010. Madrid - España. [Consultado el 29 de Julio de 2018]. P 343. Libro físico. Disponible en : Biblioteca Fundación Universidad de América

de importancia a esta variable, denotando su elevado interés en analizar el impacto no solo de forma de inmediata sino a mediano y largo plazo. La Presencia me define la realidad del impacto o no, es decir si este es positivo o negativo para el medio ambiente en el proyecto que se esta evaluando.

El valor numérico que arroja la ecuación se convierte luego en una expresión que indica la importancia del impacto asignándole unos rangos de calificación de acuerdo con los resultados numéricos obtenidos, de la siguiente manera:

Cuadro 19. Definición de la importancia del impacto ambiental dados por Ca.

CALIFICACIÓN AMBIENTAL (puntos)	IMPORTANCIA DEL IMPACTO AMBIENTAL
≤ 2.5	Poco significativo o irrelevante
>2.5 y ≤ 5.0	Moderadamente significativo o moderado
> 5.0 y ≤ 7.5	Significativo o relevante
> 7.5	Muy significativo o grave

Fuente: ARBOLEDA, Jorge. Manual de evaluación de impacto ambiental de proyectos, obras o actividades. Capítulo 4. Identificación y evaluación de impactos ambientales. Medellín – Colombia. P 87. 2008. [Digital]. [Consultado el 29 de Julio de 2018]. Disponible en: https://www.kpesic.com/sites/default/files/Manual_EIA_Jorge%20Arboleda.pdf

5.4 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL PROCESO DE PIROLISIS DE LLANTAS USADAS.

Cuadro 20. Matriz para la evaluación del impacto ambiental generado por el proceso de pirolisis de llantas usadas.

ASPECTO AMBIENTAL	IMPACTO AMBIENTAL	CLASE	PRESENCIA	EVOLUCION	DURACION	MAGNITUD	CALIFICACION AMBIENTAL	IMPACTO AMBIENTAL
Almacenamiento inadecuado de llantas	Proliferación de vectores como mosquitos y roedores debido al estancamiento de las aguas y la inaccesibilidad de zonas de almacenamiento.	-	0,7	0,7	0,4	1	4,63	MODERADO
Riesgo de Incendio en el patio de almacenamiento de llantas	Emision de gases y dioxinas y furanos	-	0,7	0,7	0,19	1	4	MODERADO
Generacion de ruido en el proceso de trituracion de llanta	Perdida auditiva por aumento de decibeles	-	1	1	0,4	1	8,2	GRAVE
Creacion de atmosfera contaminante por fugas de gas natural usado en la ignicion del pirolizador	Daños en la salud del trabajador por inhalacion e intoxicacion, y riesgos de explosion	-	1	1	0,4	1	8,2	GRAVE

Cuadro 21.(continuación)

Transferencia de calor del pirolizador a la atmosfera por temperaturas superiores a 800°C	Riesgo en salud de los trabajadores por exposicion directa	-	1	1	0,4	1	8,2	GRAVE
Contaminacion de agua usada en lavador de gases	Agua con pH acido, inferior a 2, con metales pesados como mercurio, cadmio y plomo	-	1	1	0,7	1	9,1	GRAVE
Generacion de cenizas con metales pesados tales como mercurio, cadmio, plomo, producto del lavado de gases	Contaminacion de acuíferos y suelos por cenizas acidas y metales pesados como mercurio, cadmio y plomo	-	1	1	0,7	1	9,1	GRAVE
Generacion de gases tales como: cloruro de hidrógeno, dióxido de azufre y fluoruro de hidrogeno; COV y HAP	Contaminacion atmosferica por gases acidos, posible generacion de lluvia acida y deterioro de superficies por corrosion, mutagenicidad.	-	1	1	0,7	1	9,1	GRAVE
Generacion de material particulado	Aumento de efecto invernadero, afecta fotosintesis en plantas y sistema respiratorio en animales y el hombre	-	1	1	0,7	1	9,1	GRAVE

Cuadro 22.(continuación)

Requerimiento mano de obra	Generacion de empleo	+	1	1	0,4	1	5,74	RELEVANTE
Aprovechamiento de materiales reciclados	Reuso de materiales	+	1	1	0,4	1	5,74	RELEVANTE
Comercializacion de materiales recuperados	Generacion de ingresos	+	1	0,7	0,4	1	4,27	MODERADO
Eliminacion de inadecuada disposicion de llantas, a cielo abierto en botaderos no autorizados	Recuperacion de suelos deteriorados y recuperacion paisajistica	+	0,7	0,2	0,4	1	1,5	IRRELEVANTE
Eliminacion de inadecuada disposicion de llantas, a cielo abierto en botaderos no autorizados	Disminucion de inundaciones por recuperacion de suelos	+	0,7	0,2	0,4	1	1,5	IRRELEVANTE

Fuente: Autor

Conforme Pino⁶⁹ manifiesta, la situación actual del planeta requiere de la implementación de estrategias y medidas acordes a los cambios que estamos viviendo. Las industrias deben empezar a buscar tecnologías guiadas por los pilares del desarrollo sostenible buscando reducir sus impactos y huellas ambientales.

Los impactos generados por si solos pueden ser mitigados, pero, con inversiones de alto valor económico, que no están actualmente contempladas dentro del costo de operación de producción de las llantas, probablemente las compañías no estén dispuestas a sumarlos y asumirlos en el valor de comercialización de una llanta, por otro lado, dentro del costo de operación de pirolisis, generalmente se contemplan los costos de análisis y monitoreos ambientales exigidos por la normatividad aplicable, pero los costos de compensación ambiental no sean tenidos en cuenta en el PYG de ésta alternativa.

Luego de hacer el análisis cualitativo y cuantitativo utilizando la metodología Arboleda o EPM, se puede identificar que el 28% de los aspectos e impactos identificados son irrelevantes y más del 50% de los impactos son catalogados como Grave, lo que nos, a éstos se les debe prestar atención de forma inmediata y generar planes de acción para su mitigación, éste resultado supone una viabilidad baja en un proceso que supone que es amigable con el medio ambiente y que se utilizará para disminuir la problemática actual en el país con el inadecuado manejo de las llantas usadas, nos está indicando que el proceso que pretende homologar el manejo actual y/o disposición de llantas usadas no es ambientalmente amigable o no en su totalidad, como se esperaba, esto se debe en su mayoría al uso de agua, energía y generación de emisiones como COV, HAP y gases ácidos tales como el cloruro de hidrógeno, dióxido de azufre y fluoruro de hidrogeno que produce ésta alternativa.

Los desafíos técnicos y económicos de los proyectos de gasificación incluyen el incumplimiento de la producción energética estimada, de la generación de ingresos y de los objetivos de emisión. Históricamente, las plantas de gasificación también han buscado subvenciones públicas con el propósito de ser rentables. En concreto, los proveedores buscan subvenciones para energías renovables; sin embargo, tales instalaciones emiten dióxido de carbono a partir de materiales derivados de fuentes de combustible fósil como los residuos de plástico y carbón, contrario al propósito de “energía renovable”.

“(…) Mientras la gasificación sea usada en un flujo de residuos mixto o flujo de residuos plásticos, lo que incluye materiales tratados con cloro y metales pesados, los resultados son emisiones similares a aquellas de la incineración convencional.

⁶⁹ PINO RANGEL, Sebastian. Impactos ambientales en el aprovechamiento de plástico para la generación de combustibles. [Documento Físico]. Monografía en Gestión Ambiental. Fundación Universidad de América. Bogotá. Colombia. 2016. P 63. [Consultado el 10 de abril de 2018]. Disponible en : Biblioteca Fundación Universidad De América

Las emisiones pueden incluir NO_x, SO_x, hidrocarburos, monóxido de carbono, material en suspensión, metales pesados, gases de efecto invernadero como el CO₂, dioxinas y furanos”⁷⁰.

Uno de los desafíos que atravesamos actualmente en la sociedad es la búsqueda constante del desarrollo sostenible, es decir, que el medio ambiente y su protección estén alineados con el desarrollo económico de un país y su crecimiento industrial. Una de las principales causas del daño medioambiental hace referencia a la elevada demanda de energía ya que genera elevadas emisiones en su producción y esto generalmente afecta el entorno ambiental. La búsqueda constante en el ahorro de consumo de energía y la eficiencia en la producción de energía son fundamentales para conseguir la reducción de emisiones, de allí parte la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías destinadas a minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero.

Según mencionan Jara y Manyà⁷¹, “para mejorar aún más la producción y la composición del gas de pirólisis, se tiene en cuenta que el gas obtenido como subproducto podría aprovecharse térmicamente y compensar, así, la demanda energética del proceso”. Los resultados obtenidos en su investigación son interesantes, ya que confirman la posibilidad de poner a punto la producción y la composición del gas obtenido utilizando un lecho fijo de carbón activado a un costo bajo.

⁷⁰ KAMIŃSKA Natalia, SMOLIŃSKI Adam. Selected Environmental Aspects of Gasification and Co-Gasification of Various Types of Waste. Journal of Sustainable Mining. Capítulo 4. P 13. [Digital]. [Consultado el 29 de Julio de 2018]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S230039601530063>

⁷¹ JARA Mateo y MAYÀ CERVELLÒ Juan José. Estudio de la mejora de la calidad del gas de pirólisis, generado durante la producción de biochar, mediante un reactor secundario de alúmina y/o carbón activado. Universidad de Zaragoza, Escuela Politécnica Superior (Huesca). España. 2014.[Digital]. [Consultado el 27 de Julio de 2018]. Disponible en: <https://zagan.unizar.es/record/13484?In=es#>

6. CONCLUSIONES

- El proceso de pirolisis consiste en la descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno. En la pirolisis se generan tres productos en distinto estado de agregación (sólidos, líquidos y gases). Uno de los residuos de mayor generación al descomponer una llanta es el negro de humo, el material que estas contienen actúa como antioxidante en el ligante, en gran proporción también se encuentran los componentes metálicos; éstos son de gran aprovechamiento y representa un insumo cuyo valor en el mercado puede ser representativo. Del total de una llanta usada, tan solo el 17% de sus materiales debe ir a relleno sanitario, el 41% corresponde a caucho sintético y natural que puede ser reutilizado en procesos posteriores, el 28% corresponde a negro de humo, el cual de igual forma puede ser reutilizado en múltiples industrias como materia prima en la fabricación de diversos artículos de la industria hulera, el 14% restante corresponde a material ferroso, que es altamente apetecido en la industria actualmente
- En Colombia se generan cada año más de 5 millones de llantas usadas, el equivalente a 100.000 toneladas de residuos de este tipo; es lo expresado por el Ministerio de Ambiente en Junio de 2017.
- En la ciudad de Bogotá existen algunas cadenas generales de aprovechamiento final del residuo, tales como: reencauche, uso de la llanta para elaboración de productos de caucho y uso como energético, el aprovechamiento térmico es la cadena de mayor demanda del residuo, con una utilización del residuo de un 71,9% aproximadamente actividad que genera impactos ambientales y de salud pública relacionados con las emisiones de COV y HAP, contaminantes carcinogénicos, mutagénico y otros que causan afecciones al sistema respiratorio y circulatorio.
- Las emisiones a la atmósfera son sin lugar a duda la fuente de contaminación más importante de los pirolizadores. Desde un punto de vista medioambiental, los compuestos emitidos más importantes son: Partículas sólidas, gases ácidos tales como el cloruro de hidrógeno, dióxido de azufre y fluoruro de hidrogeno; metales pesados tales como mercurio, cadmio, plomo..etc.,; monóxido de carbono y compuestos orgánicos normalmente en bajas concentraciones.
- El proceso de pirolisis de llantas que además de las emisiones a la atmósfera se debe tener en cuenta la producción de aguas contaminadas y la de cenizas, también se generan partículas sólidas contaminantes, en referencia a las partículas sólidas, éstas tienen diversos efectos en la contaminación atmosférica: por un lado las partículas de pequeño tamaño pueden producir efectos contaminantes por sí mismas aumentando el efecto invernadero y tapando las hojas evitando de que realicen la fotosíntesis de forma correcta;

también tienen un efecto negativo sobre el sistema respiratorio en los animales y el hombre, y por otro lado, las partículas sólidas son un medio de transporte importante de todos los demás contaminantes.

- El factor mutagénico para las emisiones provenientes de la quema de llantas a cielo abierto es mayor al de cualquier otro tipo de combustión; por ejemplo, es 3-4 grados de magnitud más grande que los factores de mutagenicidad para la combustión de petróleo, carbón, o leña en las calderas de centrales térmicas.
- Los impactos asociados con el inadecuado almacenamiento de este tipo de residuos, existen 4 principales, los cuales son: proliferación de vectores como mosquitos y roedores debido al estancamiento de las aguas y la inaccesibilidad de zonas de almacenamiento, riesgo de incendios incontrolables en lugares donde se apilan gran cantidad de llantas sin la apropiada distribución y medidas de control mínimas, riesgos de derrumbe cuando se apilan gran cantidad de llantas de manera inadecuada. deterioro del entorno y del paisaje debido a un apilamiento inadecuado.
- Se analizan 6 tipo de metodologías para Evaluación del impacto ambiental, de las cuales se realiza elección de la alternativa mejor aplicable para el análisis del proceso actualmente evaluado, Metodología EPM o Arbeláez, cuenta con factores o corrientes que permiten analizar cada uno de los atributos de forma individual, es un método mixto pues permite la identificación y la evaluación de los impactos ambientales, ha sido aprobado por las autoridades ambientales Colombianas y por entidades internacionales como el Banco Mundial y el BID, entre otros atributos.
- Es posible concluir que la elección de la metodología es factible, para la identificación del impacto ambiental es el Método Arboleda o EPM, a partir de Conesa se realiza una ponderación real utilizando factores que determinan el nivel de importancia para algunos de los atributos que contiene esta información
- La metodología EPM o Arboleda se basa en una ecuación directa, para llegar a una calificación ambiental basada en parámetros evaluables, dicha ecuación otorga un 70% de importancia a las variables Evolución y Magnitud, las cuales definen la rapidez con la que se define el impacto y su dimensión, de igual forma atribuye un 30% de importancia al tiempo, le da gran importancia a la duración del impacto en el tiempo, evaluando el periodo de la existencia activa en el tiempo de éste impacto.
- Según el análisis del impacto ambiental generado por el proceso de pirolisis de llantas usadas, mediante la metodología EPM o Arbeláez, se puede identificar que el 28% de los aspecto e impactos identificados son irrelevantes y más del 50% de los impactos son catalogados como Grave, lo que nos, a éstos se les

debe prestar atención de forma inmediata y generar planes de acción para su mitigación, éste resultado supone una viabilidad baja en un proceso que supone que es amigable con el medio ambiente y que se utilizará para disminuir la problemática actual en el país con el inadecuado manejo de las llantas usadas.

- Los impactos generados por si solos pueden ser mitigados, pero, con inversiones de alto valor económico, que no están actualmente contempladas dentro del costo de operación de producción de las llantas, probablemente las compañías no estén dispuestas a sumarlos y asumirlos en el valor de comercialización de una llanta, por otro lado, dentro del costo de operación de pirolisis, generalmente se contemplan los costos de análisis y monitoreos ambientales exigidos por la normatividad aplicable, pero los costos de compensación ambiental no sean tenidos en cuenta en el PYG de ésta alternativa, lo que apoya la hipótesis de presunción de que ésta metodología no es sostenible con el medio ambiente ni con los seres humanos, debido a las emisiones que genera y el poco control que existe sobre éstas contamina el aire que respiramos cada instante.

7. RECOMENDACIONES

- Motivar una investigación para la regulación de la producción de llantas en Colombia incluyendo un Impuesto o algún tipo de arancel en su producción y posterior venta, donde dicho arancel sea destinado a la disposición final de éste tipo de residuos de tan complejo final.
- Realizar evaluaciones de impacto ambiental a plantas de pirolisis de llantas usadas en Colombia, para evaluar la generación de emisiones y demás residuos contaminantes, comparándolas con la regulación ambiental exigida en Colombia, para determinar su real cumplimiento y comprobar técnicamente si es o no una alternativa sostenible.
- Realizar una comparación profunda de la huella de carbono que se ha generado a lo largo de los años sin usar la tecnología de pirolisis de llantas para manejo final de éste tipo de residuos vs la huella ambiental generada desde que ha venido siendo aplicado en Bogotá y en Colombia hace menos de 20 años.
- Evaluar la viabilidad ambiental económica y social a partir de una investigación con un enfoque cuantitativo del proceso de pirolisis.

BIBLIOGRAFIA

ARBOLEDA, Jorge. Manual de evaluación de impacto ambiental de proyectos, obras o actividades. Capítulo 4. Identificación y evaluación de impactos ambientales. Medellín – Colombia. P 84. 2008. [Digital]. [Consultado el 29 de Julio de 2018]. Disponible en: https://www.kpesic.com/sites/default/files/Manual_EIA_Jorge%20Arboleda.pdf

ARTEAGA Juan, ARENAS Erika, LOPEZ David, SANCHEZ Carlos, ZAPATA Zulamita. Obtención de biocombustibles producto de la pirolisis rápida de residuos de palma africana. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia. 2012. P 146. [Consultado 30 de Mayo de 2018]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v10n2/v10n2a17.pdf>

BISSO FERNANDEZ, Ricardo. Llantas usadas en pavimentos. XI Congreso Nacional Del Asfalto y II Concreto. [Blog digital]. Perú. 2010. [Consultado 02 Junio 2018]. Disponible en: <http://ligante-asfaltico.blogspot.com/p/llantas-usadas-en-pavimentos.html>

CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ Guía para el manejo de llantas usadas. Guía Para El Manejo de Llantas Usadas, [sitio web]. Bogotá D.C. CO. sec. Publicaciones 2006. P. I, 56. [Consultado 03 de abril 2018]. Archivo en pdf. Disponible en: http://www.ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=ab80a611-f997-4864-bd6e-7aa0d8680067&groupId=10157

CASTELLS Xavier Elías, VELO GARCIA Enric. La pirolisis, tratamiento y valorización energética de residuos. [Libro físico]. 2013. p 494. [Consultado: 9 de Mayo de 2018]. Disponible en : Biblioteca Universidad Nacional de Colombia

CONESA FERNANDEZ, Vicente. Guía Metodológica para la evaluación del impacto Ambiental. 4ta Edición. 2010. Madrid - España. [Consultado el 29 de Julio de 2018]. P 343. Libro físico.

CONESA FERRER, Juan Antonio. Estudio de la pirolisis de residuos plásticos de polietileno y neumáticos usados. [Repositorio Digital]. Trabajo de grado Doctoral en Ingeniería Química. Universidad de Alicante. Facultad de Ciencias. España. 199. p 29- 30. [Consultado 02 de Marzo de 2018]. Disponible en: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/17030/1/Conesa-Ferrer-Juan-Antonio.pdf>

ESTRADA, M. y POESGEN, S. Estudio ambiental, económico y social de alternativas de reutilización y reciclaje de llantas usadas en la ciudad de Bogotá. [Repositorio Digital]. Trabajo de grado. Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Bogotá D.C., Colombia. 2005. P 18. [Consultado el 06 de Mayo]. Disponible en: <http://repository.lasalle.edu.co/handle/10185/1>

FEDESARROLLO. Perspectiva Económica 2017. Digital]. Archivo en PDF. Bogotá D.C., Colombia. 2017. P 43. [Consultado el 06 de mayo]. Disponible en: <https://www.fedesarrollo.org.co/sites/default/files/prospectivajulio2017primercap>.

FULLANA FONT, Andrés. Pirolisis y Combustión de Neumáticos Usados y Lodos de Depuradora. [Repositorio Digital]. Trabajo de Grado Doctoral en Ingeniería Química. Universidad de Alicante. Facultad de Ciencias. España. 2001. p 06. [Consultado 16 de Julio 2018]. Disponible en: <file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/AndresFullanaTesis.pdf>

FULLANA FONT, Andrés. Pirolisis y Combustión de Neumáticos Usados y Lodos de Depuradora. [Repositorio Digital]. Trabajo de Grado Doctoral en Ingeniería Química. Universidad de Alicante. Facultad de Ciencias. España. 2001. p 06. [Consultado 16 de Julio 2018]. Disponible en: <file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/AndresFullanaTesis.pdf>

GARCIA, Leyton. Metodologías de evaluación del impacto ambiental. Tesis. [Electrónico]. [Consultado el 17 de Julio 2018]. Disponible en: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6830/04Lagl04de09.pdf>

GUTIERREZ Omar. La Pirolisis como herramienta de tratamiento y valorización de residuos plásticos. [Artículo electrónico]. Instituto Tecnológico Metropolitano. Facultad de ciencias exactas y aplicadas. Medellín, Colombia. 2015. Tomo 79, No. 2, p 34-36 [Consultado: 10 de Mayo 2018]. Disponible en: <https://search.proquest.com/openview/73641a9e12dc0b896ce5ce41729e7754/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2043241>

HERNANDEZ FERREZ, María del Remedio. Evaluación de la pirolisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. [Repositorio Digital]. Trabajo de Grado Doctoral en Ingeniería Química. Universidad de Alicante. Facultad de Ciencias. España. 2007, p 97. [Consultado 05 Mayo 2018]. Disponible en: <https://rua.ua.es/dspace/handle/10045/4088>

IDU. Boletín Técnico No. 3. Mejoras mecánicas de las mezclas asfálticas con grano de caucho reciclado-GCR. Instituto de desarrollo urbano. [Sitio WEB]. Bogotá. 2015 .[Consultado 14 06 2018]. Disponible en: https://www.idu.gov.co/Archivos_Portal/Transparencia/Informacion%20de%20intereses/SIIPVIALES/Innovaci%C3%B3n/Portafolio/2017/09%20Septiembre/Boletines%20T%C3%A9cnicos/02%20boletin_grano_caucho_reciclado_2015.pdf

JARA Mateo y MAYÀ CERVELLÒ Juan José. Estudio de la mejora de la calidad del gas de pirólisis, generado durante la producción de biochar, mediante un reactor secundario de alúmina y/o carbón activado. Universidad de Zaragoza, Escuela Politécnica Superior (Huesca). España. 2014.[Digital]. [Consultado el 27 de Julio de 2018]. Disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/13484?ln=es#>

KAMIŃSKA Natalia, SMOLIŃSKI Adam. Selected Environmental Aspects of Gasification and Co-Gasification of Various Types of Waste. Journal of Sustainable Mining. Capitulo 4. P 13. [Digital]. [Consultado el 29 de Julio de 2018]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S230039601530063>

KAMINSKY Walter, SCHEIRS John. Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics: converting waste plastics into diesel and other fuels. [Libro físico]. 2006. P 114-115. [Consultado 02 Marzo de 2018]. Disponible en : Biblioteca Universidad Nacional de Colombia

MANCHENO Myriam, ASTUDILLO Servio, AREVALO Pablo, MALO Inés, NARANJO Tania y ESPINOZA Johana. Aprovechamiento Energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio de pirolisis. Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador [Artículo científico]. Cuenca, Ecuador. 2015. P 54. [Consultado 30 Mayo 2018]. Disponible en: <file:///C:/Users/AULA%20503/Downloads/Dialnet-AprovechamientoEnergeticoDeResiduosPlasticosObteni-5969813.pdf>

MARTINEZ BERNAL, Liven Fernando. Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de: Magister en Medio Ambiente y Desarrollo. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2013. [Repositorio Digital]. [consultado el 12 de junio de 2018]. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/40046/1/08905141.2013.pdf>

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE – Min Ambiente. Decreto 1076 de 2015. Sección 1. [Sitio Web]. Bogotá D.C. CO. Sec. Normativa. 2015. [Consultado 20 Junio 2018]. Disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=62511>

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE – MIN AMBIENTE. Productores y comercializadores de llantas en el país deberán tener un Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas.. [Sitio Web]. Bogotá D.C. CO. Sec. Normativa. Julio de 2017. [Consultado 14 Junio 2018]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/248-plantilla-asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana-sin-galeria-14#plan-posconsumo-llantas-usadas>

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE – Min Ambiente. Productores y comercializadores de llantas en el país deberán tener un Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas.. [Sitio Web]. Bogotá D.C. CO. Sec. Noticias. Julio de 2017. [Consultado 02 Abril 2018]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/3055-productores-y-comercializadores-de-llantas-en-el-pais-deberan-tener-un-sistema-de-recoleccion-selectiva-y-gestion-ambiental-de-llantas-usadas-minambiente>

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO. Decreto 1075 .Artículo 2. . [Electrónico]. 2015. [Consultado: 19 de Julio de 2018. Disponible en: http://www2.igac.gov.co/igac_web/normograma_files/Decreto%201076%20de%202015.pdf

MIRANDA, Rosa; SEGOVIA, Ciro y SOSA, Cesar. Estudio Cinético e Influencia de Variables de Operación, 2016. [Sitio Web]. México. P 7. [Consultado el 03 de Abril de 2018]. Archivo en pdf. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000200003

PEREVOCHTCHIKOVA María. La evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales. [Revista Scielo]. Artículo científico.Mexico.2012. p 5. [Consultado 29 de Mayo de 2018]. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-10792013000200001

PINEDO URIEN Andrea. Obtención de Biocarbones y Biocombustibles mediante pirolisis de Biomasa residual. Trabajo de fin de master de investigación. Universidad Nacional de Educación a Distancia. España. 2013. P. 19. [Consultado 30 de Mayo de 2018]. Disponible en: http://digital.csic.es/bitstream/10261/80225/1/BIOCARBONES_CENIM_CSIC.pdf

PINO RANGEL, Sebastián. Monografía: Impactos ambientales en el aprovechamiento de plástico para la generación de combustibles. Bogotá: Fundación Universidad de América, 2016. P 49.

POLANIA TORO, Andrés Felipe y GONZALES MEDINA, Joan Sebastián. Estudio de Factibilidad para la creación de una planta de trituración de neumáticos usados en el departamento de Risaralda. [Practica de extensión]. Universidad Autónoma de Pereira. Pereira, Colombia. 2016. P 70. [Consultado el 28 de Marzo de 2018]. Disponible en: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/7512>

ROMERO CONDE, Faber Jean Pierre. Aprovechamiento de llantas Usadas. Monografía Especialización en gestión ambiental. Universidad de América. Bogotá, Colombia. 2017. P 29. [Consultado el 14 de Junio 2018]. Disponible en : físico Biblioteca Universidad de América Sede Posgrados

SECRETARIA DISTRITAL DE GOBIERNO. Distrito ha recolectado más de 69mil llantas usadas. [Sitio Web]. Bogotá D.C. CO. Sec. Noticias. Diciembre 2017. [Consultado 02 Abril 2018]. Disponible en: <http://www.gobiernobogota.gov.co/noticias/nivel-central/distrito-ha-recolectado-mas-69-mil-llantas-usadas>

SECRETARIA DISTRITAL DE MEDIO AMBIENTE. Guía para el manejo de llantas usadas. [Sitio Web]. Bogotá D.C. CO. Sec. Programas y proyectos. Septiembre

2006. [Consultado 08 Mayo 2018]. Archivo en PDF. Disponible en: http://www.ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=ab80a611-f997-4864-bd6e-7aa0d8680067&groupId=10157

SENÉCAL, Pierre. International Association for Impact Assessment. Principles Of Environmental Impact Assessment Best Practice. [electrónico]. Enero 1999. [consultado: 31, mayo, 2016] Disponible en: http://www.iaia.org/uploads/pdf/principlesEA_1.pdf

SOSA BLANCO, Cesar Alberto. Pirolisis de llantas usadas, Estudio cinético. Artículo científico. Universidad Autónoma de Nuevo León. México.2006. P 9- 15. [Digital].[Consultado el 14 de Junio de 2018]. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000200003

TRUJILLO Leonardo, RAMOS Boris, MARQUEZ Francisco, CALLEJO Alberto, PEREZ Jesús. Proceso de pirólisis rápida de los residuos sólidos de naranja, influencia de factores en el proceso. [Electrónico]. Artículo científico. Universidad de Zaragoza. España. 2015. [Consultado: 6 mayo de 2018]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612015000200005

UNIÓN TEMPORAL OCADE LTDA./Saniplan/Ambiental S.A. Diagnóstico Ambiental Sobre el Manejo Actual de Llantas y Neumáticos Usados Generado por el Parque Automotor de Santafé de Bogotá. [Sitio Web].Bogotá Colombia. Año 2000. [consultado 02 abril 2018]. Archivo PDF. P 2. Disponible en: <http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/0/Llantas.pdf>