

**Contaminación ambiental por la inadecuada gestión de llantas usadas por el parque
automotor del municipio de Villavicencio – Meta, Colombia**

Juan David Aguilar Pacheco

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente ECAPMA

Ingeniería Ambiental

2023

**Contaminación ambiental por la inadecuada gestión de llantas usadas por el parque
automotor del municipio de Villavicencio – Meta, Colombia**

Juan David Aguilar Pacheco

Trabajo para optar el título de Ingeniero Ambiental

Director

Magister en Química, Wilson Ávila

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente ECAPMA

Ingeniería Ambiental

2023

Resumen

El manejo inadecuado de llantas usadas, es un problema ambiental y sanitario que afecta gran parte del planeta, a pesar de existir diferentes alternativas de tratamiento que contribuyen a la mitigación de impactos, recuperación de materias primas y aprovechamiento energético.

Diferentes estudios, ratifican las afectaciones a la salud humana y al medio ambiente del manejo inadecuado de llantas usadas, en especial, cuando son incineradas a cielo abierto sin ningún control, generando emisiones de contaminantes como CO, HAP, COV`s, metales pesados, entre otros, causantes de enfermedades respiratorias, cancerígenas y mutagénicas. Con las alternativas de tratamiento, es posible recuperar el 100% de los materiales de las llantas usadas, a la vez que se contribuye a la economía circular.

Palabras clave: Aprovechamiento energético, Economía circular, Emisiones, Enfermedades respiratorias, Mutagénicas.

Abstract

The improper handling of used tires is an environmental and health problem that affects a large part of the planet, despite the existence of different treatment alternatives that contribute to the mitigation of impacts, recovery of raw materials and energy use. Different studies ratify the effects on human health and the environment of improper handling of used tires, especially when they are incinerated in the open air without any control, generating emissions of pollutants such as CO, PAHs, VOCs, heavy metals, among others, causing respiratory, carcinogenic and mutagenic diseases. With treatment alternatives, it is possible to recover 100% of the materials from used tires, while contributing to the circular economy.

Keywords: Energy use, Emissions, Circular economy, Mutagenic, Respiratory diseases.

Tabla de Contenido

Introducción _____	11
Aspectos Generales del Proyecto _____	15
Pregunta de Investigación _____	15
Objetivos _____	16
Objetivo General _____	16
Objetivos Específicos _____	16
Justificación _____	17
Marco Referencial _____	19
Generalidades de las Llantas _____	22
Composición y Características de las Llantas _____	22
Fabricación de Llantas _____	25
Mezclado de Materias Primas _____	26
Extrusión y Laminado _____	26
Calandrado _____	26
Construcción del Talón _____	26
Armado de la Llanta _____	27
Vulcanización _____	27
Ciclo de Vida de las Llantas _____	27
Impactos Ambientales _____	31
Afectaciones De Los Contaminantes Relacionados En La Tabla 7 _____	52

Gestión De Llantas Usadas En El Municipio De Villavicencio _____	60
Marco Legal _____	70
Alternativas para la Adecuada Gestión de Llantas Usadas _____	73
Coprocesamiento _____	73
Pirolisis _____	75
Artesanal _____	76
Construcción de Barreras y Muros de Contención _____	80
Degradación Microbiana _____	85
Asfalto Modificado _____	87
Producción de Gránulos de Caucho Mediante Trituración Mecánica _____	90
Conclusiones _____	93
Recomendaciones _____	94
Referencias Bibliográficas _____	95
Apéndices _____	105

Índice de Tablas

Tabla 1. Materiales que componen una llanta	22
Tabla 2. Partes de una llanta	24
Tabla 3. Afectaciones a la salud de los metales pesados	33
Tabla 4. Parámetros evaluados a la muestra patrón y muestra problema	38
Tabla 5. Valores medio de los análisis fisicoquímicos realizados a la muestra patrón y muestra problema	40
Tabla 6. Resultado de los índices de calidad del agua para la muestra patrón y muestra problema	44
Tabla 7. Valores mínimos, máximos y medios VS valores recomendados por la EPA	51
Tabla 8. Propiedades cancerígenas de los COV`s	57
Tabla 9. Efectos nocivos y propiedades carcinógenas de los COV`s	58
Tabla 10. Sistemas de recolección selectiva de llantas usadas	62
Tabla 11. Umbral de llantas fabricadas y/o comercializadas al año	67
Tabla 12. Umbral de vehículos importados, fabricados y/o ensamblados al año	68
Tabla 13. Metas anuales de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas de vehículos	69
Tabla 14. Metas anuales de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas de vehículos tipo ciclomotores, motocicletas, bicicletas, motociclos, moped y llantas de vehículos fuera de carretera.....	69
Tabla 15. Normatividad ambiental	70
Tabla 16. Punto de ablandamiento del asfalto modificado con GCR VS temperatura.....	88
Tabla 17. Cantidad de mezcla asfáltica con GCR IDU	90

Índice de Figuras

Figura 1. Alternativas de tratamiento de llantas usadas en algunos países.....	12
Figura 2. Estructura de una llanta	23
Figura 3. Carcasa de una llanta (acero y tela).....	23
Figura 4. Caucho natural emanado del árbol Hevea brasiliensis	28
Figura 5. Campesino recolector de caucho	29
Figura 6. Análisis del Ciclo de Vida de las llantas	30
Figura 7. Quema de llantas en el dique del rio Guatiquia.....	36
Figura 8. Tamaño cabello humano VS PM2.5 y PM10.....	47
Figura 9. Relación de la calidad del aire, concentración de PM.....	47
Figura 10. Índice de Calidad del Aire ICA	48
Figura 11. Concentraciones mínima, máxima y media de metales pesados	49
Figura 12. Concentraciones medias de HAP	50
Figura 13. Concentraciones mínima, máxima y media de COV`s	51
Figura 14. Organigrama de un Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas	64
Figura 15. Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas en Colombia.....	66
Figura 16. Productos químicos derivados de la fase líquida de la pirolisis de llantas usadas	76
Figura 17. Elaboración de bolsos a partir de llantas usadas de la empresa UpcycleMo.....	77
Figura 18. Mesas elaboradas con llantas usadas con adhesión de madera de la empresa UpcycleMo.....	77
Figura 19. Accesorios elaborados con llantas usadas de la empresa UpcycleMo. A.	77

Figura 20. Primer corral en Villavicencio construido con llantas usadas.....	79
Figura 21. Vista frontal del muro de contención construido con llantas usadas.....	81
Figura 22. Vista lateral del muro de contención construido con llantas usadas	81
Figura 23. Antes y después de la construcción del muro de contención con llantas usadas	82
Figura 24. Unión de llantas cortadas previo a la construcción del muro de contención.....	82
Figura 25. Muro de contención construido por la empresa mexicana Yantek.....	83
Figura 26. Muro de contención más grande del planeta, “EcoMuro”	84
Figura 27. Estructura microscópica del hongo	86
Figura 28. Análisis microscópico de la biodegradación del hongo Pleurotus Ostreatus sobre el caucho de llantas usadas	86
Figura 29. Resistencia a la penetración de asfalto modificado con GCR	88
Figura 30. Productos fabricados con GCR	92

Índice de Apéndices

Apéndice A. Llantas abandonadas, sector 01	105
Apéndice B. Llantas abandonadas, sector 01.....	106
Apéndice C. Llantas abandonadas, Barrio Porvenir	107
Apéndice D. Llantas abandonadas, Barrio Porvenir	108
Apéndice E. Llantas abandonadas, Barrio Porvenir	109
Apéndice F. Llantas abandonadas, Institución Educativa PIO XII, Barrio Porvenir	110
Apéndice G. Llantas abandonadas, Institución Educativa PIO XII, Barrio Porvenir	111
Apéndice H. Llantas abandonadas, Barrio Porvenir	112
Apéndice I. Llantas abandonadas, Barrio Porvenir	113
Apéndice J. Llantas abandonadas, Barrio 20 de Julio	114
Apéndice K. Llantas abandonadas, Barrio industrial.....	115
Apéndice L. Llantas abandonadas, Barrio San Isidro	116
Apéndice M. Llantas almacenadas inadecuadamente, sector centro	117
Apéndice N. Llantas abandonadas, Vía Puerto López.....	118
Apéndice O. Llantas abandonadas, Barrio Ciudad Porfía	119

Introducción

En el mundo se producen 2.100 millones de toneladas de residuos sólidos cada año, de los cuales, sólo se reciclan el 16%. Según BBC NEWS (2019), este problema está relacionado principalmente con el consumismo y la gestión inadecuada de residuos sólidos, así como con la falta de planificación, escasa inversión social, políticas ineficaces y malas prácticas en los sectores industrial, de servicios y residencial urbano.

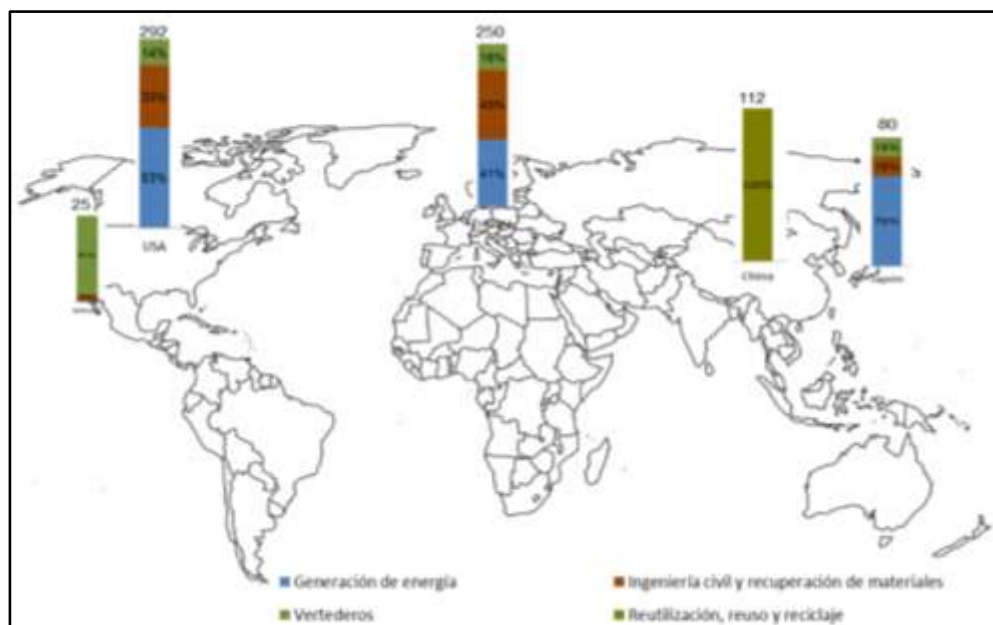
El Consejo Empresarial Mundial de Desarrollo Sostenible, informó de que cada año se producen en el mundo alrededor de 1.000 millones de llantas usadas. Alemania produce 628.000 toneladas de llantas usadas al año, frente a las 290.000 de Inglaterra, las 350.000 de Francia, las 150.000 de Italia y las 300.000 de España, según la Fundación Vida Sostenible (2014). La mayoría de estos neumáticos se vierten sin ningún control en instalaciones de acopio, y el resto se transforma en energía.

Países como, México, Estados Unidos, China y Japón, disponen de las llantas usadas en ingeniería civil y recuperación de materiales, tal como se observa en la figura 1.

Las alternativas de tratamiento y gestión de llantas usadas, varían en cada país. El crecimiento exponencial de estos residuos, las afectaciones ambientales y las afectaciones a la salud pública, no son disímiles, pues, el parque automotor está creciendo en todo el planeta.

Figura 1

Alternativas de tratamiento de llantas usadas en algunos países



Fuente: Sánchez (2013)

Tan solo el 2,2% de los residuos sólidos urbanos producidos en América Latina, se reciclan, según datos del Banco de Desarrollo de América Latina (2014). En esta región del globo, el reciclaje y aprovechamiento de llantas usadas, es una práctica relativamente nueva pero alentadora, puesto que, algunos países se han propuesto reducir los efectos que trae consigo el manejo inadecuado de llantas usadas. En El Salvador, Honduras, Brasil, Costa Rica, Perú, y México, se están implementando diferentes acciones para controlar la gestión inadecuada de llantas usadas y aprovechar su potencial energético (A. Cantanhede & G. Monge, 2002). Magallanes y Guillén (2014) indican que Colombia, Chile y Ecuador están mejorando sus políticas medioambientales. Uruguay, desde el año 2017, ha recolectado más del 80% de llantas usadas mediante iniciativas de recolección gratuita (*Journey Uruguay, 2019*).

Colombia produce cerca de 150 mil toneladas de llantas usadas cada año (*Argos, 2019*). Con el fin de prevenir efectos ambientales negativos, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y

Desarrollo Territorial, en el año 2010 creó la resolución 1457, cuyo objeto es “*establecer a cargo de los productores de llantas que se comercializan en el país, la obligación de formular, presentar e implementar los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas, con el propósito de prevenir y controlar la degradación del ambiente*”. La resolución 1326 de 2017 derogó esta resolución y adicionó nuevas medidas en relación con la cobertura de recolección de llantas usadas, incluyendo ahora, la recolección selectiva de llantas de vehículos fuera de carretera, llantas de motocicletas y llantas de bicicletas (ANLA, 2018), adicionalmente, se establece que los productores también sigan objetivos anuales de recolección selectiva. La Resolución 1457 de 2010 hizo posible que entre 2012 y 2016 se gestionaran responsablemente 59 millones de llantas usadas en el territorio colombiano, lo que equivale al 30% del total de llantas usadas; el 70% restante no se gestionó y terminó en espacios públicos (publimotos, 2015). Con cobertura en 20 departamentos, 237 sitios de recolección y 69 asociados, entre productores, fabricantes e importadores de llantas y vehículos, la organización sin ánimo de lucro Rueda Verde, es el sistema de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas más grande de Colombia. Centrada en la gestión medioambiental y la recolección selectiva de llantas usadas, Rueda Verde, ha gestionado más de 6.500.000 unidades en todo el país en los últimos cuatro años (Rueda Verde, S.F.).

Es frecuente observar llantas usadas abandonadas en espacios públicos del municipio de Villavicencio, a pesar de la existencia de una mesa municipal para la recolección de llantas usadas y convenios con instituciones encargadas de darles una gestión integral, el problema es persistente, puesto que, las llantas usadas que se recolectaron en las diferentes jornadas por la empresa Rueda Verde, Cormacarena, Gobierno Municipal y Departamental no tuvieron en cuenta todas las llantas, sino, especialmente las de rin 13 hasta rin de 22.5 pulgadas, lo que

significa que el resto de llantas usadas son las que se almacenan de forma inadecuada en viviendas, y se abandonan en espacios públicos de la ciudad, impactando en la calidad del medio ambiente y a la salud de los villavicensenses (*Noticias del Meta, 2017*).

Aspectos Generales del Proyecto

Pregunta de Investigación

¿Cómo las alternativas de tratamiento pueden contribuir a mitigar los efectos ambientales generados por la inadecuada gestión de llantas usadas en el municipio de Villavicencio?

Objetivos

Objetivo General

Determinar las afectaciones ambientales generadas por el inadecuado manejo de llantas usadas por el parque automotor del municipio de Villavicencio y analizar alternativas que mitiguen dichos efectos.

Objetivos Específicos

Identificar la manera en que se realiza la disposición final de llantas usadas por el parque automotor del municipio de Villavicencio.

Categorizar los impactos ambientales generados por el inadecuado manejo de llantas usadas por el parque automotor del municipio de Villavicencio.

Comparar las alternativas disponibles para la gestión integral de llantas usadas por el parque automotor del municipio de Villavicencio y destacar las más apropiadas.

Justificación

El inadecuado manejo de llantas usadas, es una problemática global que afecta la calidad del medio ambiente y la salud de las personas. Las llantas, desde su fabricación, ocasionan impactos al ambiente, puesto que, una sola llanta, contiene hasta 200 agregados diferentes, entre compuestos químicos como azufre, óxido de zinc, algunos metales pesados como, cobre, cadmio, plomo, hidrocarburos, entre otros aditivos, que representan un gran riesgo para el ambiente y la salud pública (Portafolio, S.F.).

Una vez han cumplido su vida útil, las llantas, se convierten en un problema, pues, continuamente son abandonadas en separadores de calles, avenidas, andenes, parques y potreros, en ocasiones se almacenan en vertederos a cielo abierto, causando afectaciones de origen paisajístico, ambiental, técnico, socioeconómico y sanitarios. Las llantas pueden tardar entre 250-300 años para degradarse naturalmente (Campoamor J. 2016) y en este transcurso de tiempo, pueden liberar en el ambiente peligrosos compuestos orgánicos como Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP), que corresponden a una variedad de compuestos químicos, metales pesados, como, cinc, níquel, cadmio, cromo, vanadio y arsénico, los cuales son absorbidos por la cobertura vegetal, arrastrados por escorrentías hasta llegar a las fuentes hídricas y bioacumulables en órganos importantes de animales y humanos (Ardila & Arriola S.F.) ocasionando un impacto negativo a los ecosistemas, especies faunísticas, cadenas tróficas y salud humana.

Una alternativa que es recurrente, consiste, en la quema incontrolada de llantas usadas, liberando enormes cantidades de humo y gases tóxicos como: Compuestos Orgánicos Volátiles (COV`s), Dióxido de Azufre (SO₂), Monóxido de Carbono (CO) , Dióxido de Nitrógeno (NO₂) (Ardila & Arriola S.F.), entre otros, contribuyendo al aumento de la temperatura del planeta y

deterioro de la calidad del aire, debido a que, estos gases cuando se liberan en el aire se acumulan en la atmosfera de nuestro planeta, generando un aumento de los Gases Efecto Invernadero (GEI). Las emisiones de estos contaminantes causan afectaciones al sistema respiratorio, que repercuten en patologías como, faringitis, laringitis, bronquitis, neumonía, secreciones bronquiales, obstrucción de la tráquea, la laringe y los bronquios y (EL TIEMPO, 1996).

Es necesario, fortalecer las acciones ejecutadas por los programas de posconsumo, que se encargan de hacer la adecuada gestión y la recolección no generalizada, sino, selectiva de llantas en desuso, pues, en la actualidad, no son totalmente eficaces y aunque si ha sido posible darles una gestión integral a miles de llantas usadas en el municipio de Villavicencio, la problemática persiste.

También se hace necesario, apoyar a los productores de Gránulos de Caucho Reciclado (GCR), que transforman las llantas usadas en materia prima para diferentes aplicaciones, teniendo en cuenta, que la comercialización de este producto no es rentable en ocasiones y que el mercado ha sido poco explotado, esta iniciativa es poco valorada en Villavicencio, pero es tal vez, la más oportuna para reducir los efectos de la contaminación ambiental por el inadecuado manejo de llantas usadas en el municipio de Villavicencio. La transformación de llantas usadas en GCR, contribuye a la gestión integral de estos residuos, genera empleo, fortalece la economía local, contribuye a la economía circular, fortalece la gestión e inversión de programas sostenibles y amigables ambientalmente, se contribuye a la fabricación de productos sostenibles, se previene la emisión de gases tóxicos, puesto que, la incineración descontrolada no es una alternativa viable, si no por el contrario, peligrosa para los ecosistemas y la vida humana.

Marco Referencial

Desde la creación de las llantas, en el año 1888, nace la necesidad de realizar un adecuado manejo de llantas usadas, que después de más de un siglo de su creación, se ha transformado en una problemática ambiental y sanitaria. En el año 1931, se industrializó el caucho sintético, el cual, fue utilizado desde entonces para la fabricación de llantas, en la industria automovilística (Hernández L., 2018).

En los años 70s, Estados Unidos y algunos países de Europa, inician con el coprocesamiento de llantas usadas, en el que consiste la sustitución de combustibles y materias primas por residuos para la producción de energía y fabricación de cementos. La empresa de cementos del grupo Argos en Colombia, desde el año 2015, implementa las llantas en usadas como fuente de combustible alternativa y reemplazo del carbón en el proceso de producción del cemento (Forero G, 2015).

Las llantas, tienen un gran poder calorífico y energético, es por eso, que se ha optado por aprovechar esas propiedades para la producción energética. La científica Maria Felisa Laresgoiti, es una química que propuso verificar la eficacia de la pirolisis como alternativa para el reciclaje de llantas usadas. La pirolisis, es el aumento de temperatura en ausencia de oxígeno que hace que se separen los componentes de las llantas usadas para aprovecharlos. Maria Felisa Laresgoiti, asegura que, la desintegración de la materia orgánica de las llantas es completa cuando el reactor se lleva a una temperatura de 500 °C durante 30 minutos. El resultado es la obtención de 40% de líquidos, 16% de gases y 44% de materia sólida (Agencia Sinc, 2010).

La empresa española AIMPLAS, desarrolla un proyecto llamado NEUPROD, que tiene como objetivo desarrollar nuevas aplicaciones de caucho a partir del reciclaje de llantas usadas, teniendo en cuenta los usos de poco valor añadido a los que se destina el reciclaje de llantas. Se

trata de ampliar la gama de productos que se pueden fabricar usando como materia prima GCR. Estos productos, son de tipo inmobiliario y del sector de la construcción, como aislantes y suelos de cauchos antideslizantes. Esto permite nuevas oportunidades de mercado aplicable a los productos fabricados con caucho reciclado (AIMPLAS, 2013).

Las afectaciones ambientales generadas por las llantas usadas, ha contribuido a que científicos desarrollen nuevas tecnologías y procesos para una adecuada gestión. El Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la empresa Enreco 2000, durante el VIII Congreso de Innovación dieron a conocer en el año 2013, un nuevo método para el reciclaje, reutilización y transformación de llantas usadas. El innovador método, consiste en someter las llantas a un proceso de calor para transformarlas en combustible (gasolina y diésel) y gases para la generación de energía a través de la destilación y gasificación. Esta propuesta, ha sido seleccionada por el Foro Económico de Astana como una de las más novedosas técnicas tecnológicas de la Unión Europea aptas de aplicación industrial (CSIC, 2013).

En el 2020, la revista Green Chemistry, publica un artículo sobre una innovadora forma de reciclaje de llantas usadas. El estudio realizado por un conjunto de científicos de la universidad de McMaster de Canadá, explica como descomponen y disuelven el caucho de las llantas usadas para obtener los aceites polímeros mediante el rompimiento de los enlaces azufre-azufre, aportando así, a una nueva forma de obtención de materias primas a partir del reciclaje de llantas usadas (Green Chemistry, 2020).

En 2016, se inaugura en Albania Guajira, la única planta de reciclaje de llantas de tamaño grande, única en Latinoamérica, que tiene como meta procesar más de 2.000 llantas usadas de gran tamaño en el año, para generar y comercializar 5.000 toneladas de polvo de caucho y 2.300 toneladas de acero (Portafolio, 2016).

La resolución 1457 de 2017, establece una serie de obligaciones a los productores, que fabriquen importen y comercialicen llantas y vehículos en el país. Esta norma marca un hecho histórico, pues los productores, deben presentar e implementar un Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas. Se pretende involucrar a los productores como responsables directos de la recolección y gestión ambiental de llantas usadas.

Generalidades de las Llantas

Las llantas tienen como finalidad, suministrar a todo vehículo que use ruedas, un adecuado y confiable contacto por adherencia sobre los diferentes tipos de suelo y sus condiciones, además de posibilitar el arranque, frenado y guía del vehículo (Reina & Rodriguez, S.F.). Esta adherencia al suelo, se da principalmente por la fuerza de fricción resultante del rozamiento entre dos cuerpos. Existen tantos diseños y tamaños de llantas como vehículos en el mundo y su diseño y tamaño es conforme al uso para el que fue construido.

Composición y Características de las Llantas

Una sola llanta puede contener hasta 200 sustancias químicas diferentes que ayudan a tolerar grandes cargas, aportar la suficiente flexibilidad para soportar las deformaciones del suelo y soportar los desfavorables efectos de los aceites, grasas, luz solar, calor y oxígeno, principales degradantes del caucho (Carrión, 2014). Su estructura principal la conforman 3 productos: caucho, acero y tela.

El caucho natural y sintético conforman la mayor parte de la llanta en términos de peso y volumen, posteriormente, negro de humo, refuerzos metálicos, refuerzos textiles, óxido de zinc, azufre, entre otros aditivos. En la tabla 1, se relaciona la cantidad en porcentaje de los compuestos químicos de una llanta.

Tabla 1

Materiales que componen una llanta

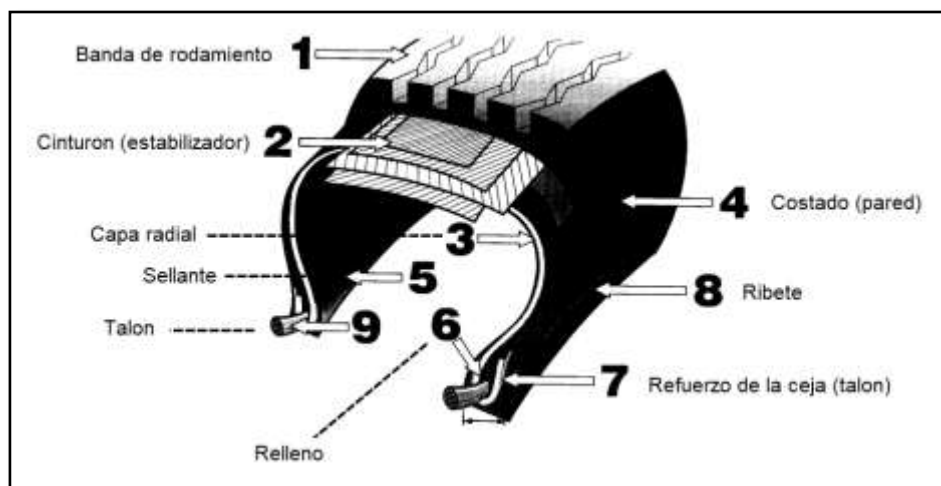
Compuestos	Cantidad (%)	Funcionalidad
Caucho natural	18	Materiales principales que dan forma y funcionalidad a las llantas
Caucho sintético	29	

Negro de humo	22	Otorga consistencia, dureza y resistencia a la tracción
Hilos metálicos de acero	17	Fortalecen la llanta y forman su esqueleto
Hilos textiles de nylon	6	
Óxido de zinc	1,2	Catalizador
Azufre	1	Agente vulcanizador
Aditivos químicos	5,8	Otorgan mayor durabilidad y resistencia al desgaste

Nota: composición en porcentaje de los diferentes materiales de una llanta y su funcionalidad (Reina Tobo & Rodríguez Díaz, n.d.)

Figura 2

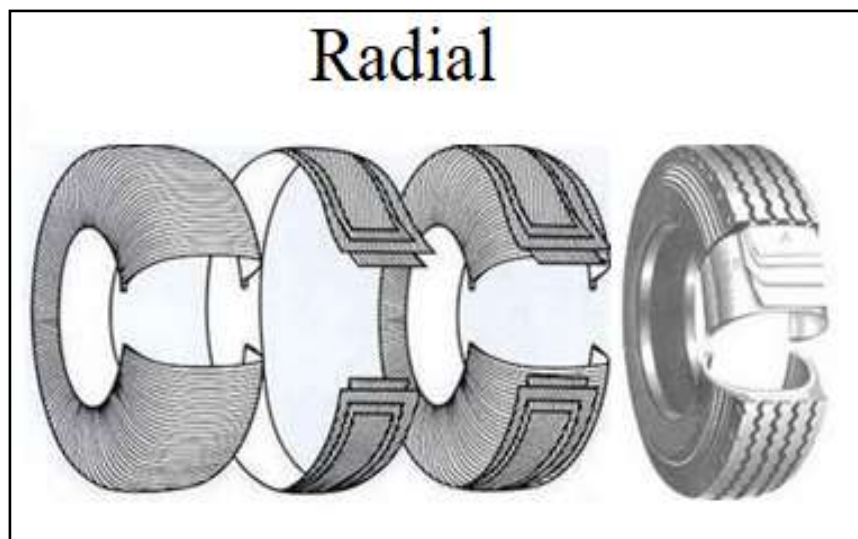
Estructura de una llanta



Fuente: Direccion de transporte & Conae, (2000)

Figura 3

Carcasa de una llanta (acero y tela)



Fuente: Direccion de transporte & Conae, (2000)

Tabla 2

Partes de una llanta

Item	Segmento	Funcionalidad
1	Banda de rodamiento	Es la parte de la llanta que esta en permanente contacto con el suelo, es la mas resistente y a la vez la que mas se desgasta, proporciona la traccion y frenado necesario al vehiculo.
2	Cinturon (estabilizador)	Son capas compuestas por cables de acero y naylon en forma de cintures o cintas que proporcionan resistencia y dureza al neumatico, es la base y estabilizador de la banda de rodamiento.
3	Capa radial	Compuesta por alambres de acero, contribuye a dar forma, resistencia y dureza a la llanta, sobre

		la capa radial descansa el cinturón.
4	Costado (pared)	Provee protección a la capa radial de la llanta, suministra la resistencia necesaria para la flexión generada por las cargas.
5	Sellante	Son capas de caucho que funcionan como revestimiento interno en llantas que carecen de cámara, su funcionalidad es evitar que el aire se salga de la llanta.
6-7	Relleno y Refuerzo de la ceja (talon)	Fortalecen el talón y ceja de la llanta que rodean el alambre externo de la capa radial.
8	Ribete	Ayuda a que el talón se mantenga más rígido y resistente ante los esfuerzos sometidos.
9	Talón	Esta compuesto de alambre de acero resistente cubierto por caucho, el cual se articula con la carcasa y contribuye a mantener el diámetro de la llanta.

Nota: se explica la funcionalidad de cada segmento de una tabla, Dirección de Transporte & Conae, (2000)

Fabricación de Llantas

En la fabricación de las llantas, se emplean una variedad de materiales, elementos y compuestos químicos, cuya finalidad es proporcionar una vida útil de larga duración, resistencia y seguridad al usuario. La fabricación de las llantas, inicia desde la recepción de materias primas a la planta, posteriormente la fabricación, embalaje y distribución.

Mezclado de Materias Primas

Una fórmula química y técnica especial, son necesarias para que el mezclado de las materias primas otorgue la mayor durabilidad, flexibilidad, adherencia y maniobrabilidad a las llantas. Esto se logra, con la cantidad adecuada de materiales que cada fabricante celosamente guarda como una receta secreta. En esta parte del proceso, todos los ingredientes se mezclan en una recámara que en su interior contiene dos rodillos en forma de espiral, a una temperatura entre los 160 y 170 °C y así obtener una mezcla lo suficientemente maleable para empezar a darle forma a la llanta (Bogotá, 2006).

Extrusión y Laminado

Una vez se hayan mezclado todos los materiales, se procede a desplegar una lámina de caucho aun sin un grosor y ancho definidos. Esta lámina es transportada por una serie de rodillos que por acción mecánica y altas temperaturas se le da la forma específica a la lámina de caucho, esto, de acuerdo al tamaño y tipo de llanta a fabricar (Castro, 2008).

Calandrado

Los refuerzos de la llanta como las telas de alambre y nylon, se recubren con las láminas de caucho, estos refuerzos también llamados correas, forman la carcasa de la llanta y le ayudan a dar resistencia para soportar las pesadas cargas. Durante este proceso, se aplica vapor caliente para que sea más fácil la unión del caucho-textil y caucho-alambre; posteriormente, se procede a cortar en fracciones de manera transversal de acuerdo al tamaño de la llanta a fabricar (Bogotá, 2006).

Construcción del Talón

El talón, es un alambre recubierto por caucho, es la pieza que contiene el alambre más grueso y resistente de toda la llanta, pues evita que la misma pierda su forma circular. Esta pieza se fabrica a parte de la carcasa y cinturones de la llanta (Bogota, 2006).

Armado de la Llanta

Consiste en ensamblar cada una de las partes fabricadas y darle la forma a la llanta, pues durante las etapas anteriores, esta presenta una forma cilíndrica y no circular. En esta etapa se adhieren los talones y la banda de rodamiento a la carcasa y cinturones de la llanta. (Castro, 2008).

Vulcanización

En la prensa de vulcanización, la llanta es sometida a más de 300 °C por 25 minutos. En el transcurso de este tiempo, se generan diferentes reacciones químicas debido a la interacción del azufre y otros compuestos que aportan al neumático rigidez y durabilidad. Durante la vulcanización, se le da un patrón característico a la banda de rodamiento y se le imprimen en sus costados las marcas y demás información reglamentaria exigidas por la ley (Bogota, 2006).

Ciclo de Vida de las Llantas

La fabricación de llantas, implica procesos complejos de alta ingeniería, que involucran mezclas de hasta 200 compuestos diferentes y un elevado consumo de recursos naturales y sintéticos, con el fin de fabricar el más resistente y duradero producto.

Lo más importante de una llanta, es el caucho, pues es el material más abundante en masa y volumen, es el que está en contacto directo con el suelo y es el que resiste todas las condiciones climáticas, además de soportar todo el desgaste y las pesadas cargas.

Las llantas pueden tardar entre 250-300 años para degradarse naturalmente, esto debido a la variedad de componentes químicos que la forman. Las llantas tienen en promedio, una vida

útil de 50.000 kilómetros, en ocasiones puede durar más o menos tiempo de acuerdo a distintos factores, como, por ejemplo, tipo de llanta, estado del suelo, mantenimiento, condiciones climáticas y hasta la manera de conducción (Rocío Sánchez Juan, 2012). Según Michelin, uno de los fabricantes de llantas más importantes en el mundo, la vida útil de una llanta podría triplicarse gracias al reencauche, el cual es el proceso de reemplazar la banda de rodamiento desgastada por una nueva. El reencauche de 100 llantas ahorra 5 toneladas de materia prima, lo que es un ahorro en recursos y menos emisiones de CO₂ en comparación con la fabricación de llantas nuevas.

El proceso de fabricación de las llantas, inicia a partir de los cultivos del árbol *Hevea brasiliensis* en países como Tailandia, Indonesia, Malasia y parte de África, los mayores productores de caucho natural en el mundo, pues producen cerca del 85%, lo que es equivalente a 20 millones de toneladas de caucho natural al año (Periodico del Meta, 2020b). El caucho natural se obtiene, realizando incisiones en la corteza del árbol *Hevea brasiliensis*, de manera que el látex fluya hasta un recipiente en el que se coagula y toma forma sólida, como se aprecia en la figura 3.

Figura 4

Caucho natural emanado del árbol Hevea brasiliensis



Fuente: Organización de Consumidores y Usuarios, (2013)

La explotación de caucho natural, es una industria reprochada y controvertida, por sus impactos negativos que le causa al medio ambiente y por la vulneración de derechos humanos de los trabajadores. De acuerdo a la Organización de Consumidores y Usuarios, una investigación realizada en el año 2013, dejó al descubierto las afectaciones ambientales y sociales que genera la industria del caucho. Los ecosistemas se ven severamente afectados, pues declaran deforestación y explotación de reservas forestales por parte de importantes fabricantes de llantas, como la marca Michelin, que en 2007 destruyó bosques en la reserva más grande de Nigeria para las plantaciones de caucho. La Organización de Consumidores y Usuarios, dan a conocer, que los trabajadores en las plantaciones no cuentan con elementos de protección personal para la manipulación de pesticidas y que esto pone en riesgo la salud de los trabajadores, los cuales muchos de ellos son menores de edad, pero la necesidad y precarias condiciones de vida, los obligan a trabajar, debido a la pobreza extrema que se vive en países como Indonesia.

Figura 5

Campeño recolector de caucho



Fuente: Organización de Consumidores y Usuarios, (2013)

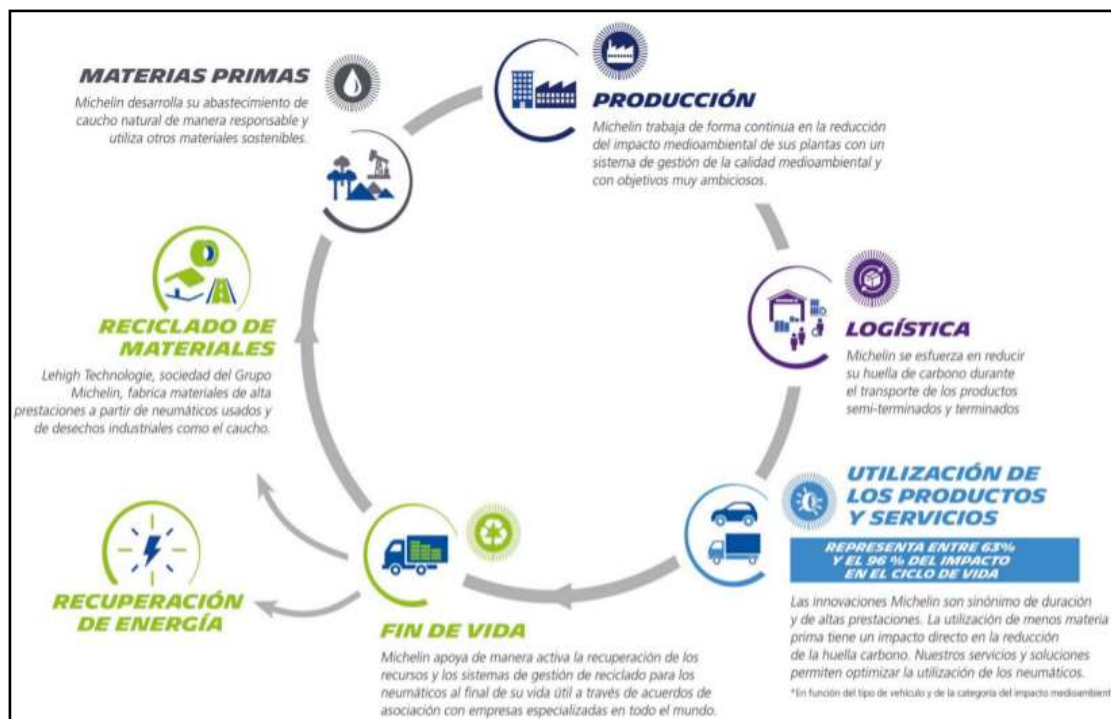
Las llantas requieren de caucho sintético para su fabricación, el cual aporta un 29% del total de componentes, se obtiene a través de hidrocarburos insaturados, gracias a reacciones químicas que le aportan elasticidad y resistencia. El caucho sintético, a diferencia del caucho natural es muy resistente a la abrasión, soporta mucho más las altas temperaturas, no es pegajoso y cuando se deforma recupera rápidamente su estado original. Existen variedades de cauchos sintéticos, como, polímeros de estireno, butadieno, poliisopreno, acrinonitrilo, butilo y polibutadieno, este último es el más empleado en la fabricación de llantas (Reyes, 2015).

El caucho, sin importar su variedad, cuando se vulcaniza, se forman largas cadenas de moléculas de átomos de nitrógeno y carbono entrelazadas por puentes de azufre, esto hace, que sean mucho más resistentes ante la biodegradación (Ospina & Villada-Gil, 2011).

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV), es una herramienta científica que permite identificar y evaluar las cargas ambientales generadas como consecuencia de la fabricación de un producto o prestación de un servicio. El ACV comprende 5 procesos en los que se identifica la manufactura de un producto, desde su nacimiento hasta su fin de vida. En este trabajo, nos centraremos en el impacto ambiental que genera el último proceso, pues el fin de la vida útil de las llantas es lo que origina el objetivo de este trabajo.

Figura 6

Análisis del Ciclo de Vida de las llantas



Fuente: Michelin, (2020)

El proceso de reencauche, aporta una vida útil más prolongada a las llantas usadas. El reencauche de llantas, es una industria que aporta significativamente a la preservación del medio ambiente, pues se evita el desecho de la llanta en un 60% y se ahorra un 68% de materias primas en la fabricación de una llanta nueva. Las empresas transportadoras, son las que más se benefician con el reencauche de llantas en Colombia, ya que, 600 mil llantas de buses y camiones son reencauchadas al año (Rubiano, 2019).

Todo residuo sólido no peligroso, puede ser aprovechado y reciclado mediante un proceso de recuperación de materiales con el objetivo de incorporarlos nuevamente al ciclo económico y productivo.

Impactos Ambientales

De acuerdo al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Min. Ambiente), las llantas no son un residuo peligroso, sin embargo, están catalogadas como un residuo especial, lo

que significa que, por su naturaleza, tamaño, composición y peso, requieren de un Plan de Gestión Integral diferente al de los residuos sólidos ordinarios y por esta razón, la empresa prestadora del servicio público de aseo (BIOAGRICOLA DEL LLANO S.A.S.) no hace la recolección, transporte, almacenamiento y compactación de llantas usadas generadas por el parque automotor en el municipio de Villavicencio. Un prestador que recoja, transporte y almacene las llantas usadas, puede contribuir a mitigar los efectos de la contaminación que genera el abandono de llantas usadas en espacios públicos.

A pesar de no estar clasificado como un residuo peligroso, las llantas usadas representan un riesgo ecológico, ambiental y sanitario, pues el abandono en espacios públicos, cuerpos de agua y lugares baldíos, afectan el suelo, la atmosfera e hidrosfera, facilitándose el transporte y dispersión de sustancias nocivas para el medio ambiente y la salud humana. En su composición, las llantas contienen metales pesados como: Zinc, Cromo, Níquel, Plomo y Cadmio, que son tóxicos, incluso en bajas concentraciones. Este grupo de contaminantes tóxicos, representan un riesgo para los diferentes organismos, debido a la capacidad de biotransformación, bioacumulación y persistencia, lo que los hace difíciles de degradar naturalmente, permaneciendo en los ecosistemas por largos periodos de tiempo (Rodríguez, 2017).

Los metales pesados se concentran en el organismo por las vías fundamentales de entrada: vías dérmicas, por ingestión y por inhalación, contribuyendo al desarrollo de diferentes enfermedades, incluido el cáncer y hasta la muerte, cuando se está expuesto a elevadas concentraciones (Rodríguez, 2017).

Diferentes investigaciones a nivel mundial dan a conocer que tenemos de 400 a 1.000 veces más plomo en los huesos que hace 400 años, debido a la presencia de este metal en alimentos y productos industriales (Londoño Franco et al., 2016).

La intoxicación por metales pesados, afecta drásticamente la salud de los niños, afectándoles el cerebro, el sistema nervioso central, les puede provocar un coma, convulsiones y la muerte. Los niños sobrevivientes a exposiciones elevadas de plomo, pueden llegar a padecer secuelas como: trastornos de comportamiento e invalidez intelectual. La exposición en bajas concentraciones de metales pesados en niños, afecta el desarrollo normal del cerebro reduciendo el cociente intelectual, generando cambios de comportamiento, disminución de la capacidad de concentración y aumento de las conductas antisociales, además de provocar hipertensión, afectaciones renales, anemia, toxicidad en órganos reproductores. Los efectos neurológicos y conductuales generados por la intoxicación de plomo son irreversibles, causándoles a los niños problemas graves en su salud el resto de su vida (Organización Mundial de la Salud, 2021).

Tabla 3

Afectaciones a la salud de los metales pesados

Metales pesados	Vías de intoxicación	Afectaciones a la salud humana
Exposición al Plomo:	El plomo, ingresa al organismo por ingestión durante el consumo de bebidas y alimentos contaminados, también ingresan por inhalación durante la incineración de residuos que	La ingestión e inhalación de plomo, afectan la síntesis de hemoglobina, altera la función renal, afecta el tracto gastrointestinal, deteriora las articulaciones y el sistema nervioso. Durante la intoxicación aguda, se presentan alteraciones digestivas, vomito, dolores epigástricos y abdominales, convulsiones, afectaciones hepáticas, incluso se pueda entrar en un estado de coma. Durante la intoxicación crónica, el organismo puede experimentar neuropatías, dolor y debilitamiento

	contengan plomo.	en los músculos, alteraciones del comportamiento, cefalea, fatiga, nefritis crónica, irritabilidad, temblores y alucinaciones con pérdida de memoria.
Exposición a Cadmio	El cadmio ingresa al organismo por vía digestiva por el consumo de alimentos o agua contaminada y por inhalación.	Genera efectos en la salud, tales como: disfunción renal por bioacumulación, hipertensión arterial, enfermedades pulmonares como cáncer, osteoporosis tanto en humanos como en animales.
Exposición al Zinc	Se puede presentar durante la ingesta de alimentos y agua o al inhalar los “humos de zinc” y por contacto con óxido de zinc.	Un exceso en la ingesta de zinc, afecta a todos los mamíferos, ya que, genera trastornos neurológicos, hematológicos, inmunológicos, daños renales, afectaciones hepáticas, cardiovasculares y afecciones genotóxicas.
Exposición al Cromo	Ingresa al organismo por vía respiratoria, digestiva y cutánea.	La inhalación es la vía más frecuente de intoxicación, causando efectos en la salud, tales como: irritación de la nariz, erupciones cutáneas, debilita el sistema inmune, afectaciones en hígado y riñones, alteraciones en material genético, malestar estomacal, úlceras, cáncer de pulmón y hasta la muerte.
Exposición al Níquel	Se puede presentar durante la ingesta de	Causa mareos, fallos respiratorios, embolia de pulmón, asma, defectos de nacimiento desordenes del corazón,

alimentos y agua o al inhalar el aire contaminado.	bronquitis crónica, alergias. La exposición al níquel puede desarrollar cáncer de laringe, próstata, nariz y pulmón.
--	--

Nota: afectaciones a la salud de los metales pesados, una vez ingresan al organismo por la diferentes vías de exposición (Rodríguez, 2017)

Los metales pesados presentes en las llantas usadas, pueden contaminar y degradar los suelos, afectando directamente la vegetación, debido a la capacidad de bioacumulación, lo que comprometería el primer eslabón de la cadena trófica, generando una reducción en el número de especies presentes. Estos contaminantes, pueden llegar a los cuerpos de aguas superficiales por medio de escorrentías y pueden llegar hasta las aguas subterráneas por infiltración y afectar la calidad del agua y todos los organismos acuáticos. Al ser bioacumulables, se ve afectada la fauna por riesgo de amplificación, al elevarse las concentraciones de metales pesados a medida que se asciende en la cadena trófica (Gobierno de Canarias, 2022).

Los metales pesados se bioacumulan en microorganismos como algas y fitoplancton que son ingeridos por los peces, el toxico se bioconcentra en tejidos y órganos, pasando posteriormente a producciones de carne, que son consumidos por el ser humano (Yulieth C. Reyes, Inés Vergara, Omar E. Torres Mercedes Díaz, 2016).

La quema descontrolada de llantas usadas como alternativa de tratamiento, es una práctica que resulta incluso peor para la salud de las personas y la calidad del medio ambiente que el abandono en sitios públicos y lugares baldíos. Personas inescrupulosas provocaron un incendio producto de la quema de llantas usadas en el dique del río Guatiquia, las autoridades se mostraron preocupadas por esta situación, pues, habitantes del sector, denunciaron que estaban padeciendo síntomas de enfermedades respiratorias, como consecuencia de la inhalación del humo y gases tóxicos (Agudelo, 2020).

Es frecuente el llamado a las autoridades por parte de la ciudadanía por la quema de llantas en este sector de Villavicencio, pues por lo difícil que le resulta a la policía acceder a este sitio es que las personas aprovechan para realizar estas quemas indiscriminadas, lo que dificulta la captura de los responsables, pues cuando la policía llega al sitio, no encuentran a ninguno de los autores de estos incendios. La antes secretaria de medio ambiente de Villavicencio, Sara Cabrera, indico, que esta situación se puede deber a que en nuestra ciudad no existe un lugar para el acopio de llantas usadas para su correcta disposición (Periodico del Meta, 2020a).

Figura 7

Quema de llantas en el dique del rio Guatiquia



Fuente: Periodico del Meta, (2020)

La quema a cielo abierto está prohibido por el Código Nacional de Convivencia en su artículo 102, y la resolución GJ12613022 emitida el 14 de enero de 2013 por Cormacarena, esto, amerita una sanción económica equivalente a \$ 940.000 (Periodico del Meta, 2020a).

En el año 2015, el medio de comunicación RCN, da a conocer en su sitio web, que seis personas resultaron intoxicadas por la inhalación de humos tóxicos generados por la quema de

800 llantas usadas en el barrio industrial del municipio de Villavicencio, las cuales tuvieron que ser trasladadas hasta centros asistenciales debido a la gravedad de las afectaciones (RCN, 2015).

Durante la combustión de las llantas usadas, se generan grandes masas de humo altamente tóxico que emana Monóxido de carbono (CO), Dióxido de azufre (SO₂) y Dióxido de carbono (CO₂) que resultan irritantes para las personas, afectan los pulmones, las mucosas y las vías respiratorias, causan asfixia, ardor en la garganta, hinchazón en la boca, conjuntivitis química, secreciones nasales y pulmonares. Generalmente los más afectados son los niños, adultos mayores y mujeres embarazadas. Las emisiones atmosféricas, no solo deterioran la calidad del aire, sino también deterioran la calidad de los cuerpos de agua, pues los contaminantes se depositan en los suelos y acidifican las aguas (Instituto Nacional de Salud, 2018).

Un estudio realizado por el Grupo de Investigación en Catálisis Ambiental y Energías Renovables, del Instituto Universitario Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid sede Medellín, dio a conocer los efectos generados por la quema de llantas usadas en la calidad del agua en un tramo de la quebrada Piedras Blancas ubicada en el oriente del Valle de Aburrá del municipio de Medellín, departamento de Antioquia. La investigación, pretendió determinar la calidad del agua de la quebrada Piedras Blancas en la zona donde se produjo la quema de llantas y 2 km aguas arriba, con el fin de determinar el grado de contaminación en la zona de incidencia y en una zona donde no se produjo afectaciones por la quema de llantas. Se realizaron dos muestreos, cada uno con un mes de diferencia, donde se recolectaron dos muestras de agua, lo que sería la muestra problema y una muestra patrón, posteriormente se les realizó análisis físicoquímico en un laboratorio acreditado en el municipio de Medellín, por triplicado a cada parámetro para obtener un valor medio de los muestreos realizados (Ardila & Arriola, 2017).

Tabla 4*Parámetros evaluados a la muestra patrón y muestra problema*

Parámetro	Unidades	Método
Temperatura	°C	AWWA-4500H+
Oxígeno Disuelto (OD)	mg O ₂ /L	AWWA-4500O C
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg O ₂ /L	AWWA-5220 D
Demanda Bioquímica de Oxígeno Total (DBO ₅)	mg O ₂ /L	AWWA-5210 B
Carbono Orgánico Total (COT)	mg O ₂ /L	AWWA-5310 B
Sólidos Totales	mg/L	AWWA-2540 B
Sólidos Totales Volátiles	mg/L	AWWA-2540 E
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	AWWA-2540 D
Cobre Total	mg Cu/L	AWWA-3500 Cu
Cromo ⁶⁺	mg Cr ⁶⁺ /L	AWWA-3500-Cr ⁶⁺ D
Cadmio Total	mg Cd/L	AWWA-3500 Cd
Plomo Total	mg Pb/L	AWWA-3500 Pb
Níquel Total	mg Ni/L	AWWA-3500 Ni
Zinc Total	mg Zn/L	AWWA-3500 Zn
Hierro Total	mg Fe/L	AWWA-3500Fe-D
Mercurio Total	mg Hg/L	AWWA-3112 B
Cobalto Total	mg Co/L	AWWA-3111 B
Estaño Total	mg Sn/L	AWWA-3111 D

Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ /L	AWWA-2320 B
Acidez Total	mg CaCO ₃ /L	AWWA-2310 B
Color	UCP	AWWA-2120
Dureza Total	mg CaCO ₃ /L	AWWA-2340 C
pH	Unidades de pH	AWWA-4500H+
Conductividad	μS/cm	AWWA-2510 B
Turbiedad	UNT	AWWA-2130 B
Cloro Residual Libre	mg Cl ₂ /L	AWWA-4500-Cl B
Calcio Total	mg Ca/L	AWWA-3500-Ca D
Fosfatos	mg PO ₄ ³⁻ /L	AWWA-4500-PO ₄ ³⁻ D
Manganeso Total	mg Mn/L	AWWA-3500-Mn B
Molibdeno Total	mg Mo/L	AWWA-3500-Mo B
Magnesio Total	mg Mg/L	AWWA-3500-Mg B
Sulfatos	mg SO ₄ ²⁻ /L	AWWA-4500-SO ₄ ²⁻ E
Cloruros	mg Cl ⁻ /L	AWWA-4500-Cl- B
Nitratos	mg NO ₃ ⁻ /L	AWWA-4500-NO ₃ ⁻ B
Nitritos	mg NO ₂ ⁻ /L	AWWA-4500-NO ₂ ⁻ B
Aluminio (Al ³⁺)	mg Al ³⁺ /L	AWWA-3500-Al ³⁺ D
Fluoruros	mg F ⁻ /L	AWWA-4500-F- C
Coliformes Totales (Con Colilert), Nmp	NMP/100mL	AWWA-9223 B
Coliformes Fecales (Con Colilert), NMP	NMP/100mL	AWWA-9223 B

Escherichia Coli (Con Colilert), NMP	NMP/100mL	AWWA-9223 B
Surfactantes	mg SAAM/L	AWWA-5540 C
Fenoles	mg Fenoles/L	AWWA-5530 B, D
Arsénico Total	mg As/L	AWWA-3114 C
Plata Total	mg Ag/L	AWWA-3111 B

Nota: resultados de los parámetros evaluados utilizando diferentes métodos Fuente: Ardila & Arriola, 2017

Tabla 5

Valores medio de los análisis fisicoquímicos realizados a la muestra patrón y muestra problema

Parámetro	Muestra Patrón	Muestra Problema	Unidades	Valores Máximos Permisibles Según Su Uso /Normatividad				
				HD ^a	HD ^b	FF	AG	PC
				Temperatura	16.5	18.5	°C	N.C
Oxígeno Disuelto (OD)	7.5	4.6	mg O2/L	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	4.8	125.5	mg O2/L	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
Demanda Bioquímica de Oxígeno Total (DBO ₅)	3.7	50.2	mg O2/L	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C

Carbono									
Orgánico Total	8.6	23.4	mg O2/L	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
(COT)									
Relación DBO ₅ /DQO	0.77	0.40	mg/L	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
Relación DBO ₅ /COT	0.43	2.14	mg/L	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
Sólidos Totales	49.5	2759.5	mg/L	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
Sólidos Totales Volátiles	15.5	344.0	mg/L	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
Sólidos Suspendidos Totales	3.7	286.5	mg/L	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
Cobre Total	<0.050	52.8	mg Cu/L	1.0	1.0	0.1 CL ₅₀ ⁹⁶	2.0	0.5	
Cromo6+	<0.050	14.0	mg Cr6+/L	0.05	0.05	0.01 CL ₅₀ ⁹⁶	0.1	1.0	
Cadmio Total	<0.003	20.8	mg Cd/L	0.01	0.01	0.01 CL ₅₀ ⁹⁶	0.01	0.05	
Plomo Total	<0.010	63.0	mg Pb/L	0.05	0.05	0.01 CL ₅₀ ⁹⁶	5.0	0.1	
Níquel Total	<0.010	32.2	mg Ni/L	N.C	N.C	0.01 CL ₅₀ ⁹⁶	0.2	N.C	
Zinc Total	<0.050	373.5	mg Zn/L	15.0	15.0	0.01 CL ₅₀ ⁹⁶	2.0	25.0	
Hierro Total	1.7	75.0	mg Fe/L	N.C	N.C	0.1 CL ₅₀ ⁹⁶	5.0	N.C	
Mercurio Total	<0.001	3.2	mg Hg/L	0.002	0.002	0.01 CL ₅₀ ⁹⁶	N.C	0.01	
Cobalto Total	<0.010	5.6	mg Co/L	N.C	N.C	N.C	0.05	N.C	
Estaño Total	<0.010	10.5	mg Sn/L	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C	

Alcalinidad Total	17.9	90.2	mg CaCO ₃ /L	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
Acidez Total	<10.0	637.5	mg CaCO ₃ /L	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
Color	91.2	1595.0	UCP	75.0	20.0	N.C	N.C	N.C
Dureza Total	15.4	1515.0	mg CaCO ₃ /L	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
Ph	6.8	6.6	Unidades de pH	5.0- 9.0	6.5- 8.5	6.5-9.0	4.0- 9.0	N.C
Conductividad	72.9	2174.9	μS/cm	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
Turbiedad	14.9	234.9	UNT	N.C	10.0	N.C	N.C	N.C
Fosfatos	0.035	0.042	mg PO ₄ ³⁻ /L	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
Manganeso Total	<0.010	0.038	mg Mn/L	N.C	N.C	0.1CL ₅₀ ⁹⁶	0.2	N.C
Molibdeno Total	<0.010	0.014	mg Mo/L	N.C	N.C	N.C	0.01	N.C
Sulfatos	<10.00	25.7	mg SO ₄ ²⁻ /L	400.0	400.0	N.C	N.C	N.C
Nitratos	<1.50	6.55	mg NO ₃ ⁻ /L	10.0	10.0	N.C	N.C	90
Nitritos	<0.003	2.89	mg NO ₂ ⁻ /L	1.0	1.0	N.C	N.C	10
Coliformes Totales (Con Colilert), NMP	11199	24196	NMP/100mL	20000	1000	N.C	N.C	N.C

Coliformes									
Fecales	(Con Colilert), NMP	6908	15498	NMP/100mL	2000	N.C	N.C	N.C	N.C
Escherichia Coli	(Con Colilert), NMP	63.0	148	NMP/100mL	N.C	N.C	N.C	N.C	N.C
Surfactantes		<0.100	5.78	mg SAAM/L	0.5	0.5	0.143 CL ₅₀ ⁹⁶	N.C	N.C
Fenoles		<0.050	4.430	mg Fenoles/L	0.002	0.002	1.0CL ₅₀ ⁹⁶		
Arsénico Total		<0.002	0.03	mg As/L	0.05	0.05	0.1 CL ₅₀ ⁹⁶	0.1	0.2
Plata Total		<0.100	7.2	mg Ag/L	0.05	0.05	0.01 CL ₅₀ ⁹⁶	N.C	N.C

Nota: se comparan los valores de las muestras patrón y problema con las normatividad (Ardila & Arriola, 2017)

“**N.C:** *parámetro no contemplado en la norma.*”

Valores máximos permisibles por la normatividad ambiental colombiana para: uso humano y doméstico (HD^a) (HD^b), que para su potabilización requiere solamente tratamiento convencional y desinfección, preservación de flora y fauna (FF), fines agrícola (AG) y pecuario (PC)”, (Ardila & Arriola, 2017).

Los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico, deja ver la diferencia entre la calidad del agua de la muestra patrón y la calidad del agua de la muestra problema, dejando en evidencia el impacto negativo, producto de la quema de llantas usadas en las orillas de la quebrada Piedras Blancas. Los resultados de la muestra problema se compararon con los valores máximos permisibles establecidos por la normatividad ambiental para uso humano y doméstico (Decreto

1594 del 26 de junio de 1984, Decreto 3930 del 25 octubre de 2010 y la Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015). Para la evaluación de la calidad del recurso hídrico y el impacto ambiental generado por la quema de llantas usadas, se emplearon tres índices de calidad del agua: Índice de Calidad del Agua en Corrientes Superficiales (ICA, 2014), Índice de Calidad del Agua de la Fundación Nacional de Saneamiento (INSF, 1978) y el Índice de Calidad del Agua Dinius. En la tabla 6, se muestran los resultados del cálculo de cada índice, estos resultados son datos cuantitativos obtenidos a partir de una escala de puntuación, que asigna un color de acuerdo a la calidad del agua (Ardila & Arriola, 2017).

Tabla 6

Resultado de los índices de calidad del agua para la muestra patrón y muestra problema

Muestra	DINIUS (1987)		INSF (1978)		ICA (2014)	
	Valor	Calidad	Valor	Calidad	Valor	Calidad
Patrón	94.2	Excelente	64.7	Regular	0.88	Aceptable
Problema	58.9	Regular	40.6	Mala	2.74	Muy mala

Nota: comparación de los valores obtenidos con cada uno de los índices de calidad del agua (Ardila y Arriola, 2017)

Los resultados del Oxígeno Disuelto (OD) de la muestra problema, vario un 61% con respecto a los resultados de la muestra patrón, lo que indica que la contaminación de la quebrada Piedras Blancas es de naturaleza orgánica en su mayoría, producto de los compuestos de las llantas usadas, como: compuestos orgánicos volátiles, hidrocarburos aromáticos policíclicos, dioxinas, furanos y bifenilos policlorados. Durante la quema de llantas usadas se generan importantes cantidades de HAP, causantes de generar en organismos vivos, afectaciones de tipo mutagénicas, carcinogénicas y teratogénicas (Ardila & Arriola, 2017).

De acuerdo a una investigación científica “*An Environmental Impact Assessment of the Open Burning of Scrap Tires*” publicada por Journal of Applied Sciences en el año 2014, la cual se enfocó en examinar los impactos atmosféricos y las afectaciones a la salud humana por la quema de llantas usadas a cielo abierto, por medio de lixiviados y sólidos con trazas de residuos químicos peligrosos y la liberación de gases tóxicos producto de la combustión de llantas usadas. Durante la quema de llantas, se generan subproductos como: “*carbón negro, humo, aceite pirolítico, cenizas, Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP), bencenos, naftalenos, tolueno, etilbenceno, antraceno, tiazoles, dioxinas, furanos, aminas y otras formas diferentes de hidrocarburos de petróleo, compuestos orgánicos volátiles (COV), compuestos orgánicos semivolátiles, hidrocarburos aromáticos polinucleares (PAH), partículas, gases ácidos, sulfatos y muchos otros*”. Se tomaron muestras antes (blanco) y durante la quema de llantas usadas, para determinar la concentración de contaminantes como: Partículas Suspensas Totales (PST) con diámetros aerodinámicos menores a 10 μm (PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$), orgánicas volátiles y Orgánicas Semivolátiles, Material Particulado en Suspensión, Sulfuro de Hidrógeno (H_2S), Humo, Metales Pesados, Amoníaco (NH_3), Dióxido de Azufre (SO_2), Compuestos orgánicos volátiles y HAP. Para la obtención de datos sobre la concentración de contaminantes, se instalaron filtros para tomar muestras de aire en los techos de las edificaciones a 500 m de distancia del lugar de la quema de llantas usadas y a 15 m de altura sobre el nivel del suelo, fue necesario la toma de muestras en blanco como medidas de referencia del aire en el lugar, 24 horas antes de la quema de llantas usadas (Ziadat & Sood, 2014).

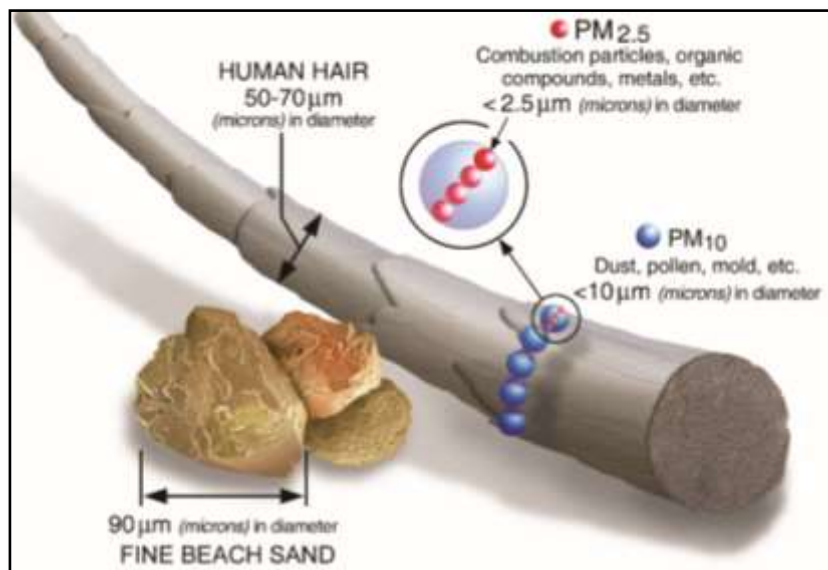
Los resultados obtenidos por el estudio, evidencian un impacto negativo que afecta significativamente la calidad del aire en el lugar de la quema de llantas usadas:

Material Particulado (PM₁₀)

La muestra en blanco tuvo una concentración de 40 $\mu\text{g m}^3$ en comparación con el muestreo realizado durante la quema de llantas usadas, cuya concentración media fue de 280 $\mu\text{g m}^3$, una concentración máxima de 370 $\mu\text{g m}^3$ y una concentración mínima de 160 $\mu\text{g m}^3$, excediendo los límites máximos permisibles determinados por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos de América, que recomienda una concentración máxima de 120 $\mu\text{g m}^3$ (Ziadat & Sood, 2014).

Figura 8

Tamaño cabello humano VS PM_{2.5} y PM₁₀



Fuente: Agencias de Protección Ambiental de los Estados Unidos, (2021)

La Organización Mundial de la Salud (OMS), recomienda que las concentraciones de PM_{2.5} en la atmosfera, no excedan los 10 $\mu\text{g m}^3$. La EPA establece que el límite de las concentraciones de PM_{2.5} en la atmosfera, no excedan los 12 $\mu\text{g m}^3$.

Humo

Durante la quema de llantas usadas, se generan grandes masas de humo, producto de la combustión incompleta. El humo, menos denso que el aire sube en forma de finas partículas sólidas hasta la atmosfera, ocasionando afectaciones a la salud humana y al medio ambiente. Los resultados obtenidos arrojaron una concentración media de 233,2 $\mu\text{g m}^3$ durante el día y una concentración media de 214 $\mu\text{g m}^3$ durante la noche (Ziadat & Sood, 2014).

Figura 9

Relación de la calidad del aire, concentración de PM

Parameters	PM ₁₀ conc. ($\mu\text{g m}^{-3}$)			Smoke conc. ($\mu\text{g m}^{-3}$)		
	Full day	Day	Night	Full day	Day	Night
Mean	280.0	158.0	95.0	138.2	233.2	183.0
\pm SD	84.1	14.5	24.4	60.1	35.6	29.0
Minimum	160.0	135.0	50.0	47.0	201.9	158.5
Maximum	370.0	179.0	124.0	220.0	279.0	214.0

Fuente: Ziadat & Sood, (2014)

La EPA categoriza los valores del índice de calidad del aire en una tabla, donde relaciona la calidad del aire con la concentración de material particulado (PM).

Figura 10

Índice de Calidad del Aire ICA

Categoría ICA	Valor ICA	Concentración PM Promedio en 24 Horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Buena	0 - 50	0 - 15.4
Moderada	51 - 100	15.5 - 40.4
Dañina para Personas Sensibles	101 - 150	40.5 - 65.4
Dañina	151 - 200	65.5 - 150.4
Muy Dañina	201 - 300	150.5 - 250.4
Peligrosa	301 - 500	250.5 - 500.4

Fuente: asianortheast, (2016)

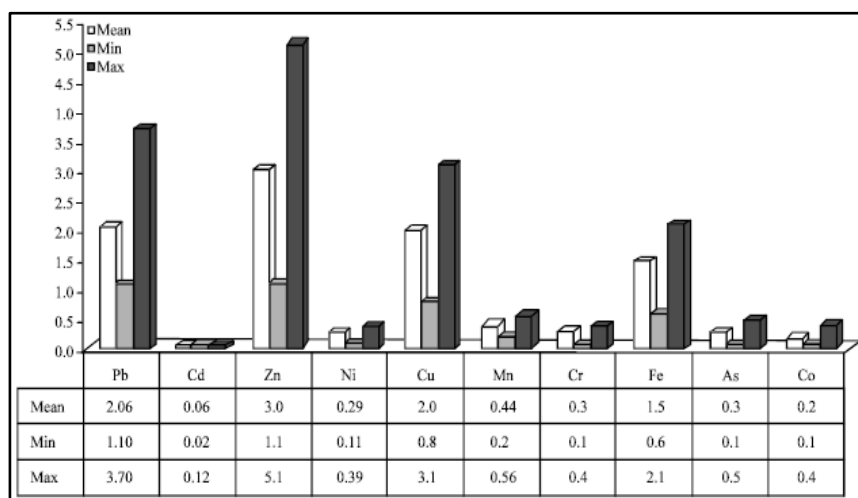
De acuerdo a los valores obtenidos de las muestras analizadas y el Índice de Calidad del Aire de la EPA, indica que la calidad del aire está en la categoría “peligrosa”, pues la media obtenida para la concentración de PM₁₀ tuvo una concentración de 280 $\mu\text{g m}^{-3}$, adicionalmente, la concentración media de humo alcanzo los 138,2 $\mu\text{g m}^{-3}$, ubicándose en la categoría como “dañina”.

Metales Pesados

Los resultados obtenidos indicaron altas concentraciones de zinc, plomo, cobre y hierro, excediendo los valores máximos permisibles, generando gran preocupación por su toxicidad y peligro para los ecosistemas y para la salud humana, cuyos efectos se describen en la tabla 3. En la figura 10, se muestran los valores mínimos, máximos y media de los metales pesados presentes en los muestreos realizados (Ziadat & Sood, 2014).

Figura 11

Concentraciones mínima, máxima y media de metales pesados



Fuente: Ziadat & Sood, (2014)

Gases

La concentración de Monóxido de carbono (CO) se consiguió utilizando un analizador de gases de combustión Testo 300XL, obteniendo resultados entre un rango de 7,3-10,3 ppm, excediendo los valores máximos establecidos por la EPA de 9,0 ppm durante 8 horas continuas. El amoníaco (NH₃), el sulfuro de hidrógeno (H₂S) y dióxido de azufre (SO₂) arrojaron valores por encima de lo establecido por la EPA, la concentración de amoníaco registro un rango de 57-210 µgm³ con una concentración promedio de 116

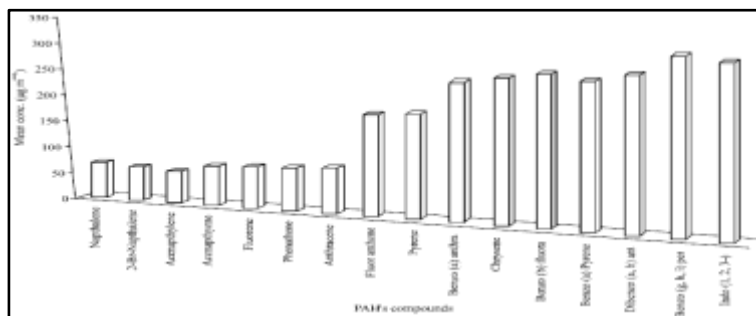
μgm^3 . La concentración de sulfuro de hidrógeno registro un rango de 34.0-250 μgm^3 con una concentración promedio de 149 μgm^3 . Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), concentraciones de sulfuro de hidrógeno en sitios no contaminados, no deben superar los 0,1 μgm^3 debido a su peligrosidad y letalidad. El dióxido de azufre (SO_2) estuvo en un rango de 2,3-188,7 μgm^3 , con una concentración media de 72,71 μgm^3 , según la EPA, las concentraciones de dióxido de azufre en sitios no contaminados, no debe superar los 60,0 μgm^3 . De acuerdo a los resultados obtenidos y lo establecido por la OMS, en cualquier lugar donde se produzca la quema de llantas usadas a cielo abierto se considera una atmosfera toxica y peligrosa para la salud humana y los ecosistemas (Ziadat & Sood, 2014).

Hidrocarburos aromáticos policiclicos (HAP) y Compuestos orgánicos volátiles

(COV`s). En total, fueron 16 HAP analizados en el laboratorio, obteniéndose una concentración total de todos los compuestos de 2918 $\mu\text{g m}^3$, alcanzando niveles altos y peligrosos para salud de las personas. Se analizaron cuatro COV`s (tolueno, benceno, etilbenceno y xileno), que alcanzaron altos niveles de concentración en la atmosfera del lugar de la quema de llantas usadas (Ziadat & Sood, 2014).

Figura 12

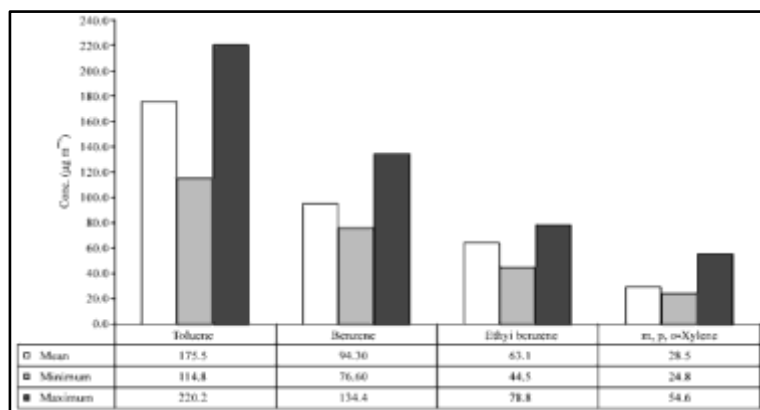
Concentraciones medias de HAP



Fuente: Ziadat & Sood, (2014)

Figura 13

Concentraciones mínima, máxima y media de COV's



Fuente: Ziadat & Sood, (2014)

Tabla 7

Valores mínimos, máximos y medios VS valores recomendados por la EPA

Contaminante	Valores Hallados ($\mu\text{g m}^3$)			Valores recomendados por la EPA ($\mu\text{g m}^3$)
	C. Min.	C. Med.	C. Max.	
Material particulado (PM_{10})	160	280	370	120
Humo	210	233,2	279	< 15,4
Metales pesados	4,23	10,16	17,37	<0,050
Amoniaco	57	116	210	< 34.7582
Sulfuro de hidrogeno	34	149	250	0,1 (según la OMS)
Dióxido De azufre (SO_2)	2,3	72,71	188,7	60,0
Monóxido de Carbono (CO)	7,3 ppm	-	10,3 ppm	9,0 ppm
Hidrocarburos aromáticos policiclicos (HAP)	-	-	2.918	-

Compuestos orgánicos volátiles (COV`s)	260,7	361,4	488	-
--	-------	-------	-----	---

Nota: comparación entre la concentración de contaminantes en el aire y lo recomendado por la EPA (Ziadat & Sood, 2014)

Afectaciones De Los Contaminantes Relacionados En La Tabla 7

Material Particulado MP

El material particulado de 2,5 μm y 10 μm , ingresan fácilmente al organismo, para ser precisos, al aparato respiratorio, depositándose en el tejido pulmonar, permaneciendo allí durante años o incorporándose al torrente sanguíneo las partículas solubles. La contaminación por MP se relaciona a una mayor mortalidad y morbilidad en humanos, puesto que, se han evidenciado efectos nocivos en la salud, tanto de niños, como adultos, como, por ejemplo, neumonía, tos, asma, bronquitis y enfermedades cardiovasculares (Onursal & Gautam, 1984).

De acuerdo a un estudio realizado a un grupo de mujeres entre los 70 y 89 años de edad, para determinar, si la exposición a $\text{PM}_{2,5}$ contribuía a la Atrofia Cerebral Progresiva, se evidencio que por cada $2,82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de aumento en las concentraciones de $\text{PM}_{2,5}$ se aumenta un 24% el riesgo de padecer atrofia cerebral y por consiguiente, de sufrir Alzheimer (Instituto para la Salud Geoambiental, 2020).

El MP puede obstruir la visibilidad, debido a que las partículas más finas se suspenden en la atmosfera, absorbiendo y dispersando la luz, el MP más denso se sedimenta en las aguas, suelos y estructuras, afectando los ecosistemas, calidad del agua y la calidad de vida de las personas (Onursal & Gautam, 1984).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (2021), indica que el MP puede ser transportado por las corrientes de aire y precipitarse en los suelos y cuerpos de agua, donde, puede ocasionar diferentes afectaciones dependiendo de su composición química, como,

por ejemplo, acidificación de las aguas, aporta a la lluvia acida, altera el balance nutricional de las aguas, reduce los nutrientes del suelo, afecta los bosques sensibles y afecta los cultivos agrícolas.

Amoníaco (NH_3)

La exposición a altas concentraciones y exposiciones agudas de amoníaco, puede generar, aumento de la presión sanguínea, bradicardia, fallas cardiacas, quemaduras en la piel, vomito, trombosis arterial, espasmo muscular, afectaciones en el hígado, problemas renales, visión borrosa y perdida de la conciencia (Gonzalo, 2016). El NH_3 , actúa como potenciador del óxido nítrico (NO) y óxido nitroso (N_2O) principales destructores de la capa ozono (Garzón & Cárdenas, 2013).

Sulfuro De Hidrógeno (H_2S)

El Sulfuro de Hidrogeno o Ácido Sulhídrico, es un gas con olor fuerte, inflamable e incoloro, en concentraciones altas, se vuelve imperceptible al olfato. Este gas, puede permanecer hasta 42 días en la atmosfera dependiendo de la estación del año. El H_2S , es venenoso en altas concentraciones, es soluble en agua por lo que puede transformarse en ácido sulfúrico, el cual es corrosivo y peligroso. La exposición de H_2S superiores a 500 ppm pueden provocar perdida de la conciencia, dificultad para respirar, irritación en los ojos, nariz y garganta, en algunas personas, quizá las más sensibles, puede provocar efectos permanentes, tales como, dolores de cabeza, pérdida de memoria y alteraciones de las funciones motoras (Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades, 2014).

Dióxido De Azufre (SO_2)

Es un gas no inflamable e incoloro, cuyo olor es fuerte y resulta irritante, puede durar en la atmosfera entre dos y cuatro horas hasta transformarse en iones sulfato o depositarse en la

superficie terrestre, es soluble en agua, por lo que lo convierte en uno de los gases más peligrosos, pues su contribución a la lluvia acida es significativa (Gobierno de España, 2021), acidifica las aguas, disminuye el crecimiento y daña el follaje de las plantas y afecta los ecosistemas (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2021). Durante su permanencia en la atmósfera, el SO_2 puede oxidarse en sulfatos, los cuales, son transportados en el material particulado respirable (PM_{10}), en presencia de humedad puede formar ácidos, los cuales son transportados por material particulado secundario. En concentraciones de $800 \mu\text{g}/\text{m}^3$ es dañino para los cultivos de trigo, avena, cebada y algodón, acidifica los suelos, corroe estructuras y monumentos (Onursal & Gautam, 1984).

El SO_2 afecta las mucosidades y pulmones, lo que provoca ataques de tos, causa irritación del tracto respiratorio, bronquitis, asma y congestión de los conductos bronquiales (Gobierno de España, 2021b). Una vez inhalado este peligroso gas, las mucosas se hidratan con la humedad, lo que representa un riesgo para la salud humana y otras especies animales, al producir constricción bronquial (Caraballo et al., 2019). Ya sea en sulfatos o ácidos, el SO_2 es sumamente peligroso para la salud de las personas, debido a la facilidad con la que penetra el sistema circulatorio, mediante las vías respiratorias (Zeledón, 2006).

La exposición durante 24 horas de SO_2 a una concentración de $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ puede provocar la muerte en humanos (Onursal & Gautam, 1984).

Monóxido De Carbono (CO)

El monóxido de carbono CO, es un gas sin olor e incoloro, altamente venenoso, puede causar la muerte si se inhala en altas concentraciones, es derivado por la combustión incompleta de hidrocarburos, cada año se registran aproximadamente 500 muertes y 15.000 afectados por envenenamiento por CO en los Estados Unidos. las personas que inhalan este peligroso gas

pueden experimentar síntomas como: dolor de cabeza, mareo, agotamiento físico, náuseas, irritabilidad, confusión, pérdida de conciencia, daños neurológicos, trastornos sensoriales y motores (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2021).

Este peligroso gas inflamable, puede reaccionar violentamente con el oxígeno, el cloro, el flúor, con óxidos de nitrógeno y el acetileno, provocando incendios más letales y peligrosos para la calidad del aire y la salud de las personas, ya que, provoca humos extremadamente tóxicos, contribuye también a la generación de ozono troposférico, pues sus átomos de oxígeno se pueden combinar con otros contaminantes para formar gas ozono, peligroso para la vida en la tierra (Gobierno de España, 2021a).

Dióxido De Carbono (CO₂)

El CO₂ es un gas sin olor e incoloro, no se considera un gas peligroso cuando se produce de forma natural y en concentraciones bajas, pero cuando se produce por actividades antrópicas y en concentraciones altas, resulta peligroso para la salud y el medio ambiente. El CO₂ desplaza el oxígeno cuando se encuentra en concentraciones superiores a los 30.000 ppm, lo que puede provocar asfixia, falta de concentración, dolores de cabeza, somnolencia, problemas respiratorios y mareo (Instituto para la Salud Geoambiental, 2013).

El CO₂ tiene la capacidad de persistir en la atmósfera y en los océanos por siglos, el incremento de la temperatura de la tierra a causa de los gases efecto invernadero, se debe en gran medida al CO₂, pues, se le atribuye más del 66% del aumento del forzamiento radiativo, es decir, *“la diferencia entre la luz solar absorbida por la tierra y la energía irradiada de vuelta al espacio”* (Naciones Unidas, 2020).

Se estima que hay tres trillones de toneladas de CO₂ en la atmósfera, lo que equivale a una concentración de 380 ppm, si se llegase a concentraciones de 450 ppm, se produciría un

aumento irreversible en la temperatura de la tierra. El CO₂ absorbido por los océanos, acidifica y modifica su composición química, afectando la vida marina, como, por ejemplo, los arrecifes coralinos, crustáceos y moluscos, además, los esqueletos y conchas de los caracoles marinos se podrían disolver si las aguas del océano son excesivamente ácidas. El aumento de la temperatura en la tierra tiene como consecuencias la subida del nivel del mar, debido al derretimiento de los glaciares, casquetes polares y las capas de hielo, asimismo, el calentamiento global causa el calentamiento de los océanos, produciendo que se expandan y por lo tanto aumente su nivel (Oceana Europe, n.d.).

Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)

Los HAP son capaces de provocar estrés oxidativo lo que afectaría a las biomacromoléculas celulares, como lípidos, proteínas y DNA, la proteína supresora de tumores es la que más se ve afectada con la exposición a HAP. Las afectaciones al DNA pueden provocar en el individuo mutaciones y riesgo de cáncer (Solá et al., 2018). Este grupo de sustancias, ingresan al organismo por las vías respiratorias y son absorbidos por los pulmones e intestinos, posteriormente son metabolizados en el organismo, poniendo en riesgo la salud de los individuos expuestos, ya que, son potencialmente causantes de cáncer y causantes de posibles alteraciones y cambios en la estructura genética (Onursal & Gautam, 1984).

Los HAP, reaccionan con los óxidos de nitrógeno, generando nuevos compuestos químicos. Algunos de los HAP son carcinógenos y el hecho de reaccionar con otras sustancias no disminuye esta característica, si no por el contrario, su efecto puede potencializarse y hacerse más peligroso para la salud pública (Gutiérrez, 2012).

Compuestos Orgánicos Volátiles (COV`S)

Los COV`s, son un grupo de compuestos químicos peligrosos que deterioran la calidad del aire y ponen en riesgo la salud de las personas, debido a su potencial toxicológico. Algunos COV`s, pueden causar enfermedades respiratorias, depresión del sistema nervioso central, afectaciones del sistema circulatorio y hasta cáncer (Arrieta, 2019).

Tabla 8

Propiedades cancerígenas de los COV`s

Clasificación US EPA (2009C)		Clasificación Agencia Internacional De Investigación Del Cáncer (IARC, 2020)	
A	Provoca cáncer en humanos.	1	Provoca cáncer en humanos.
B1	Es probable que cause cáncer en humanos.	2A	Probable cancerígeno en humanos.
B2	Es probable que cause cáncer en humanos, la evidencia es ilimitada para determinar que sea cancerígeno para animales.	2B	Probable cancerígeno en humanos.
C	Es probable que sea cancerígeno para humanos, según la evidencia.	3	No está clasificado como cancerígeno en humanos.
D	La evidencia no es suficiente para catalogarlo como cancerígeno para humanos.	4	Posiblemente en humanos, no es cancerígeno.
E	No es probable que sea cancerígeno para humanos.	-	-

Nota: La EPA y el IARC asignan un código a los COV`s de acuerdo a su potencial cancerígeno (Min. Ambiente, 2021)

Tabla 9*Efectos nocivos y propiedades carcinógenas de los COV's*

Compuesto	Efectos nocivos a la salud	Propiedades carcinogénicas	
		(U.S. EPA, 2009c)	(IARC, 2020)
Acrilonitrilo	Cancerígeno para los mamíferos. No hay pruebas suficientes que apoyen su carcinogenicidad en humanos.	B1	3
Benceno	Cancerígeno, hematotóxico y genotóxico. La exposición a concentraciones de 0.17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a lo largo de la vida, aumenta el riesgo de padecer cáncer	A	1
1,3-Butadieno	Causa irritación y efectos negativos sobre el sistema nervioso central.	A	1
Disulfuro de Carbono	Efectos adversos en los sistemas nerviosos central y periférico, así como en el sistema vascular. Límite de exposición (durante 24 horas): 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	-
Ciclohexano	Efectos adversos en animales, lo que puede provocar una disminución del peso de las generaciones continuas.	-	-
Cloruro de Vinilo	Riesgo de cáncer en humanos al	A	1

	exponerse a concentraciones de 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a lo largo de la vida.		
1,2-Dicloroetano	Puede provocar daños al sistema nervioso central en humanos y cáncer en animales.	-	2B
Diclorometano (Cloruro de Metileno)	Cancerígeno al estar expuesto por 24 horas a concentraciones de 3 mg/m^3 .	-	2B
Estireno	Genotóxico. Afecta negativamente al sistema nervioso central (disminución de la agudeza verbal y visual). No hay pruebas claras de que provoque cáncer en humanos. Barrera de exposición de 30 minutos: 70 mg/m^3 .	B2	2B
Etilbenceno	Tóxico para el desarrollo	-	2B
Formaldehído	Causa irritación de la garganta, nariz y ojos. Límite de exposición (30 min): 0.1 mg/m^3 .	B1	1
N-Hexano	Causa neuropatías periféricas.	D	-
I-Propilbenceno	Daños en el sistema renal en animales.	D	-
Tetracloroetileno	Daños en los sistemas urinario o nervioso central. No existen pruebas claras de que provoque cáncer en humanos. máximo de exposición: 0,25	B2	2A

	mg/m ³		
Tetracloruro de Carbono	Puede causar daños en riñones e hígado.	B2	2B
Tolueno	Daños en el sistema nervioso central, efectos adversos en el desarrollo del feto (poco peso al nacer, retraso del desarrollo y anomalías esqueléticas). Máximo de exposición: de 30 minutos 1mg/m ³ .	-	3
Triclorobenceno	En animales resulta ser cancerígeno y Genotóxico. Riesgo de padecer cáncer al estar expuesto a concentraciones de 2.3 µg/m ³ a lo largo de la vida.	B2	2A
Xilenos	Causan deterioro en la coordinación motora.	-	3

Nota: se muestran los efectos carcinogénicos de los COV's en mamíferos después de un terminado tiempo en exposición, (Min. Ambiente, 2021)

Gestión De Llantas Usadas En El Municipio De Villavicencio

En lo corrido del año 2016, la alcaldía de Villavicencio recolecto más de 9.000 llantas usadas, para ser evacuadas a municipios como Mosquera y Manizales, puesto que, en el municipio de Villavicencio habían dos plantas para el acopio y coprocesamiento de llantas usadas, pero, fueron cerrados por falta de apoyo municipal (EL TIEMPO, 2016).

En el año 2017, Bioagricola del Llano, la policía Nacional, Cormacarena y Secretaria de Infraestructura y Secretaria de Medio Ambiente de Villavicencio, realizaron una jornada para

recolección de llantas usadas, en donde se recolectaron 2.300 llantas de automóviles, motocicletas, bicicletas, buses y camiones. Las llantas se enviaron para la ciudad de Bogotá donde se les realizó la disposición adecuada (Noticias del Meta, 2017).

El Concejo Municipal de Villavicencio, expide el acuerdo N° 339 de 2017 *“POR MEDIO DEL CUAL SE DICTAN DISPOSICIONES QUE PERMITAN IMPLEMENTAR UN SISTEMA DE GESTIÓN AMBIENTAL Y RECOLECCIÓN SELECTIVA DE LLANTAS USADAS EN LA CIUDAD DE VILLAVICENCIO Y SE DICTAN OTRAS DISPOSICIONES”*, con el objeto de crear el programa de aprovechamiento y/o valorización de llantas usadas en la ciudad de Villavicencio, que busca asignar una serie de obligaciones a los productores, que distribuyan y comercialicen llantas, así como a consumidores, adicionalmente asignar obligaciones a los montallantas y a las autoridades municipales y ambientales. De este modo, se formulan una serie de prohibiciones, con el fin de garantizar una adecuada gestión de estos residuos (Concejo Municipal de Villavicencio, 2017).

En junio del 2018, el Min. Ambiente, la Secretaría de Medio Ambiente de Villavicencio y Cormacarena, recolectaron más de 35 toneladas de llantas usadas en coordinación con programas posconsumo, como Rueda Verde, reconocido a nivel nacional por su importante gestión y contribución con el adecuado manejo de llantas usadas (Velez, 2019).

Durante el año 2021, las fuerzas militares del departamento del Meta, junto con la Secretaria de Medio Ambiente, Bioagricola del Llano, Cámara de Comercio de Villavicencio, Cormacarena y la Red Nacional de Jóvenes de Ambiente, realizaron la recolección y acopio de 800 llantas usadas abandonadas en lugares públicos de los barrios, San Benito y Porvenir, sectores donde se evidencia considerablemente esta problemática (Comando General de las Fuerzas Militares, 2021). En agosto de este mismo año, se inaugura el primer centro de acopio de

llantas usadas en la ciudad de Villavicencio y todo el departamento del Meta, con una capacidad máxima de almacenamiento de 3.500 unidades. En este centro, liderado por Cormacarena, se hará acopio y almacenamiento temporal de llantas usadas de buses, motocicletas, bicicletas y automóviles, para posteriormente, entregarlas a los Sistema de Recolección Selectiva y a empresas que se dedican a la elaboración artesanal e industrial de nuevos productos a partir de la reutilización y transformación de llantas usadas (Llano Siete Dias, 2021). En diciembre de 2021, Cormacarena, la Gobernación del Meta, el Ejército Nacional y Bioagropecuaria del Llano, hacen la recolección de 500 llantas abandonadas en sitios públicos de la ciudad, las cuales, fueron llevadas al nuevo centro de acopio ubicado en el barrio San Benito (Aguilar, 2021).

En julio de 2022, Cormacarena, la Gobernación del Meta y Bioagropecuaria del Llano, hacen la recolección de 250 llantas en el barrio porvenir y sector bomberos, sitios que históricamente han sido escogidos por personas inescrupulosas para el abandono de llantas usadas. Las llantas recolectadas fueron llevadas al centro de acopio de Cormacarena (Cormacarena, 2022a).

La resolución 1326 de 2017, establece los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas para productores que importen, fabriquen y comercialicen llantas en Colombia, así como también, para los importadores, fabricantes y ensambladoras de vehículos. Las entidades deberán presentar ante la ANLA el Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas para su correspondiente apreciación y aprobación (ANLA, 2016).

Tabla 10

Sistemas de recolección selectiva de llantas usadas

Nombre del programa o empresa	Tipo de sistema	Nit	Cobertura	Expediente
-------------------------------	-----------------	-----	-----------	------------

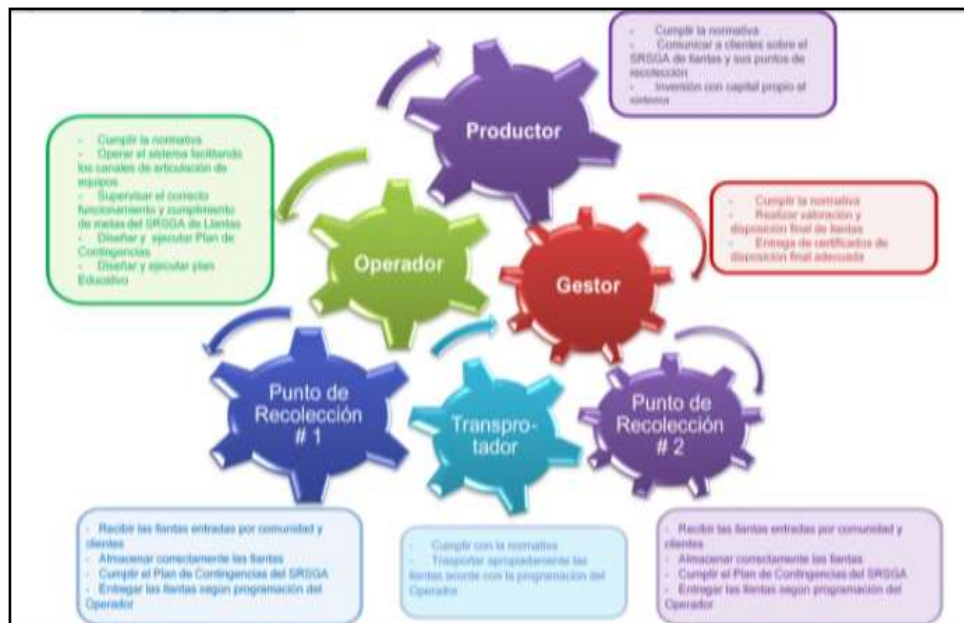
Corporación Posconsumo de llantas rueda verde	Colectivo	900690799	Departamento del Meta, Córdoba, Antioquia, Santander, caldas, Quindío, Valle del Cauca, Casanare, Boyacá, Cundinamarca, Huila y Nariño	SRS0001
Importadora de llantas especiales S.A.	Individual	830106854-0	Bogotá	SRS0006
Kenworth de la montaña S.A.S	Individual	800125639	Bogotá, Antioquia y Cali	SRS0055
Caribe limpio (electrocaribe LTDA - mundial de lubricantes LTDA)	Colectivo	806013276-6	Barranquilla, Cartagena	SRS0058
Distribuidora de rines y llantas - rinandres	Colectivo	800985121	Bogotá	SRS0076
Bus center sas (estrategia y logística S.A.S.)	Individual	900338759-8	Santa marta	SRS0102-00
Regigantes s.a.	Individual	890934641-9	Medellín, Rio Negro, Cali,	SRS0104-00
Green world recycling S.A.S.	Colectivo	9005738349	Atlántico, Bolivar, Magdalena, Cesar	SRS0106-00
Sistema verde S.A.S	Colectivo	900806086-8	Bogotá, Barranquilla, Bucaramanga, Cali, Cartagena, Ibagué, Medellín, Neiva, Villavicencio, Yopal	SRS0122-00
Comercializadora distrillantas	Individual	900398733-3	Duitama	SRS0124-00

Rjc ecogestiones S.A.S.	Colectivo	900883378-1	Barranquilla, Pereira, Bogotá, Manizales, Tuluá, Maicao, Cali	SRS0125-00
Llantas e importaciones sagu S.A.S.	Individual	800089111-4	Bogotá, Barranquilla	SRS0129-00
Cooperativa multiactiva wallancoop	Individual	900045527	Maicao, Manaure, Uribía	SRS0133-00
Interaseo ambiental	Colectivo	81900777	Armenia, Barranquilla, Soledad, Medellín, Envigado, Pereira, Ansema, Dosquebradas, Belén De Umbría, Marsella, Quimbaya, Manizales	SRS0145-00
Iexport sas	Individual	900065277-7	Medellín	SRS0146-00
Comercializadora de insumos para el transporte LTDA	Individual	800150414-0	Bogotá	SRS0149-00

Nota: Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA Información actualizada a enero de 2019

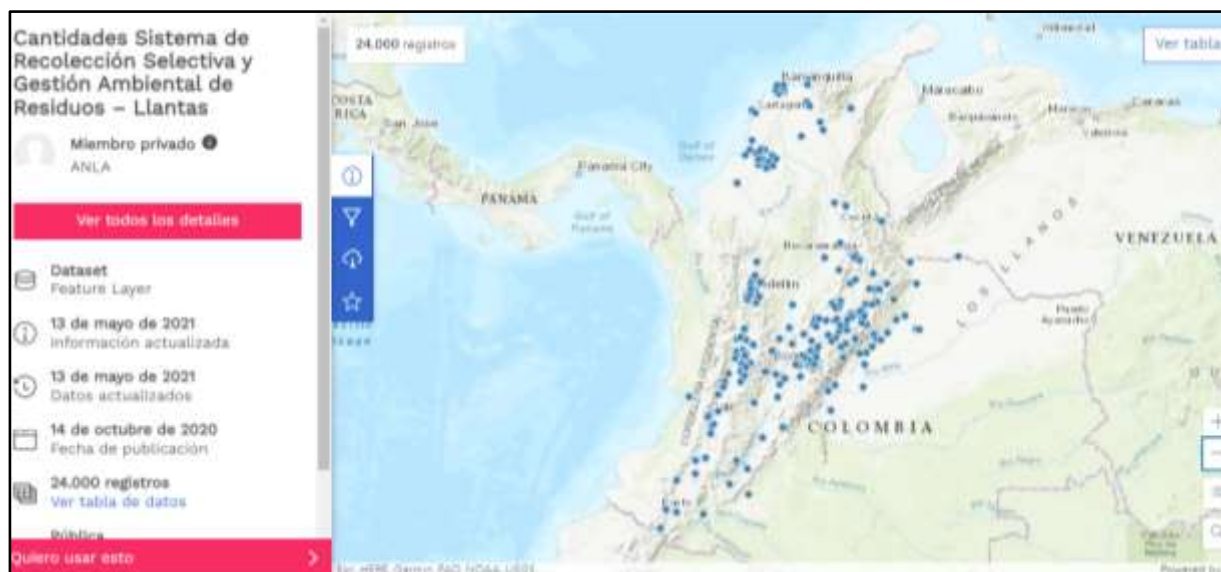
Figura 14

Organigrama de un Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas



Fuente: (ANLA, 2016)

El sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC), tiene a disposición, un portal de datos abiertos del sector ambiente, que proporciona información estatal, real y transparente a todas las personas interesadas en acceder a datos ambientales actualizados y confiables de nuestro país. Los programas e instituciones que hacen parte del Sistema Nacional Ambiental (SINA) son los únicos que pueden ingresar sus datos ambientales en diferentes formatos. Es así como la ANLA, a dispuesto una serie de datos abiertos en un mapa cartográfico, que muestra la cantidad de Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas en el territorio colombiano.

Figura 15*Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas en Colombia*

Fuente: (SIAC, 2021)

Un Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas, es una herramienta que contiene los requisitos y condiciones para garantizar la recolección selectiva, gestión ambiental y el aprovechamiento y/o valorización de llantas usadas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

En la ciudad de Villavicencio, programas de posconsumo, como SISTEMA VERDE S.A.S, brinda a los fabricantes, importadores y comercializadores de llantas, un Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas, por medio de su aliado ELIGELLANTAS, facilita a los consumidores, hacer la devolución totalmente gratis en su centro de acopio ubicado en la Carrera 48 # 28 - 14 sur Av. Barrio Montecarlo. En el momento oportuno, SISTEMA VERDE S.A.S recolecta, transporta y convierte las llantas usadas en combustible alternativo. Esta organización, gestiona adecuadamente y da valor a las llantas usadas empleándolas como combustible TDF (combustible derivado de neumáticos), por sus

siglas en inglés, contribuyendo a la valoración energética de empresas colombianas productoras de cemento.

RUEDA VERDE, es otra organización reconocida a nivel nacional, que cuenta con un Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas, ha participado en jornadas públicas de recolección, programadas por la alcaldía de Villavicencio y Cormacarena, actualmente no cuentan con un lugar destinado para el acopio de llantas usadas en la ciudad de Villavicencio, aunque si está vinculada con empresas que comercializan llantas, como es el caso de almacenes Alkosto.

La resolución 1326 de 2017, no es tan radical para algunos productores de llantas e importadores, fabricantes y ensambladoras de vehículos, puesto que, la norma los obliga a formular, presentar e implementar los Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas cuando produzcan las cantidades mínimas de llantas al año que se indican en las tablas 11 y 12. Lo que deja en la norma un gran vacío, pues los productores de llantas que comercialicen menos del umbral establecido en la resolución 1326 de 2017, no están en la obligación de implementar un Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas, por lo que la problemática que genera la inadecuada disposición de llantas usadas, está lejos de terminar.

Tabla 11

Umbral de llantas fabricadas y/o comercializadas al año

Tipo de llantas	Cantidad mínima de llantas / año
Bicicletas	200
Motocicletas, motocicletos, ciclomotores o moped	200
Automóviles	150

Camionetas y microbuses	100
Busetas, buses y camiones	50
Tractomulas, buses troncales del sistema de transporte masivo	50
Llantas de vehículos fuera de carretera	5

Nota: El umbral que deben alcanzar los productores de llantas para implementar un Sistema de Recolección Selectiva, (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenibl, 2017.)

Para los fabricantes, importadores y ensambladores de vehículos, las siguientes cantidades:

Tabla 12

Umbral de vehículos importados, fabricados y/o ensamblados al año

Tipo de vehículo	Cantidad mínima de vehículos / año
Bicicletas	100
Motocicletas, motociclos, ciclomotores o moped	100
Automóviles	40
Microbuses y camionetas	20
Buses, camiones y busetas	10
Buses troncales y tractomulas del sistema de transporte masivo	5
Vehículos fuera de carretera	3

Nota: El umbral que deben alcanzar los productores de vehículos para implementar un Sistema de Recolección Selectiva, (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenibl, 2017.)

La resolución 1326 de 2017, a demás establece, que los productores de llantas deben cumplir con unas metas anuales de recolección selectiva de llantas usadas.

Tabla 13

Metas anuales de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas de vehículos tipo camiones, automóviles, busetas, camionetas, tractomulas y buses

Periodo base para el cálculo de la meta (años fiscales)	Periodo de recolección (año fiscal)	Año de presentación de informe de actualización y avances	Meta de recolección selectiva y gestión ambiental mínima (%)
2015 – 2016	2017	2018	45
2016 - 2017	2018	2019	50
2017- 2018	2019	2020	55
2018 – 2019	2020	2021	60
2019 - 2020	2021	2022	65
2020 – 2021	2022	2023	70
2021 - 2022	2023	2024	75
2022 – 2023	2024	2025	80

Nota: los productores de llantas deben cumplir con metas anuales de Recolección Selectiva de llantas usadas (Min. Ambiente, 2017)

Tabla 14

Metas anuales de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas de vehículos tipo ciclomotores, motocicletas, bicicletas, motociclos, moped y llantas de vehículos fuera de carretera

Periodo base para el cálculo de la meta (años fiscales)	Periodo de recolección (año fiscal)	Año de presentación de informe de actualización y	Meta de recolección selectiva y gestión ambiental mínima (%)
		de informe de actualización y	

avances			
2017- 2018	2019	2020	20
2018 – 2019	2020	2021	25
2019 - 2020	2021	2022	30
2020 – 2021	2022	2023	35
2021 - 2022	2023	2024	40
2022 – 2023	2024	2025	45
2023 – 2024	2025	2026	50
2024 – 2025	2026	2027	55
2025 – 2026	2027	2028	60
2026 - 2027	2028	2029	65

Nota: los productores de llantas deben cumplir con metas anuales de Recolección Selectiva de llantas usadas (Min. Ambiente, 2017)

En el párrafo 1, del artículo 13, de la resolución 1326 de 2017, indica, que la cantidad de llantas usadas que los productores deben recolectar y gestionar adecuadamente, se calcula sobre la base del promedio de las llantas puestas por el productor en el mercado en los dos años anteriores al periodo de recolección.

Marco Legal

En la tabla 15, se relaciona la normatividad ambiental colombiana, para la conservación y prevención de los recursos naturales, para garantizar un medio ambiente sano y de calidad y también la normatividad específica sobre la gestión y aprovechamiento de las llantas usadas.

Tabla 15

Normatividad ambiental

Norma	Descripción
Constitución Política de Colombia, 1991	<p><i>“Normas para fortalecer la unidad de la Nación y asegurar a sus integrantes la vida, la convivencia, el trabajo, la justicia, la igualdad, el conocimiento, la libertad y la paz, dentro de un marco jurídico, democrático y participativo que garantice un orden político, económico y social justo. En los artículos 78 y 79, la ley regula el control de calidad de bienes y servicios ofrecidos y prestados a la comunidad, así como también garantiza el derecho a gozar de un ambiente sano, protegiendo la diversidad e integridad del medio ambiente”.</i></p>
Decreto Ley 2811 de 1974	<p>Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. <i>“En los artículos 34, 35 y 36: En cuanto al manejo de los residuos y desechos, la prohibición de la descarga sin autorización de los mismos y la reutilización de sus componentes evitando el deterioro del ambiente y la salud humana”.</i></p>
Ley 99 de 1993	<p><i>“Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA. En el artículo 66: Dispone que las autoridades municipales, distritales o metropolitanas tendrán la responsabilidad de efectuar el control de vertimientos y emisiones contaminantes, disposición de desechos sólidos y de residuos tóxicos y peligrosos, dictar las medidas de corrección o mitigación de daños ambientales y adelantar proyectos de saneamiento y descontaminación”.</i></p>
Resolución 1457 de 2010	<p><i>“Por la cual se establecen los sistemas de recolección selectiva, y Gestión Ambiental de llantas usadas. Tiene por objeto establecer a cargo de los productores de llantas que se comercializan en el país, la obligación de formular, presentar</i></p>

e implementar los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas, con el propósito de prevenir y controlar la degradación del ambiente”.

Resolución 1326 de 2017

Deroga la resolución 1457 de 2010. *“Establece que a partir de 2019 deberán adaptarse a la meta de recolección y gestión ambiental otros vehículos (bicicletas, motocicletas, motociclos, ciclomotor, moped y llantas fuera de carretera)”.*

Ley 1801 de 2016

Código Nacional De Seguridad Y Convivencia Ciudadana – CNSCC. *“Es el instrumento normativo con el que cuentan todos los habitantes en el territorio colombiano y las autoridades, para corregir y prevenir de forma oportuna los comportamientos que afectan la sana convivencia. Artículo 102. Comportamientos que afectan el aire. Los siguientes comportamientos afectan el aire y por lo tanto no se deben efectuar:*

- 1. Realizar quemas de cualquier clase salvo las que de acuerdo con la normatividad ambiental estén autorizadas.*
- 2. Emitir contaminantes a la atmósfera que afecten la convivencia”.*

Acuerdo 339 de 2017

“Por medio del cual se dictan disposiciones que permitan implementar un sistema de gestión ambiental y recolección selectiva de llantas usadas en la ciudad de Villavicencio y se dictan otras disposiciones”

Tiene como objeto: *“crear el programa de aprovechamiento y/o valorización de llantas usadas en la ciudad de Villavicencio”.*

Nota: la normatividad ambiental respalda el adecuado manejo a residuos sólidos y a las llantas usadas, (Vera, 2016)

Alternativas para la Adecuada Gestión de Llantas Usadas

El artículo 12, de la resolución 1326 de 2017, establece que las llantas usadas se podrán aprovechar en actividades como; mobiliarios urbanos, jarillones y tuberías, construcción de taludes, construcción de vías urbanas como asfalto modificado, canchas sintéticas, valorización energética, pirolisis, gasificación y demás actividades que sean ambientalmente sostenibles.

El agotamiento de las reservas de combustibles fósiles y la necesidad de eliminar estos residuos no biodegradables, han impulsado investigaciones sobre el potencial energético que poseen los residuos de llantas, así como su potencial en materias primas para la fabricación de nuevos productos (Morante, 2016).

Coprocesamiento

El coprocesamiento de llantas usadas, es el aprovechamiento de estas, como combustible alternativo, altamente empleado por la industria cementera en distintos lugares del planeta. La industria cementera, hace uso de combustibles fósiles, como carbón de alta calidad para la producción de cemento, se requieren 150.000 toneladas de carbón de alta calidad para producir 1 megatonelada (Mt) de Clínker, principal componente del cemento Portland. Las llantas usadas y el carbón, ofrecen el mismo poder calórico, su contenido energético es de 25-30% Mj/t. Las llantas, pueden llegar a sustituir el carbón hasta en un 25%. Las llantas usadas como combustible alternativo en hornos de cemento, se han empleado desde hace décadas en países de Europa, concretamente, en el año 1997 se emplearon el 16% del total de llantas usadas para su aprovechamiento energético, equivalentes a 410 kilotoneladas (Kt), desde el 2001 cerca del 23% de llantas usadas son sustituidas por carbón en la industria cementera en países de Europa (Bogotá, 2006).

El caucho natural y sintético de las llantas usadas, es incinerado completamente, sin dejar cenizas, debido a las temperaturas que superan los 1.200 °C, el acero que hace parte de la carcasa, se incorpora a la estructura de los minerales del Clinker (Bogota, 2006).

La empresa de cemento del grupo Argos, cuenta con una planta en Cartagena y Rioclaro para el coprocesamiento de llantas usadas, empleadas como combustible alternativo en el proceso de producción, con capacidad de aprovechar hasta 65.000 toneladas anuales, lo que es equivalente a 4,5 millones de llantas, es decir, más del 40% de llantas usadas generadas en Colombia, se podrían emplear como combustible alternativo en las plantas de Cartagena y Rioclaro, aportando considerablemente a la gestión adecuada de llantas usadas. La incineración controlada, es una alternativa eficaz para la gestión adecuada de llantas usadas, puesto que, sustituye el uso de combustibles fósiles, gracias al aprovechamiento energía que ofrecen las llantas usadas. Los hornos cementeros destruyen por completo los componentes tóxicos, a la vez que limpian los gases y aseguran un sistema de filtrado adecuado para el control de emisiones atmosféricas. El Min. Ambiente, avala el uso de llantas usadas como combustible alternativo, como una actividad sostenible. (Argos, 2019).

El coprocesamiento hace parte de la economía circular, mediante la recuperación de su contenido energético, pero es indispensable que se haga de manera controlada y que durante la combustión de llantas usadas, no se emitan gases tóxicos a la atmosfera, de acuerdo a que, en el año 2016 la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC) concluyo que, existe suficiente evidencia sobre la carcinogenicidad en humanos y animales de experimentación debido a la contaminación atmosférica exterior, esta puede causar cáncer de pulmón, y además se ha observado que existe relación entre la exposición a contaminación atmosférica exterior y

desarrollar cáncer de vejiga urinaria (IARC, 2016). En base a la evidencia, se clasifica la contaminación atmosférica exterior como cancerígena para humanos.

Pirolisis

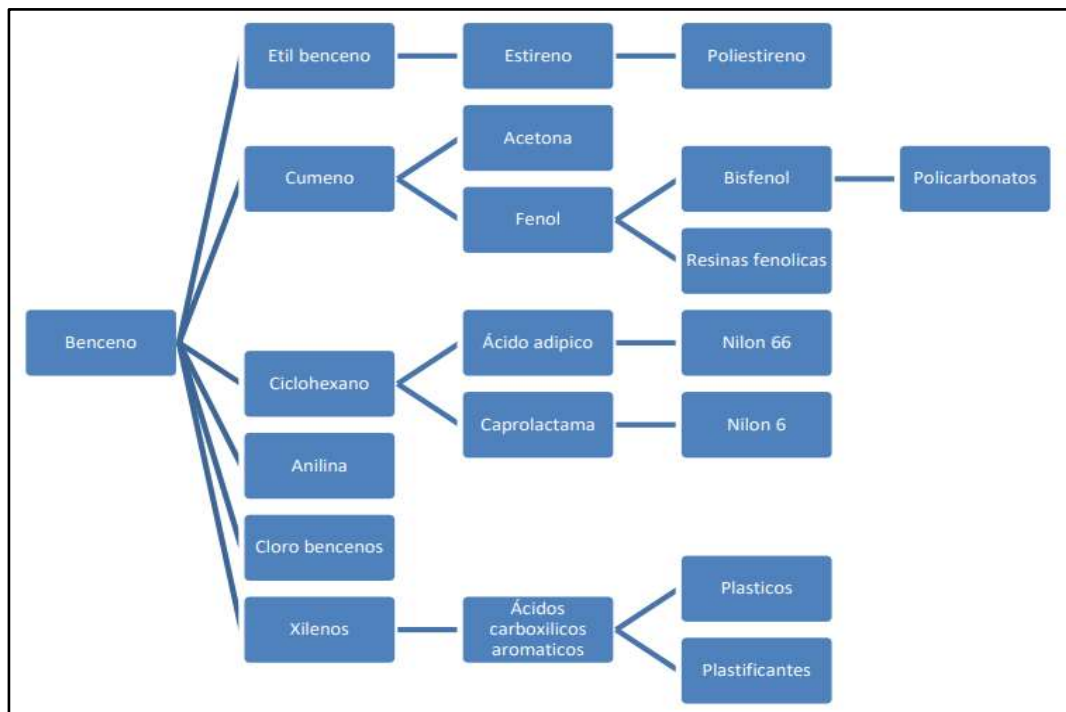
La pirolisis es un tratamiento térmico que se realiza en ausencia de oxígeno, donde se produce una descomposición molecular, que permite obtener de las llantas usadas, combustibles líquidos, sólidos y gaseosos con un alto valor calórico (42 MJ / Kg). Los aceites obtenidos durante el proceso, se pueden aprovechar como materia prima para la refinería del petróleo y productos químicos o como combustibles; el gas obtenido se puede emplear como energía para el mismo proceso de pirolisis (Ospina & Villada, 2011) y el producto sólido, puede ser utilizado para la producción de carbón activado o como combustible. Se requiere de personal altamente calificado, laboratorio y equipos especializados para dar lugar a una serie de reacciones químicas y procesos de intercambio de calor y masa para llevar a cabo esta tecnología (Martínez, 2006).

Durante la degradación, producto de la pirolisis, se producen tres etapas o zonas de descomposición térmica, en donde cada momento la temperatura varía en función del sustrato presente, es decir, que entre los 100 - 270 °C, en la primera etapa, las partículas se secan y los aditivos son degradados, en la segunda etapa, cuya temperatura oscila entre los 270 – 350 °C, se produce la descomposición del caucho natural y la tercera etapa en la que la temperatura oscila los 350 – 450 °C, se produce la descomposición del caucho sintético, que es la mezcla de estireno-butadieno y caucho butadieno. Los líquidos pirolíticos, necesitan de un tratamiento previo, puesto que, tienen propiedades que imposibilitan el uso directamente como combustible diésel para vehículos, ya que, generalmente, pueden presentar un elevado contenido de agua, oxígeno y acidez. El tratamiento consiste en: decantación, centrifugación, filtración, desulfuración e hidrotratamiento, aunque si se desea emplear como combustible en hornos

industriales, calderas y plantas de energía, no requeriría de un tratamiento previo (Andhini et al., 2017). Los líquidos pirolíticos tienen la ventaja de ser transformados en una gran variedad de productos para la industria química, como se puede observar en la figura 15.

Figura 16

Productos químicos derivados de la fase líquida de la pirolisis de llantas usadas



Fuente: (Angarita & Pérez, 2016)

Los gases obtenidos en la pirolisis son: metano, monóxido de carbono, hidrógeno, dióxido de carbono, propano, etileno, etano, sulfuro de hidrógeno y propileno, de los cuales el hidrogeno es el más prometedor, debido a su potencial energético de mayor eficiencia y su potencial en diversas aplicaciones (Angarita Bonilla & Pérez Riesgo, 2016).

Artisanal

Existen artesanos y empresas dedicadas a crear diferentes obras de arte con las llantas usadas, como es el caso de UpcycleMo, una empresa ubicada al Sur de Marruecos, que se dedica

a la elaboración de mobiliario, bolsos y accesorios, empleando las llantas usadas como materia prima. Los bolsos tienen un costo alrededor de los €95.00, una mesa de centro cuesta €750.00 y una extensa gama de productos elaborados 100% de caucho reciclado de llantas y productos elaborados con la adhesión de otros materiales para hacerlos más atractivos (UpcycleMo, S.F.).

Figura 17

Elaboración de bolsos a partir de llantas usadas de la empresa UpcycleMo



Fuente: (UpcycleMo, 2022)

Figura 18

Mesas elaboradas con llantas usadas con adhesión de madera de la empresa UpcycleMo



Fuente: (UpcycleMo, 2022)

Figura 19

Accesorios elaborados con llantas usadas de la empresa UpcycleMo. A.



Fuente: (UpcycleMo, 2022)

En la ciudad de Bogotá, la fundación Trec Art construyen obras reciclando las llantas usadas. Lo que inicio como un emprendimiento, se convirtió en un proyecto con carácter social, ambiental y económico. La Organización de Estados Iberoamericanos (OEI) y el Instituto Distrital de la Participación y Acción Comunal (IDPAC), le han dado el reconocido a esta fundación, de ser un proyecto líder en Bogotá por su importancia socioambiental. La fundación Trec Art, ha fabricado dos Ecoparques para el disfrute de los niños en la ciudad de Bogotá y por medio de su página web comercializa sus artesanías hechas con llantas usadas (Semana, 2017).

Cormacarena dona las llantas usadas a artesanos y/o fundaciones que se dedican a elaborar y comercializar artesanías como sustento para sus hogares. Para hacer efectiva la donación, los interesados deben diligenciar un formulario en el que declaran que el uso que se les darán a las llantas usadas será amigable con el medio ambiente, puesto que, Cormacarena hará un seguimiento para constatar que estos residuos no terminen en espacios públicos (Cormacarena, 2022b).

En la ciudad de Villavicencio, se construyó el primer corral para ganado con llantas usadas. Esta iniciativa nace como un proyecto que busca dar un segundo uso y una gestión adecuada a las llantas usadas generadas por el parque automotor en Villavicencio. Cormacarena en convenio con el Comité de Ganaderos del Meta, construyeron este corral en el parque las malocas y se pretende, que los ganaderos del Meta, fabriquen los corrales con llantas usadas y así

contribuir al uso mínimo de recursos naturales, mitigación de impactos ambientales y ganadería sostenible (Periodico del Meta, 2017).

Figura 20

Primer corral en Villavicencio construido con llantas usadas



Fuente: (Periódico del Meta, 2017)

La creación de artesanías con llantas usadas, no solo contribuye a la mitigación de impactos ambientales que produce su inadecuada gestión, sino que es el sustento de cientos de familias, que ven una forma de obtener ingresos económicos para el mantenimiento de sus hogares. Bucaramanga, Piedecuesta, Puerto Berrio y hasta en el Salvador y otros países, artesanos se dedican a fabricar obras de arte, accesorios, muebles y otros productos con llantas usadas.

Edkollantas, es una empresa llanera que opera en la ciudad de Villavicencio y se dedica a la transformación de llantas usadas en muebles, encerados, materas, entre otros. Desde el año 2014 que inicio con esta actividad, con el fin de reincorporar las llantas usadas en un nuevo ciclo de uso para contribuir con la mitigación de la degradación ambiental en nuestra ciudad (Cormacarena, S.F.).

En el barrio trece de mayo de la ciudad de Villavicencio, la señora Rosa Montoya, fundadora de la asociación “Llantrece”, halló en las llantas usadas, una oportunidad económica que le permitiera ayudar a su familia. La señora Rosa Montoya, quien, además es lideresa social, fue acreedora del premio al mejor negocio de reciclaje de la ciudad de Villavicencio por parte del Ministerio de Ambiente, gracias a su proyecto de reciclaje de llantas usadas, las cuales, transforma en muebles y otras obras de arte. Gracias a una alianza estratégica con algunos talleres y montallantas de la ciudad, la señora Rosa Montoya, recoge las llantas usadas y las traslada hasta su lugar de trabajo, para posteriormente darles un valor agregado a la vez que contribuye con la gestión integral de este residuo (Huertas, 2020).

En el Tolima, la empresa BioArt, desde el 2017, contribuye a la mitigación de impactos ambientales mediante el arte, pues, desde que el proyecto inicio, se han implementado más de 5 mil llantas usadas para fabricar artesanías (Tolima Buenos Dias, 2020).

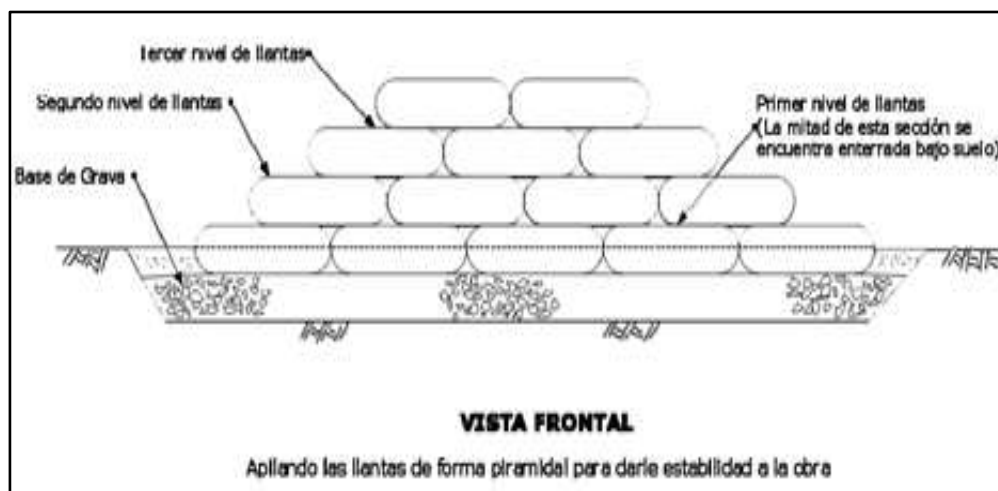
Construcción de Barreras y Muros de Contención

La estabilidad de taludes con llantas usadas, se convierte en una alternativa que contribuye a la solución de los deslizamientos, derrumbes y desprendimientos de suelo, producto de la erosión y/o alteración de los suelos, también por las intensas precipitaciones en época de invierno. Para ello, se creó la “Guía de la Construcción del muro de contención, con llantas usadas (Muro de Protección de Pendiente)” como parte del Proyecto BOSAI de JICA. El proyecto se ejecutó en la escuela primaria Emmanuel en la colonia “La Canaán” de la ciudad de Tegucigalpa en Honduras. Esta guía, aunque sencilla, es ciertamente útil, cuando se pretende hallar una solución a los deslizamientos de terrenos con pendientes inestables, empleando llantas usadas con otros materiales como, cemento, rocas, varillas, madera, entre otros, dependiendo de la proporción del muro de contención que se desea construir.

En la “Guía de la Construcción del muro de contención, con llantas usadas (Muro de Protección de Pendiente)”, se explica el diseño, la ejecución y el mantenimiento del muro de contención construido con llantas usadas en la escuela primaria Emmanuel en la colonia “La Canaán” de la ciudad de Tegucigalpa en Honduras.

Figura 21

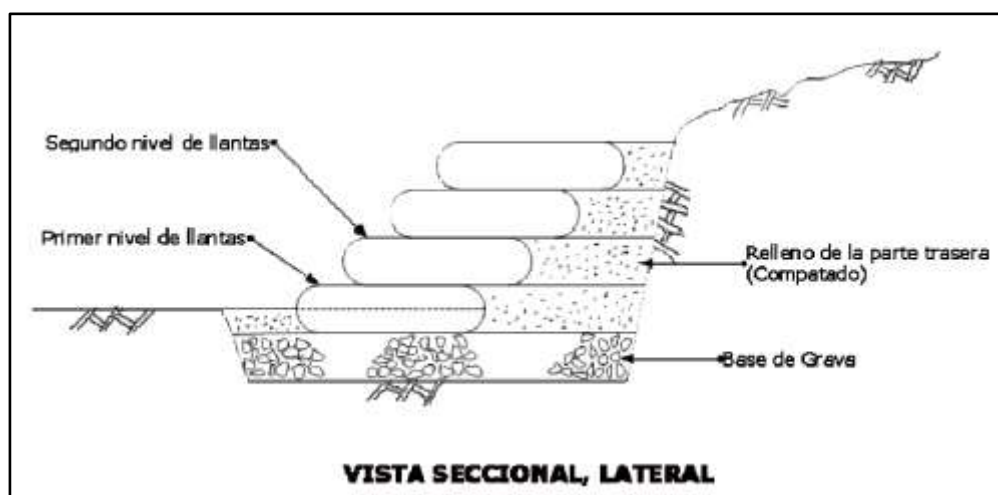
Vista frontal del muro de contención construido con llantas usadas



Fuente: (Escuela Primaria Emmanuel, 2010)

Figura 22

Vista lateral del muro de contención construido con llantas usadas



Fuente: (Escuela Primaria Emmanuel, 2010)

Figura 23

Antes y después de la construcción del muro de contención con llantas usadas



Fuente: (Escuela Primaria Emmanuel, 2010)

La empresa mexicana, Yantek, construye muros de contención para estabilizar taludes y prevenir derrumbes en el estado de Baja California. El proceso consiste en cortar las caras laterales de las llantas, se da vuelta hacia adentro y se une, de tal forma, que se asemeje a un número 8 (figura 23), posteriormente se unen una sobre otra para conformar lo que se conoce como tapete.

Figura 24

Unión de llantas cortadas previo a la construcción del muro de contención



Fuente: (El sol de Tijuana, 2020)

Los laterales de las llantas, se usan para reforzar la parte posterior del muro de contención. Los tapetes se ubican a lo ancho de la ladera, se rellenan de tierra, se compacta y se pone el siguiente tapete uno sobre otro, conformando filas. El proceso se repite una y otra vez, tanto como sea posible. Cada hilera, está ubicada 5 cm aproximadamente más atrás de la que está debajo, con el fin de otorgar más resistencia al muro de contención y empuje contrario al terreno inestable. Esta tecnología, es supremamente eficiente, puesto que, es más flexible, tiene capacidad de drenar el agua, su base es más amplia, es más estético debido a que en sus espacios posibilita la siembra de plantas, ofreciendo un espacio más verde y natural (Barros et al., 2019).

Figura 25

Muro de contención construido por la empresa mexicana Yantek



Fuente: (Barros et al., 2019)

En Olopa, Chiquimula, el Guatemalteco y ambientalista Yovanni Guevara, construyó el muro de contención que hasta el momento es el más grande del planeta tierra. La iniciativa nace, desde la necesidad de estabilizar una ladera que se ubica en terreno de su propiedad, que con el tiempo y por el río que la ha ido consumiendo se convirtió en un riesgo inminente. En el año

2013 empezó instalando las primeras llantas usadas, y hasta la fecha, ya ha instalado cerca de 30 mil llantas usadas. Yovanni Guevara cuenta a los medios de comunicación, que antes de construir el muro de contención con llantas usadas, era imposible cultivar alimentos en esa zona, debido a la topografía e inestabilidad del terreno, pero ahora que se construyó el muro, es posible cultivar maíz, girasoles entre otras cosas en el centro de las llantas. El proyecto ha generado tanto impacto, que ha sido premiado en el festival de sostenibilidad más importante de la región latinoamericana, “Premios Latinoamérica Verde” (García, 2019).

Figura 26

Muro de contención más grande del planeta, “EcoMuro”



Fuente: (García, 2019)

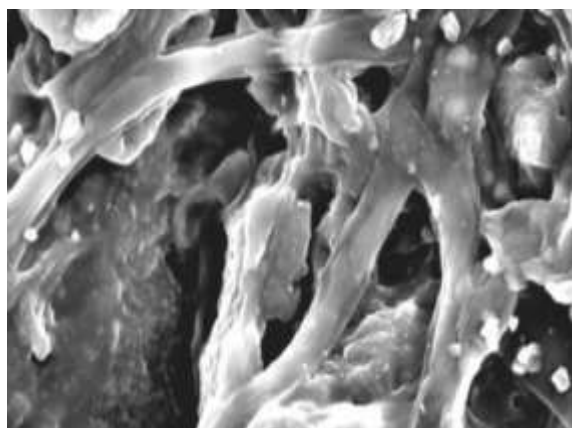
Degradación Microbiana

Una patente de invención sobre el “*Procedimiento de biodegradación fúngica de triturado de neumáticos*”, por inventores de la Universidad Politécnica de Madrid, España, llevan a cabo la degradación de cauchos naturales y/o vulcanizados, utilizando hongos para el tratamiento, consiguiendo con éxito la degradación de un triturado heterogéneo de llantas usadas por medio del hongo *Paecilomyces lilacinus* IMI 117109. El procedimiento consiste en; realizar un lavado del triturado de llanta usadas, en condiciones que garanticen la esterilización completa del material, pues se deben eliminar, restos orgánicos y microorganismos contaminantes, posteriormente, se cultiva el hongo en un medio líquido con sales minerales y con el caucho triturado de llantas usadas, el cual es el sustrato necesario para el crecimiento del hongo y que corresponde además a la única fuente de carbono. Inmediatamente, la preparación se incubaba a una temperatura de 25°C por una semana, después el sustrato se extrae del medio líquido y se incubaba por una semana más en cajas de Petri. Transcurrido el tiempo de incubación, se evidencia un desarrollo del micelio del hongo sobre el caucho triturado y una observación más detallada, por medio de un microscopio electrónico de barrido, se pudo apreciar las hifas del hongo en su crecimiento (Ruibal Villaseñor et al., 2008).

Un proyecto realizado por N. Ramírez & Teheran J. de la Universidad de San Buenaventura, Cartagena, Colombia, evaluó el potencial tolerante y biodegradable en el caucho de llantas usadas del hongo *Pleurotus Ostreatus* conocido como hongo de podredumbre blanca. Posterior a la siembra e incubación por 40 días del hongo en medio agar Sabouraud y polvo del caucho de llantas usadas. Se caracterizó la morfología del hongo macro y microscópicamente (figura 26), (N. Ramírez & Teheran, 2017).

Figura 27

Estructura microscópica del hongo

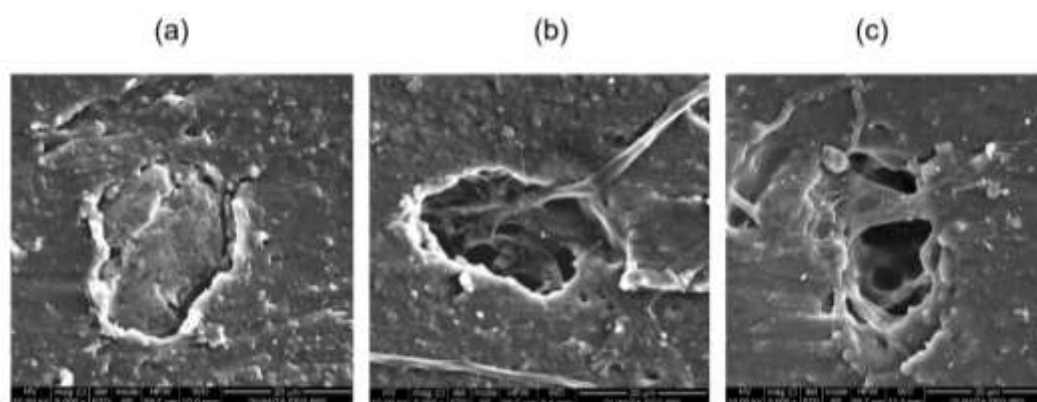


Fuente: (Ramírez & Teheran 2017)

Se realizó una inspección microscópica de los cambios físicos del caucho de llantas usadas, posterior a los 40 días de incubación, con el fin de determinar la biodegradación del hongo sobre el caucho (figura 27). Los autores, además, advierten que, pasados los 40 días de incubación, el hongo sigue generando el proceso biodegradativo sobre el caucho de llantas usadas.

Figura 28

Análisis microscópico de la biodegradación del hongo Pleurotus Ostreatus sobre el caucho de llantas usadas



Fuente: (Ramírez & Teheran 2017)

En la figura 28, se observan los cambios de la biodegradación del hongo *Pleurotus Ostreatus* sobre el caucho de llantas usadas, al cabo de 0 días (a), 16 días (b) y 40 días (c); evidenciándose la acción enzimática del hongo sobre el rompimiento de los puentes de azufre enlazados a las moléculas del caucho.

Los microorganismos producen enzimas y radicales libres que rompen las moléculas poliméricas, lo que disminuye gradualmente su peso molecular, generando oligómeros, dímeros y monómeros que entran en la célula y son empleados como fuente de energía (Gómez, 2019).

La degradación microbiana, también puede ser aplicable empleando otros microorganismos distintos a los hongos, como bacterias, desde luego que deben tener la capacidad metabólica necesaria para degradar el caucho de las llantas usadas, adaptando las condiciones requeridas para que la fisiología y exigencias del microorganismo lleven a cabo dicho proceso lo más eficientemente posible (Ruibal Villaseñor et al., 2008).

Asfalto Modificado

El pavimento asfáltico, debe garantizar ciertos estándares de calidad y funcionalidad, como, por ejemplo, soportar adecuadamente las pesadas cargas, resistir al derrape de los vehículos, presentar una respuesta rápida ante el drenaje del agua, bajo nivel de ruido, flexibilidad, entre otras.

Los asfaltos modificados, son mezclas de cemento asfáltico y distintos agentes modificadores, que mejoran las propiedades físicas y químicas del asfalto. El asfalto modificado con GCR aporta mayor viscosidad, resistencia a altas temperaturas, resistencia a las deformaciones permanentes, mejora la adherencia y daño por humedad, tiene mayor durabilidad, es más elástico, por lo que resiste más el agrietamiento por fatiga, es menos rígido a bajas

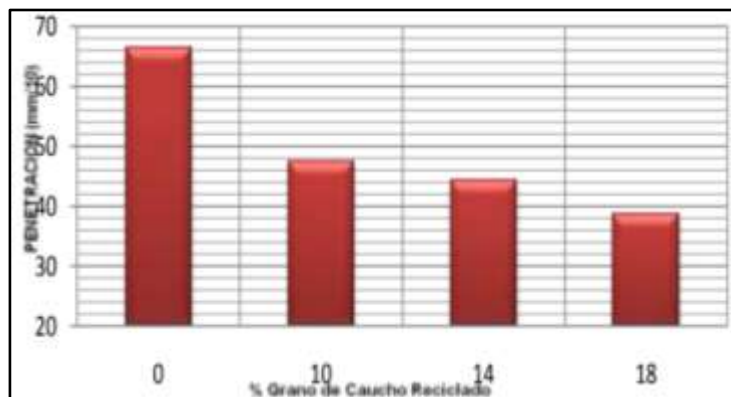
temperaturas, por lo que es más resistente a las grietas térmicas, mitigan el ruido provocado por los vehículos.

De acuerdo a una evaluación realizada por Pineda y Rey (2012), de la Universidad Piloto de Colombia, sobre las propiedades físico-mecánicas de mezclas de asfaltos modificados con porcentajes diferentes de llanta triturada, se evidencio que al modificar el asfalto con GCR de llantas usadas, mejora las propiedades del asfalto.

El asfalto modificado con GCR, resulto ser más resistente a la penetración, aportando mejores características físico-mecánicas, además, se evidencio que entre más porcentaje de GCR tuviese el asfalto, más reducía la penetración, tal como se aprecia en la figura 28.

Figura 29

Resistencia a la penetración de asfalto modificado con GCR



Fuente: (Pineda & Rey, 2012)

El punto de ablandamiento, es otra de las características que mejoro con la adición de GCR. Esta característica del asfalto, se ve mejorada a medida que la concentración de GCR aumenta, tal como se observa en la tabla 16.

Tabla 16

Punto de ablandamiento del asfalto modificado con GCR VS temperatura

Punto de ablandamiento	
% GCR	Temperatura °C
0	48,4
10	52
14	54
18	56

Nota: se muestra una relación entre el punto de ablandamiento y el porcentaje de GCR, (Pineda & Rey, 2012)

La adición de GCR al asfalto lo hace más resistente a las altas temperaturas, por lo que lo hace más duradero y seguro para los vehículos.

La mezcla de asfalto y GCR mejora otras propiedades del asfalto, como, por ejemplo, la viscosidad, adherencia de los agregados pétreos, resistencia al envejecimiento, estabilidad y disminución de la pérdida de masa. El mejoramiento de las propiedades del asfalto, están proporcionalmente relacionadas al porcentaje de GCR adicionado al asfalto, es decir, que entre más GCR posea la mezcla de asfalto, mejores son las propiedades del mismo (Pineda & Rey, 2012).

Pereda y Cubas, (2015), de la Universidad Privada Antenor Orrego, de Perú, en su tesis sobre *“LOS ASFALTOS MODIFICADOS CON EL USO DE CAUCHO RECICLADO DE LLANTAS Y SU COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICO CON LOS ASFALTOS CONVENCIONALES”*, señalan que, agregar polvo de llantas usadas al asfalto, mejora la calidad de la mezcla asfáltica y reduce la contaminación ambiental al implementar las llantas usadas como materia prima. El asfalto modificado aumenta la resistencia de la carpeta asfáltica, es más resistente a los esfuerzos de tensión repetida, a las deformaciones y a los agrietamientos que el asfalto convencional.

El Instituto de Desarrollo Urbano – IDU, de la ciudad de Bogotá (2015), en colaboración con la Universidad de los Andes, construyeron un tramo de vía, en la Localidad de Engativá, (Avenida José Celestino Mutis), en la Carrera 96 entre la Calle 67ª y la Calle 63, con asfalto

modificado con GCR, con el fin de estudiar las propiedades mecánicas de las mezclas de asfaltos mejorados con GCR. El estudio tuvo gran aceptación por el IDU, puesto que, el GCR tiene importantes beneficios ambientales, además de los beneficios que otorga en la calidad del asfalto convencional. El IDU, ha aplicado más de 1.751 m² de asfalto con GCR en la ciudad de Bogotá durante el año 2008.

Durante el año 2011 al 2014, el IDU ha aplicado más de 118.000 m² de asfalto con GCR en la ciudad de Bogotá como se observa en la tabla 17.

Tabla 17

Cantidad de mezcla asfáltica con GCR IDU

Año	Cantidad total aplicada de mezclas m ²	Mezcla asfáltica con GCR m ²	mezcla asfáltica con GCR m ³	Total llantas usadas
2011	-	-	677,78	2.372,23
2013	148.874,49	24.144,01	2.518,81	8.815,84
2014	421.620,19	93.876,94	11.640,31	40.741,10
Total	570.494,68	118.020,95	14.836,91	51.929,18

Nota: la tabla muestra la cantidad de mezcla asfáltica que se ha usado del 2011 hasta el 2014 en la ciudad de Bogotá, (Instituto de Desarrollo Urbano, 2015)

Producción de Gránulos de Caucho Mediante Trituración Mecánica

El grano de caucho reciclado (GCR) es una importante materia prima para la fabricación de una gran variedad de productos, su valor agregado está incentivando a diferentes industrias para utilizarlo como materia prima, puesto que, es una opción medioambientalmente sostenible y más económica.

El proceso de trituración mecánica, inicia con la extracción del talón de las llantas, el cual contiene la parte de acero más rígida, posteriormente, el resto de la llanta se introduce a la trituración primaria, los trozos son llevados hasta el triturador secundario, el cual reduce los trozos de llantas hasta un tamaño de 50 X 50mm. Los trozos son llevados hasta el granulador, el cual los reduce hasta un tamaño menor a 8mm, en esta etapa es removido el acero y las fibras textiles de las llantas. Los pequeños trozos de llantas, son llevados hasta un molino que los convierte en polvo fino de un tamaño menor a 80 mesh (117 μ m), posteriormente, el polvo obtenido se clasifica con el objetivo de hacer la separación de los distintos tamaños: 1-4mm granulo 40%, 4-7mm granulo 25%, 10- 12mm granulo 20% y 30mesh/malla polvo 15% (Olivares, 2016).

ECOTIREGREEN, es una empresa colombiana dedicada a la recolección, trituración y aprovechamiento de llantas usadas, transformándolas en GCR, así como productos terminados. En su portafolio de productos, se puede encontrar GCR de distintas proporciones para la fabricación de distintos productos:

- Mallas 3/8 (9,5mm) (4,75mm): se fabrican capas de base para pisos, baldosas aglomeradas, adoquines, aplicación de pisos in situ, agregado de asfalto modificado y en filtros de aguas residuales.
- Mallas 6 (3,35mm) (2,36mm): es empleado para el acabado de superficies, para la fabricación de adoquines, aplicación de pisos in situ, ciclo rutas, pistas atléticas, parques infantiles, ciclo rutas y asfalto modificado.
- Mallas 7 (2,8mm) (0,6mm): empleado para la fabricación de reductores de velocidad, bolardos, tope llantas, mobiliario urbano, aplicación de pisos in situ, canchas deportivas, relleno de césped sintético, tapetes, autopartes.

- Mallas 20 (0,85mm) (0,25mm): empleado para mezclas asfálticas, suelas para zapatos, tapetes, accesorios, autopartes, impermeabilizantes.
- Julianas o astillas (5mm – 20mm): se implementa para la fabricación de adoquinas, baldosas, aplicaciones para piso in situ y como base elástica para pisos.

Esta alternativa de tratamiento, sino es la mejor, es una de las más óptimas para el reciclaje de llantas usadas, debido a su potencial económico, tecnológico, social y ambiental.

Figura 30

Productos fabricados con GCR



Fuente: (Ecotiregreen, S.F.)

Conclusiones

La disposición final de llantas usadas en el municipio de Villavicencio, está ocasionando la degradación del ambiente a pesar de no ser un residuo peligroso, pues, la gestión inadecuada, impacta negativamente la calidad del de agua, del suelo, la atmosfera y la salud de las personas. Aunque Cormacarena dispone adecuadamente una cantidad de llantas usadas en su centro de acopio y los Sistemas de Recolección Selectiva de Llantas Usadas gestionan adecuadamente otra cantidad, es habitual observar llantas abandonadas en espacios públicos y llantas almacenadas en sitios no aptos, generando contaminación y riesgos para la salud pública, por lo que es evidente que los esfuerzos de Cormacarena y los Sistemas de Recolección Selectiva de Llantas Usadas no son suficientes.

Las sustancias químicas que componen las llantas y los gases tóxicos generados por la combustión incompleta, se dispersan por el medio ambiente a través de distintos mecanismos de transporte, causando afectaciones en medios bióticos y abióticos, como, alteraciones en la calidad y propiedades fisicoquímicas del suelo, del aire, del agua superficial y subterránea, afectaciones a grupos faunísticos y afectaciones en la salud humana.

Las alternativas de tratamiento comparadas, tienen un gran potencial de económica circular, especialmente la transformación mecánica de las llantas a GCR y la empleabilidad de las llantas como sustituto del carbón en hornos cementeros y termoeléctricas, siendo estas dos alternativas que más destacan por su economía y facilidad, puesto que, no requieren mano de obra especializada ni grandes inversiones y que posibilita la recuperación del 100% de sus materiales sin la generación de residuos.

Recomendaciones

Creación del centro de acopio mediante resolución, con el fin de garantizar su funcionamiento y financiamiento económico, ya que, existe el riesgo de que deje de funcionar, una vez haya cambio de gobierno departamental.

Hacer pedagogía con el personal de los montallantas y talleres de vehículos de la ciudad de Villavicencio sobre la resolución 1326 de 2017 y del centro de acopio dispuesto por Cormacarena.

Crear un convenio con un gestor, que haga la recolección de llantas usadas en el municipio de Villavicencio, al menos con frecuencia de un día a la semana, como medida preventiva a la pedagogía que debería realizar Cormacarena sobre la resolución 1326 de 2017 y el centro de acopio.

Destinar llantas usadas para la construcción de muros de contención en la vía que comunica Bogotá – Villavicencio, con el objetivo de estabilizar terrenos inestables, que históricamente han presentado deslizamientos.

Realizar un análisis fisicoquímico de la calidad del agua del río Guatiquia en el sitio donde se han producido la quema de llantas usadas a cielo abierto. Es necesario garantizar, que la calidad del agua del río Guatiquia, no es peligrosa, para los usos a los que se destina (riego de cultivos, uso recreativo, pesca, abastecimiento).

Unir esfuerzos entre el sector público y el sector privado, con el objetivo, de solucionar la problemática que está generando el manejo inadecuado de llantas usadas en la ciudad de Villavicencio, para proteger los ecosistemas y evitar la degradación del ambiente.

Referencias Bibliográficas

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. (2021). *Monóxido de carbono | US EPA*.

<https://espanol.epa.gov/cai/monoxido-de-carbono>

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. (2021). *Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés)*.

<https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>

Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades. (2014). *Ácido Sulhídrico*

RESUMEN DE SALUD PÚBLICA *Ácido Sulhídrico Una Mirada Más Detallada al Ácido Sulhídrico. División de Toxicología y Ciencias de La Salud.*

https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs114.pdf

Agudelo, A. V. (2020). *Superada emergencia por incendio en dique del Guatiquía sector*

Guayabal. <https://llanoalmundo.com/superada-emergencia-por-incendio-en-dique-del-guatiquia-sector-guayabal/>

Aguilar, J. I. (2021). *Más de 500 llantas fueron recolectadas de las calles de Villavicencio*.

<https://www.joseivanaguilar.com/2021/12/13/mas-de-500-llantas-fueron-recolectadas-de-las-calles-de-villavicencio/>

Andhini, N. F., Ochoa, A., & MAHECHA, D. (2017). EVALUACIÓN DEL PROCESO DE

PIRÓLISIS PARA LA OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLES A PARTIR DE LLANTAS USADAS. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.

Angarita Bonilla, P., & Pérez Riesgo, L. (2016). *Compendio de técnicas de pirólisis para el*

reaprovechamiento energético de llantas usadas. 131.

- Ardila, A. N., & Arriola, E. (2017). Efecto de la quema de llantas en la calidad del agua de un tramo de la quebrada Piedras Blancas. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 8(5), 39–55. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-05-03>
- Argos. (2019). *En Colombia, Argos aumentó su capacidad de coprocesamiento de residuos en un 200%*. <https://argos.co/en-colombia-argos-aumento-su-capacidad-de-coprocesamiento-de-residuos-en-un-200/>
- Arrieta, A. J. (2019). *compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COV) en ambientes exteriores . Estimación de la exposición de la población y del incremento de riesgo en salud . Aplicación al País Vasco . Ana Juaristi Arrieta. 2019(cc)*. <http://hdl.handle.net/10810/35183>
- Barros, P., Sarabia, G., Valdés, F., Serrano, P., & Gaytan, I. (2019). Muro de contención construido con neumáticos estabilizados mecánicamente. *Revista Ingenieria de Construccion*, 34(3), 252–267. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732019000300252>
- Bogota, C. de C. de. (2006). *Guia para el manejo de llantas usadas*.
- Caraballo, V. N., Rojas, R. R., Camacho, L. G., Herrera Moya, I., & Morales Pérez, M. C. (2019). Emisiones de dióxido de azufre a la atmósfera por fuentes jas del MINAG y su inuencia en la calidad del aire en la provincia de Villa Clara Inuence on air quality of sulfur dioxide emissions from xed agricultural sources in Villa Clara. *Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas*, 46(3), 86–95. <http://cagricola.uclv.edu.cu>
- Carrión Nin, J. L. (2014). Proceso De Fabricación De Las Llantas De Caucho. In *Industrial Data* (Vol. 2, Issue 2, p. 40). <https://doi.org/10.15381/idata.v2i2.6525>

- Castro, G. (2008). MATERIALES Y COMPUESTOS PARA LA INDUSTRIA DEL NEUMATICO. *Diciembre*, 1–57.
http://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Materiales_y_Compuestos_para_la_Industria_del_Neumatico.pdf
- Comando General de las Fuerzas Militares. (2021). *Ejército se une a campaña ambiental de Cormacarena de recolección de llantas usadas en Villavicencio, Meta*.
<https://www.cgfm.mil.co/es/blog/ejercito-se-une-campana-ambiental-de-cormacarena-de-recoleccion-de-llantas-usadas-en>
- Concejo Municipal de Villavicencio. (2017). *ACUERDO No 339 DE 2017*.
- Cormacarena. (2022a). *Cormacarena continúa realizando jornadas de recolección de llantas usadas en Villavicencio*. <https://www.cormacarena.gov.co/cormacarena-continua-realizando-jornadas-de-recoleccion-de-llantas-usadas-en-villavicencio>
- Cormacarena. (2022b). *Cormacarena dona llantas usadas para la recuperación de parques o elaboración de artesanías*. <https://www.cormacarena.gov.co/cormacarena-dona-llantas-usadas-para-la-recuperacion-de-parques-o-elaboracion-de-artesantias>
- Dirección de Transporte, & Conae. (2000). *Manual de Información Técnica de Neumáticos*. 27.
http://www.fivi.cat/archivos_fivi/manual_llantas.pdf
- EL TIEMPO. (2016). *Preocupación por “invasión” de llantas usadas en Villavicencio*.
<https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16519538>
- García, L. (2019). *Muro ecológico más grande de Guatemala destacó en China Xinhua News*. Guatemala.Com. <https://www.guatemala.com/noticias/entretenimiento/muro-ecologico->

mas-grande-de-guatemala-destaca-en-china-xinhua-news.html

Garzón, J. E., & Cárdenas, E. A. (2013). Emisiones Antropogénicas De Amoníaco , Nitratos Y Óxido Nitroso : Compuestos Nitrogenados Que Afectan El Medio Ambiente En El Sector Agropecuario Colombiano Anthropogenic Emissions of Ammonia , Nitrates and Nitrous Oxide : Nitrogen Compounds That Affect T. *Rev. Med. Vet. Zoot.*, 60(Ii), 121–138.

Gobierno de Canarias. (2022). *Consecuencias medioambientales de los suelos contaminados*.

https://www.gobiernodecanarias.org/medioambiente/temas/calidad-del-suelo/suelos_contaminados/consecuencias_suelos_contaminados/

Gobierno de España. (2021a). *CO (Monóxido de carbono)*. <https://prtr-es.es/CO-Monoxido-de-carbono,15589,11,2007.html>

Gobierno de España. (2021b). *SOx (Óxidos de azufre)*. <https://prtr-es.es/SOx-oxidos-de-azufre,15598,11,2007.html>

Gómez, S. G. (2019). *Hongos filamentosos potencialmente degradadores de caucho de neumático colectados en la vía Bogotá-Fusagasugá, Colombia*.
<https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/46453>

GONZALO, M. R. P. (2016). FUGAS DE AMONÍACO, SUS CONSECUENCIAS Y PLAN DE ACCIÓN FRENTE A UNA EMERGENCIA. “FUGAS DE AMONÍACO, SUS CONSECUENCIAS Y PLAN DE ACCIÓN FRENTE A UNA EMERGENCIA,” PROYECTO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA, ECONÓMICA Y FINANCIERA DEL CULTIVO DE OSTRAS DEL PACÍFICO EN LA PARROQUIA MANGLARALTO, CANTÓN SANTA ELENA, PROVINCIA DE SANTA ELENA, 136.

- Gutiérrez, A. (2012). Hidrocarburos aromáticos policíclicos . Riesgos para la salud y marcadores biológicos. *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana*, 46(1), 27–36.
- Huertas, C. (2020). *Reciclar con llantas, proyecto de vida y camino para superar las heridas del conflicto en el Meta*. El Cuarto Mosquetero. <https://elcuartomosquetero.com/rosa-montoya-promotora-de-proyectos-ecologicos-sostenibles-que-fomentan-la-reconciliacion-en-villavicencio/>
- Instituto de Desarrollo Urbano. (2015). Mejoras mecánicas de las mezclas asfálticas con grano de caucho reciclado - GCR. *Boletín Técnico No 3*, 573719(6981).
- Instituto Nacional de Salud. (2018). *¿Por qué la quema de llantas daña tanto la salud?* <https://web.ins.gob.pe/es/prensa/noticia/por-que-la-quema-de-llantas-dana-tanto-la-salud>
- Instituto para la Salud Geoambiental. (2013). *Dióxido de carbono CO2*. <https://www.saludgeoambiental.org/dioxido-carbono-co2>
- Instituto para la Salud Geoambiental. (2020). *La exposición a PM 2,5 asociado con atrofia de la materia gris que refleja un mayor riesgo de Alzheimer en mujeres mayores*. <https://www.saludgeoambiental.org/exposicion-pm-25-asociado-con-atrofia-materia-gris-que-refleja-mayor-riesgo-alzheimer-mujeres>
- Llano Siete Dias. (2021). *En Villavicencio abrió primer Centro de Acopio de llantas usadas en el Meta*. <https://llanosietedias.com/actualidad-regional/en-villavicencio-abrio-primer-centro-de-acopio-de-llantas-usadas-en-el-meta/>
- Londoño Franco, L. F., Londoño Muñoz, P. T., & Muñoz Garcia, F. G. (2016). Los Riesgos De Los Metales Pesados En La Salud Humana Y Animal. *Biotechnología En El Sector*

Agropecuaria y Agroindustrial, 14(2), 145. [https://doi.org/10.18684/bsaa\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/bsaa(14)145-153)

MARTÍNEZ, C. C. S. (2006). *ESTUDIO DE LA PIRÓLISIS DE LLANTAS USADAS PARA LA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS*. 159.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Resolución No. 1326 de 2017. In *República de Colombia* (pp. 1–22).

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Guía nacional para el control, monitoreo y seguimiento de emisiones de compuestos orgánicos volátiles*.

Morante, A. (2016). *Convertirán llantas en combustible para frenar contaminación en Bogotá*. EL TIEMPO. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16625226>

N. Ramirez, & Teheran, J. (2017). *POTENCIAL TOLERANTE Y DE BIODEGRADACIÓN DEL HONGO DE PODREDUMBRE BLANCA SOBRE LLANTAS USADAS*. 1–63.
<https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/en/mdl-20203177951%0Ahttp://dx.doi.org/10.1038/s41562-020-0887-9%0Ahttp://dx.doi.org/10.1038/s41562-020-0884-z%0Ahttps://doi.org/10.1080/13669877.2020.1758193%0Ahttp://sersc.org/journals/index.php/IJAST/article>

Naciones Unidas. (2020). *Ni el confinamiento por COVID-19 da tregua al cambio climático: los gases que calientan la Tierra llegan a niveles récord*.
<https://news.un.org/es/story/2020/11/1484462>

Noticias del Meta. (2017). *2300 llantas recolectadas en campaña de reciclaje en Villavicencio*.
<https://www.noticiasdelfmeta.com.co/2300-llantas-recolectadas-campana-reciclaje->

villavicencio/

Oceana Europe. (n.d.). *Cambio Climático*. Retrieved April 29, 2022, from

<https://europe.oceana.org/es/cambio-climatico>

Olivares, D. (2016). *Planta de reciclaje de neumáticos de caucho Comercialización de miga de caucho*. 1–56.

Onursal, B., & Gautam, S. P. (1984). Contaminantes del aire y sus efectos. *Paper*, 2(1), 43.

<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/001083/Course2/Lecturas/Vehiculos/chapter2.pdf>

Organizacion Mundial de la Salud. (2021). *Intoxicación por plomo*.

<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>

Ospina, J. A., & Villada-Gil, S. (2011). Métodos para Caracterizar Combustibles Líquidos y Gaseosos Obtenidos de Llantas en Desuso a Través de las Normas ASTM. *Lámpsakos*, 3(6), 23. <https://doi.org/10.21501/21454086.830>

Pereda Rodriguez, D. A., & Cubas Parimango, N. O. (2015). *Investigacion de los asfaltos modificados con el uso de caucho reciclado de llantas y su comparacion tecnico-economico con los asfaltos convencionales*. 106.

http://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/upaorep/4016/1/RE_MED.HUMA_KEVIN.SÁNCHEZ_MORTALIDAD.EN.TRAUMA.DE.TORAX_DATOS.PDF

Periodico del Meta. (2017). *Primer corral con llantas en desuso de Colombia, en Villavicencio*.

<https://periodicodelmeta.com/primer-corral-con-llantas-en-desuso-de-colombia-en-villavicencio/>

- Periodico del Meta. (2020a). *¿El problema de la quema de llantas se salió de control en Villavicencio?* <https://periodicodelmeta.com/19480-2/>
- Periodico del Meta. (2020b). *Escasez de Caucho Natural a Nivel Mundial: Causas y Consecuencias.* <https://www.sectorial.co/articulos-especiales/item/405593-escasez-de-caucho-natural-a-nivel-mundial-causas-y-consecuencias>
- Pineda, A., & Rey, F. (2012). *Mezcla asfáltica drenante modificada con grano de caucho reciclado mezclas asfálticas drenante modificada con grano de caucho reciclado.* 1–102.
- RCN. (2015). *Quema de llantas en Villavicencio dejó seis personas intoxicadas.* <https://www.rcnradio.com/colombia/quema-de-llantas-en-villavicencio-dejo-seis-personas-intoxicadas-185185>
- Reina Tobo, J. E., & Rodriguez Diaz, A. J. (n.d.). *Curso mecanica automotriz llantas descripcion general.*
- Reyes, E. (2015). *“Biodegradación del caucho por Alternaria alternata”* [UNIVERSIDAD ANDRES BELLO]. https://www.researchgate.net/profile/Eugenio-Reyes/publication/298199530_articulo_que_muestra_el_potencial_uso_de_Alternaria_en_la_degradacion_del_caucho_natural_e_industrial/links/56e6b22708ae65dd4cc1bfda/articulo-que-muestra-el-potencial-uso-de-Alternaria-en-la-degradacion-del-caucho-natural-e-industrial.pdf
- Rocío Sánchez Juan. (2012). *Segunda vida de los neumáticos usados* (Vol. 11, pp. 24–39). Química Viva. <https://www.redalyc.org/pdf/863/86323612003.pdf>
- Rodríguez, D. (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesado. *Medisan*, 21(12), 3372–

3385. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1029-30192017001200012

Rubiano, A. B. (2019). *VISTAZO AL MERCADO DE LLANTAS EN COLOMBIA*.

<https://www.motor.com.co/actualidad/industria/funciona-mercado-llantas-colombia-panorama/32387>

Ruibal Villaseñor, C., García Ruiz, A. M. ., Moreno Gómez, D. A. y, & Benavides Ruiz, E.

(2008). *Procedimiento de biodegradación fúngica de triturado de neumáticos*. 1–7.

Semana. (2017). *Llantas usadas y viejas que se convierten en juegos y obras de arte*.

<https://www.semana.com/medio-ambiente/articulo/llantas-usadas-y-viejas-que-se-convierten-en-juegos-y-obras-de-arte/38626/>

Solá, A. Z., Martínez Menéndez, J., Rivas Pérez, P., Gómez Iglesias, S., Borrás, A. S., Iglesias, S. G., & Sanz Borrás, A. (2018). Literature Review on the Harmful Effects of Occupational Exposure to Hydrocarbons on Workers in External Environments. *Med Segur Trab (Internet)*, 64(252), 271–294.

TOLIMA BUENOS DIAS. (2020). *BioArt el emprendimiento tolimense que con llantas recicladas hacen arte*. <https://tolimabuenosdias.com/2020/05/bioart-el-emprendimiento-tolimense-que-con-llantas-recicladas-hacen-arte/>

VELEZ, V. S. (2019). *PROPUESTA DE NEGOCIO PARA LA IMPLEMENTACION DE UNA EMPRESA RECOLECTORA DE LLANTAS USADAS PARA TRANSFORMARLAS EN TEJASDE CAUCHOS (TEJAUCHOS) EN LA CIUDAD DE VILLAVIVENCIO*.

Yulieth C. Reyes, Inés Vergara, Omar E. Torres Mercedes Díaz, E. E. G. (2016).

CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS: IMPLICACIONES EN SALUD,

AMBIENTE Y SEGURIDAD ALIMENTARIA. *The Indian Journal of Pediatrics*, 16(1), 12. <https://doi.org/10.1007/BF02796157>

Zeledón, X. A. (2006). *IMPACTO EN LA SALUD AMBIENTAL POR EFECTO DE EMISIONES DE DIÓXIDO DE AZUFRE DEL VOLCÁN ARENAL, EN LA POBLACIÓN DE LA FORTUNA DE SAN CARLOS*. 1525, 25–34.

<https://www.scielo.sa.cr/pdf/rcsp/v15n29/3318.pdf>

Ziadat, A. H., & Sood, E. (2014). An Environmental Impact Assessment of the Open Burning of Scrap Tires. In *Journal of Applied Sciences* (Vol. 14, Issue 21, pp. 2695–2703).

<https://doi.org/10.3923/jas.2014.2695.2703>

Apéndices

Apéndice A

Llantas abandonadas, sector 01



Nota. En este sector predominan los talleres automovilísticos. *Fuente.* Autoría propia (2021).

Apéndice B

Llantas abandonadas, sector 01



Nota. Las llantas son abandonadas a unos cuantos metros de su fuente de generación . *Fuente.* Autoría propia (2021).

Apéndice C

Llantas abandonadas, Barrio Porvenir



Nota. Es uno de los barrios donde más llantas usadas abandonan en las calles. *Fuente.* Autoría propia (2021).

Apéndice D

Llantas abandonadas, Barrio Porvenir



Nota. Generalmente los sitios donde abandonan las llantas usadas, están acompañados de consumidores de sustancias alucinógenas. *Fuente.* Autoría propia (2021).

Apéndice E

Llantas abandonadas, Barrio Porvenir



Nota. Las calles solitarias facilitan que se haga este tipo de disposición de llantas usadas. *Fuente.* Autoría propia (2021).

Apéndice F

Llantas abandonadas, Institución Educativa PIO XII, Barrio Porvenir



Nota. Personas inescrupulosas abandonan llantas usadas en las puertas de colegios de la ciudad.
Fuente. Autoría propia (2021).

Apéndice G

Llantas abandonadas, Institución Educativa PIO XII, Barrio Porvenir



Nota. Llantas usadas y otros residuos en la Institución Educativa PIO XII. *Fuente.* Autoría propia (2021).

Apéndice H

Llantas abandonadas, Barrio Porvenir



Nota. Uno de los sectores más afectados por la inadecuada gestión de llantas usadas es el barrio porvenir. *Fuente.* Autoría propia (2021).

Apéndice I

Llantas abandonadas, Barrio Porvenir



Nota. Sector con más llantas usadas abandonadas. *Fuente.* Autoría propia (2021).

Apendice J

Llantas abandonadas, Barrio 20 de Julio



Nota. Sector con más llantas usadas abandonadas. *Fuente.* Autoría propia (2021).

Apendice K

Llantas abandonadas, Barrio industrial



Nota. Generalmente, donde se hayan llantas abandonadas hay talleres automovilísticos o montallantas. *Fuente.* Autoría propia (2021).

Apéndice L

Llantas abandonadas, Barrio San Isidro



Nota. Este sector de la ciudad es muy conocido por la cantidad de talleres y venta de artículos para motocicletas. *Fuente.* Autoría propia (2021).

Apéndice M

Llantas almacenadas inadecuadamente, sector centro



Nota. El almacenamiento inadecuado de llantas usadas, también genera contaminación e impacto sobre la salud de las personas. *Fuente.* Autoría propia (2021).

Apéndice N

Llantas abandonadas, Vía Puerto López



Nota. Al fondo de la imagen, se logra observar un montallantas. *Fuente.* Autoría propia (2021).

Apéndice O

Llantas abandonadas, Barrio Ciudad Porfía



Nota. En este punto del Barrio Ciudad Porfía, se hayán los talleres de motos, por ello la acumulación de llantas usadas. *Fuente.* Autoría propia (2021).