

VISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE ALTERNATIVAS DE USO DE LLANTAS RECICLADAS EN LA
IMPLEMENTACIÓN DE OBRAS CIVILES VIALES Y TALUDES EN LA CIUDAD
DE VILLAVICENCIO.



JINNETH GÓMEZ VARGAS



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2024

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE ALTERNATIVAS DE USO DE LLANTAS RECICLADAS EN LA
IMPLEMENTACIÓN DE OBRAS CIVILES VIALES Y TALUDES EN LA CIUDAD
DE VILLAVICENCIO.

JINNETH GÓMEZ VARGAS

Documento final presentado como opción de grado para optar al título profesional de Ingeniero
Civil.

Directora

Ing. ALFONSINA BOCANEGRA GÓMEZ
Geóloga e Ingeniería industrial.

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2024

Autoridades Académicas

Fray Álvaro José ARANGO RESTREPO O.P.

Rector General

Fray Eduardo GONZÁLEZ GIL, O.P.

Vicerrector Académico General

Fray José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O.P.

Rector Seccional Villavicencio

Fray Rodrigo GARCÍA JARA, O.P.

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

Mg Julieth Andrea SIERRA TOBÓN

Secretaria General Seccional Villavicencio

Mg Luis Fernando DIAZ CRUZ

Decano Facultad de Ingeniería Civil

Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios, por ser mi pilar, por guiarme en el desarrollo de lo que ha sido mi vida, por sostenerme y no soltarme. Agradezco a mis padres por amarme cuidarme, protegerme y enseñarme cada paso de la vida, que con su amor, bondad, dedicación y esfuerzo me formaron y guiaron por el camino de esta hermosa profesión, por ser parte fundamental de mi vida, por apoyarme en cada decisión y cada etapa, que con su sabiduría me enseñaron a no rendirme ni temer, a saber, que siempre tengo su mano para salir. Agradezco a la ingeniera Alfonsina Bocanegra, por guiarme en todo el desarrollo de mi monografía, que con su experiencia y conocimiento me apoyó incansablemente para que hoy fuera posible. Por último, agradezco a mi familia, amigos y todos quienes me acompañan día a día, por su apoyo y moral incansable, por creer en mí y en mis sueños.

Resumen

La presente monografía, se sumerge en una revisión bibliográfica detallada, explorando las diversas alternativas y prácticas emergentes relacionadas con el uso de llantas recicladas en construcciones viales y estabilización de taludes, se examinan las propiedades mecánicas y físicas de este material reciclado, así como su aplicabilidad y eficacia en entornos urbanos específicos como el de Villavicencio.

El documento también destaca la importancia de abordar la problemática ambiental asociada con la acumulación de llantas usadas y cómo la implementación de estas en proyectos de construcción civil no solo puede mitigar este problema, sino también aportar al desarrollo sostenible de la ciudad, se exploran casos de estudio y experiencias de otras localidades que han adoptado exitosamente estas prácticas, ofreciendo lecciones aprendidas y mejores prácticas.

Esta monografía proporciona una revisión bibliográfica completa y actualizada sobre el uso de llantas recicladas en obras viales y taludes, a través de la síntesis de investigaciones, experiencias y casos prácticos, se busca ofrecer una guía informativa para profesionales, autoridades locales y académicos interesados en impulsar prácticas constructivas más sostenibles en la ciudad.

Palabras clave: reciclaje llantas, construcción sostenibilidad.

Abstract

This monograph immerses itself in a detailed bibliographic review, exploring the various alternatives and emerging practices related to the use of recycled tires in the construction of road works and slope stabilization, the mechanical and physical properties of this recycled material are examined, as well as its applicability and effectiveness in specific urban environments such as Villavicencio.

The document also highlights the importance of addressing the environmental problems associated with the accumulation of used tires and how the implementation of these in civil construction projects can not only mitigate this problem, but also contribute to the sustainable development of the city, cases of study and experiences of other locations that have successfully adopted these practices, offering lessons learned and best practices.

This monograph provides a complete and updated bibliographic review on the use of recycled tires in civil works, roads and slopes, through the synthesis of research, experiences and practical cases, it seeks to offer an informative guide for professionals, local authorities and academics interested in promote more sustainable construction practices in the city.

Keywords: tire recycling, sustainability construction.

Tabla de contenido

Resumen.....	5
Abstract.....	6
Introducción.....	11
Glosario.....	12
1. Planteamiento del problema.....	13
2. Objetivos.....	14
2.1. Objetivo general	14
2.2. Objetivos específicos.....	14
3. Justificación	15
4. Estado del arte.....	17
4.1. Antecedentes	17
4.2. Marco Teórico	19
4.2.1 Materiales que componen las llantas	20
4.3 Marco conceptual	22
4.4 Marco legal.....	23
5. Metodología.....	25
5.1 Fase 1: Identificar las diferentes alternativas de uso de llantas recicladas en obras civiles en otras ciudades o regiones similares a Villavicencio	25
5.2 Fase 2: Establecer cuáles son las tecnologías y métodos disponibles existentes para el procesamiento y tratamiento de llantas recicladas antes de su uso en obras civiles.....	25
5.3 Fase 3: Identificar los beneficios y desafíos asociados con el uso de llantas recicladas en obras civiles, como la durabilidad, la resistencia y el impacto ambiental	25
6. Desarrollo	26
6.1 Capítulo 1: Problemática de la mala disposición de las llantas usadas en Colombia y a nivel local en Villavicencio	26
6.2 Capítulo 2. Alternativas de uso de llantas recicladas en obras civiles.....	28
6.2.1 En pavimentos	30
6.2.2 En estabilización superficial de taludes.....	43
6.3 Capítulo 3: Tecnologías y métodos disponibles para el procesamiento y tratamiento de llantas recicladas.....	48
6.3.1 Proceso de recolección.....	48
6.3.2 Maquinaria y tecnología.....	49

6.4	Capítulo 4: Beneficios y desafíos asociados con el uso de llantas recicladas en obras civiles	54
6.4.1	Beneficios y desafíos en obras	54
6.4.2	Beneficios ambientales	57
	Conclusiones	58
	Recomendaciones	59
	Referencias bibliográficas	60

Lista de tablas

Tabla 1: Materiales de las llantas	20
Tabla 2: Composición típica de las llantas.	21
Tabla 3: Normativas	24
Tabla 4: Usos generales	29
Tabla 5: Comparación de CBR, convencional, geocledas y módulos	37
Tabla 6: Características del asfalto en las mezclas GCR-MD12	40
Tabla 7: Diseño preliminar de las mezclas GCR – MD12	41
Tabla 8: Comparación de análisis de ensayos entre GCR y MD-12	41
Tabla 9: Comparación entre talud convencional vs con llantas.	48
Tabla 10: Procesos de transformación	54

Lista de figuras

Figura 1: Partes de la llanta.	19
Figura 2: Retiro de caras laterales	32
Figura 3: Proceso de plasmado de los drenajes	32
Figura 4: Proceso de armado de geoceldas	33
Figura 5: Esquematización de puntos de unión vista en planta	33
Figura 6: Remoción lateral	35
Figura 7: Arreglo de llantas sobre superficie	36
Figura 8: Colocación de material de relleno.	36
Figura 9: Proceso por vía húmeda	38
Figura 10: Proceso vía seca	39
Figura 11 Vista frontal del talud con llantas.	45
Figura 12 Conformación y Nivelación del Terreno	45
Figura 13. Alineamiento y Amarre de Llantas	46
Figura 14 Relleno y Compactación de Llantas	46
Figura 15 Continuidad en Hileras de Llantas	47
Figura 16 Destalonadora.	50
Figura 17 Cortadora	50
Figura 18 Trituradora	51
Figura 19 Granulador	51
Figura 20 Separador de acero	52
Figura 21 Separador de acero	52

Introducción

El incremento rápido en la generación de residuos, particularmente de las llantas en desuso, plantea la necesidad urgente de explorar opciones que no solo aborden esta problemática, sino que también contribuyan al desarrollo sostenible de la ciudad, las llantas recicladas emergen como una solución prometedora, ofreciendo no solo una forma de gestionar eficazmente los desechos, sino también un material versátil para la implementación de obras viales y estabilización de taludes.

En la actualidad, el crecimiento de las ciudades y la consecuente necesidad de infraestructuras, así como la gestión adecuada de recursos y la implementación de prácticas sostenibles, son aspectos fundamentales para el progreso urbano. Villavicencio, con sus características topográficas particulares y los desafíos medioambientales que enfrenta, no está excluida de esta dinámica, en este contexto, la presente monografía titulada "Revisión Bibliográfica de Alternativas de Uso de Llantas Recicladas en la Implementación de Obras Civiles Viales y Taludes en la Ciudad de Villavicencio" busca arrojar alternativas innovadoras y sostenibles para la construcción civil.

Esta revisión bibliográfica se propone explorar exhaustivamente las diversas dimensiones de estas alternativas, desde sus propiedades físicas y mecánicas hasta su viabilidad constructiva y su impacto ambiental. Al sumergirnos en la literatura existente, se pretende proporcionar un panorama completo de las experiencias y prácticas que han guiado la implementación de llantas recicladas en proyectos similares alrededor del mundo, con un enfoque particular en la singularidad de Villavicencio.

A través de esta investigación, se aspira a proporcionar a los profesionales de la construcción, autoridades locales y académicos, una base de conocimientos que permita evaluar críticamente las alternativas disponibles y tomar decisiones informadas para así incentivar el desarrollo sostenible de la infraestructura en la ciudad de Villavicencio. La integración de llantas recicladas en obras civiles no solo representa una solución a los desafíos actuales, sino que también aliviana el camino hacia un futuro donde la ingeniería civil y la sostenibilidad convergen para construir comunidades más resilientes y respetuosas con el entorno.

Glosario

INVIAS (Instituto nacional de vías): Su propósito es llevar a cabo la implementación de las políticas, los programas, proyectos y todo lo asociado con la infraestructura de transporte no concesionada en las redes viales nacionales, las cuales abarcan las carreteras primarias y secundarias, incluyendo también ferrocarriles, vías fluviales y la infraestructura marítima, bajo las directrices que establece el Ministerio de Transporte, (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2012).

GCR (Gránulos de caucho reciclado): El GCR se refiere a pequeñas partículas de caucho que se obtienen a través del proceso de reciclaje de llantas (vulcanizados). El pavimento asfáltico modificado con GCR es un tipo de aglutinante derivado de la combinación de cemento asfáltico, el grano de caucho y, en ocasiones, aditivos necesarios para su aplicación en proyectos de pavimentación, (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2015).

CBR: (California Bearing Ratio: Ensayo de Relación de Soporte de California) Ensayo CBR: Este ensayo es un factor del terreno que evalúa la capacidad para soportar las cargas de la subrasante, la sub-base y la base a la hora de realiza el diseño de pavimentos, (Florez Cordova, 2015).

CAUCHO: Los neumáticos se fabrican utilizando caucho tanto natural como sintético. El caucho sintético se produce a partir del petróleo, por otro lado, el caucho que es natural es proveniente del líquido lechoso (látex) de los árboles tropicales. En términos de peso, el caucho natural representa alrededor del 18% del total de un neumático, (Organización de Consumidores y Usuarios (OCU) , 2021).

LLANTAS: La llanta constituye una parte esencial de la rueda del automóvil, actuando como la estructura central y metálica que sostiene el neumático y lo conecta al eje del vehículo. Además de su función básica, la llanta también contribuye a mejorar el aspecto visual y la capacidad de tracción del automóvil. A lo largo del tiempo, las llantas han evolucionado para adaptarse tanto a los avances en neumáticos como a las últimas tecnologías disponibles. El tamaño y el diseño de las llantas influyen significativamente en la apariencia estética del automóvil, y son un componente esencial para garantizar una conducción óptima, (Renting Finders, 2020a).

GEOCELDAS: Las Geoceldas son un tipo de material geo sintético que adopta una estructura tridimensional semirrígida con forma de panal de abeja. Estas celdas se rellenan típicamente con una variedad de materiales como tierra vegetal, grava, arena, cemento, concreto u hormigón. Están fabricadas a partir de polietileno de alta densidad que han sido tratadas para resistir la radiación ultravioleta, y se unen por medio de soldaduras por ultrasonido, proporcionando resistencia estructural que supera sistemas comparables, (G&G, 2020).

1. Planteamiento del problema

Las llantas se han vuelto un asunto de gran importancia ambiental. En Colombia, aunque no se clasifican como residuos peligrosos, debido a las consecuencias que trae el mal manejo de estas luego de su vida útil en sus procesos de disposición y almacenamiento, siendo que estas terminan arrojadas en las calles, parques y humedales de las ciudades, dando paso a la contaminación ambiental, riesgo a incendios, enfermedades respiratorias y otras problemáticas que dejan en riesgo a la población. En Colombia, de acuerdo con datos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, se produce aproximadamente un total de 61 mil toneladas de desechos de llantas al año. De esta cantidad, el 71% se destina a rellenos sanitarios, se incinera o se dispone en cuerpos de agua y áreas verdes, (Camargo Rodríguez et al., 2017).

Por otro lado, en 2023 en Villavicencio cerca de 2,900 llantas son encontradas en las calles y en Nota. Adaptado de s de agua del municipio, (Pérez, 2023). Además, la incineración no autorizada de neumáticos puede ocasionar serias preocupaciones para la salud debido a las emisiones dañinas que produce, como el dióxido de carbono CO₂ y el monóxido de carbono CO, lo que contribuye al calentamiento global. El monóxido reduce la absorción del oxígeno en la sangre, (Periódico del Meta, 2020), lo que hace necesaria la reutilización de las llantas dándoles un mejor uso y reduciendo sus índices de contaminación.

Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, las llantas no se clasifican como residuos peligrosos, pero se consideran residuos especiales debido a su naturaleza, tamaño, composición y peso. Por lo tanto, requieren un enfoque de gestión integral diferente al de los residuos comunes. Como resultado, la empresa de servicios públicos de aseo del Meta (Bioagropecuaria del Llano S.A.S.) no se encarga de recolectar, transportar, almacenar y compactar las llantas usadas y abandonadas en áreas del municipio de Villavicencio.

Esta monografía es un compendio de datos relacionados con el reciclaje de neumáticos, destinado a su aprovechamiento como material de construcción en proyectos civiles. En la actualidad, el problema de la acumulación de llantas usadas representa un desafío ambiental importante en muchas ciudades del país, las llantas desechadas ocupan un espacio considerable en los vertederos y su lenta descomposición contamina el suelo y el agua subterránea. Además, la quema ilegal de llantas causa problemas graves a la salud debido a las emisiones tóxicas que produce.

De acuerdo a la problemática anteriormente planteada surge la siguiente pregunta problema.

¿Cuáles son las alternativas viables identificadas para el uso de llantas recicladas en la implementación de obras civiles en la ciudad de Villavicencio?

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Revisar casos de estudio en alternativas de uso de llantas recicladas para solución de problemáticas en suelos, estabilidad de taludes e implementación en obras de construcción civiles como alternativa de desarrollo sostenible en la ciudad de Villavicencio.

2.2. Objetivos específicos

- Identificar las diferentes alternativas de uso de llantas recicladas en obras civiles en otras ciudades para su posible aplicación en Villavicencio por medio de revisiones bibliográficas existentes.
- Establecer cuáles son las tecnologías y métodos disponibles existentes para el procesamiento y tratamiento de llantas recicladas antes de su uso en obras civiles.
- Identificar los beneficios y desafíos asociados con el uso de llantas recicladas en obras civiles, como la durabilidad, la resistencia y el impacto ambiental.

3. Justificación

Las llantas luego de acabar su vida útil, se convierten en desechos que requieren un largo período de tiempo para descomponerse, el proceso de degradación del neumático puede durar de 1 a 5 siglos (Cruz Roja Española, 2021), sin embargo, su reutilización genera un beneficio ambiental y económico al ser de gran utilidad en el sector de la construcción en diferentes obras civiles, esto debido a que las llantas de caucho se fabrican para que puedan soportar altas cargas, sus principales materiales tienen características especiales como lo son la fuerza, la flexibilidad y la resistencia, para que puedan apartarse a exposiciones químicas y condiciones medio ambientales, garantizando la eficiencia, la calidad y duración, si se le da un buen uso luego de su vida útil se aprovecharán al máximo sus capacidades, (Fariño Vera, 2022).

Las llantas recicladas son adecuadas para ser empleados en diversos contextos dentro de la construcción de proyectos civiles. Algunas de las principales aplicaciones incluyen: mezclas asfálticas, muros de contención, baldosas y adoquines, rellenos y drenajes, (Clavijo Rodríguez, 2021). En particular, se ha experimentado mejoras en las vías con pavimentos fabricados con adiciones de caucho provenientes de las llantas recicladas, (Enciso Suárez, 2020). Como respuesta a los desafíos causados por la mala gestión de las llantas desechadas en Villavicencio, se proponen realizar una revisión documental para determinar diferentes aplicaciones para implementar en obras civiles.

La reutilización de estos residuos no solo conlleva un ahorro significativo de energía y materias primas, sino que también reduce las emisiones de dióxido de carbono al ambiente. Al disminuir la necesidad de extracción, elaboración y transporte de nuevas materias primas, se reduce el consumo de energía requerido para estos procesos. Como respuesta la disminución en el consumo de energía conduce a una menor emisión de CO₂, lo que ayuda a reducir el impacto del efecto invernadero y contribuye de manera significativa a combatir el cambio climático, (Montes, 2021). Poner en práctica estas aplicaciones de las llantas en la ciudad traería beneficios para el crecimiento social y económico por la creación de Nota. Adaptado de s de trabajo y además contribuye con el desarrollo ambiental del municipio.

También la implementación de obras civiles en la Villavicencio con llantas recicladas genera avances en el desarrollo social al mejorar las vías con pavimentos fabricados con adiciones de caucho, traen mejoras en la vida útil de la obra, mayores resistencias a los fuertes cambios climáticos que presenta la ciudad. Todos los usos de las llantas recicladas aportan al crecimiento social, sin embargo, el aporte más fuerte es el cuidado al medio ambiente.

La monografía se dividirá en diferentes capítulos donde se enfocara inicialmente en el

análisis del manejo ambiental de las llantas luego de su vida útil, la normativa y el procesamiento que se aplica actualmente en Villavicencio; posteriormente se realizara una revisión exhaustiva de las diferentes aplicaciones de este material en diferentes bases de datos, artículos y documentos académicos y por último se realizara un capítulo por cada uno de los usos que se pueden implementar en las diferentes obras civiles en Villavicencio.

4. Estado del arte

4.1. Antecedentes

Los documentos de referencia empleados para esta monografía son el resultado de investigaciones realizadas en diversas Nota. Adaptado de s y consultas en línea sobre los usos de neumáticos reciclados en proyectos de construcción.

A continuación, se presentará un artículo que aborda la "Estabilización a Taludes mediante Muros de Llantas en La Capilla - Soacha, Cundinamarca". El propósito de esta investigación es evaluar la posibilidad de aplicar un sistema alternativo de contención utilizando neumáticos para estabilizar los taludes en La Capilla del municipio de Soacha. Este sistema implica la construcción de muros elaborados con llantas que se sostienen por su propio peso, y su estabilidad se optimiza al colocar las llantas en una posición inclinada hacia atrás. Además, su forma circular permite su adaptación a diversos diseños según el tamaño y la forma del área a proteger. Estos muros poseen una durabilidad notable y resisten eficazmente factores naturales como lo son el suelo y el agua. Asimismo, su construcción es fácil y es aceptado por las comunidades, (Barón Zambrano y Sánchez Peña, 2014b).

El siguiente artículo aborda "El uso de neumáticos desechados en la construcción de cimientos para edificaciones de tamaño reducido". En este estudio se propone emplear llantas en desuso en la edificación de viviendas pequeñas o medianas de hasta dos pisos. La investigación se centra en utilizar los neumáticos como refuerzo en las bases (zapatas) y columnas que sostienen estas viviendas, en lugar del convencional uso de hierro. Se ha determinado que estas zapatas reforzadas con llantas pueden soportar cargas de hasta 18 toneladas, lo que supera el peso de una vivienda pequeña. El objetivo principal es ofrecer soluciones tanto a problemas de salud pública y ambientales asociados con la acumulación de llantas, como a alternativas económicas para la construcción de edificaciones de tamaño reducido, (Zamudio, 2019).

El siguiente artículo trata sobre el "Uso sostenible del caucho granulado en tramos de calles en la ciudad de Bogotá". La Unidad de Mantenimiento Vial (UMV), en la implementación de mezclas modificadas con caucho granulado implicó una serie de ajustes en los procedimientos de trabajo de las áreas operativas. Esto incluyó la renovación de los protocolos de intervención, al realizarse pruebas en zonas específicas y la formación del personal involucrado en la ejecución de los trabajos, así como ajustes en la planta de producción. En 2016, la entidad tomo la decisión de abordar el desafío medio-ambiental y técnico de utilizar mezclas que se modifiquen con

caucho granulado. Con este fin, se llevó a cabo un proceso que involucró visitas, capacitaciones y revisión de la maquinaria, materiales e instalaciones de producción de mezclas. Luego de esto, se dio inicio a la utilización de mezclas modificadas con caucho granulado en un sector, con el objetivo de comprender en detalle el funcionamiento del producto. Este tramo piloto, con las características adecuadas, se ubicó en el barrio Timiza, en la localidad de Kennedy, con el propósito de establecer el procedimiento adecuado para la instalación de la mezcla, (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2018).

El artículo siguiente trata sobre "construcción de un muro de contención con llantas en Río de Janeiro, Brasil". En este estudio, los autores erigieron un muro dividido en cuatro secciones, cada una con diferentes distribuciones de neumáticos y dos tipos de sujeción. Las llantas se utilizaron completos y sin una cara. Para analizar su influencia en la estabilidad de la estructura de contención. Se colocaron 2 metros de suelo local sobre el muro y se instalaron inclinómetros en la parte frontal y posterior para medir los desplazamientos, así como celdas de presión en la parte posterior. Según los autores, se observaron desplazamientos horizontales y verticales dentro de rangos razonables en este muro.

Aunque la estructura con las llantas terminó siendo más flexible en comparación a un muro de construcción convencional, logró soportar las condiciones establecidas. Los neumáticos utilizados tenían el mismo diámetro para garantizar una transferencia de cargas uniforme, lo que permite aprovechar un material que suele ser difícil y costoso de desechar de manera adecuada.

En otro enfoque, emplearon una combinación de geotextil y un muro construido con neumáticos para estabilizar un talud. En este análisis, consideraron que este método podría contrarrestar la erosión que afecta un talud cercano a una torre de señal telefónica. El muro de neumáticos se caracteriza por su facilidad de construcción y bajo coste, y al ser un muro de contención, debe poseer la misma resistencia que los muros construidos con materiales convencionales.

Los neumáticos se emplearon para proteger la parte del geotextil de las condiciones atmosféricas, incluida la degradación provocada por la radiación ultravioleta. La construcción del muro implicó el uso de 1400 neumáticos de características similares, recolectados de un vertedero, con dimensiones de 165mm x 550mm, y el geotextil seleccionado fue el UCOSG 80/80. La base del muro se estabilizó con arena fina que se compactó posteriormente, y el geotextil se dispuso a dos alturas distintas en la parte trasera del muro. Además, se crearon dos filtros con agregados de aproximadamente 20mm de diámetro. Esta tarea de estabilización se llevó a cabo en cinco secciones.

En este análisis, los investigadores verificaron que el muro ha cumplido con su propósito,

ya que hasta la fecha no ha mostrado desplazamientos notables o significativos. Esta técnica puede ser aplicada en áreas donde los materiales convencionales son costosos o difíciles de conseguir, (Sayao et al., 2009).

En el ámbito internacional, en la ciudad de Valencia, España, la empresa POLIGRAS IBERICA Realizó un análisis sobre el uso de suelos de grano de caucho reciclado como medida para gestionar neumáticos usados. Este estudio concluyó que este material es una alternativa sostenible ambientalmente, ya que tiene propiedades inertes y no conlleva riesgos para el entorno natural ni para la salud del ser humano.

Para lograr a estas conclusiones, los investigadores llevaron a cabo pruebas de laboratorio y ensayos científicos en canchas de fútbol con césped artificial, cancha ubicada en Alicante. Estas pruebas incluyeron análisis químicos para evaluar la reacción frente a agentes oxidantes, el pH, la irritabilidad, la toxicidad dérmica y el test de Ames. Los resultados obtenidos confirmaron que el producto cumple con la normativa europea vigente y no representa ningún riesgo perjudicial, (Hidalgo, 2017).

4.2. Marco Teórico

Independientemente de la clase de llantas, constituyen un grupo de elementos fabricados y ensamblados para asegurar su adecuado funcionamiento. Cada componente desempeña una papel específico y está compuesto por una mezcla única de materias primas. Las llantas están compuestas por diferentes elementos como los que se a continuación en la ilustración 1, (Cardona Gómez y Sanchez Montoya, 2011).

Figura 1: Partes de la llanta.



Nota. Adaptado de (Salinas Tacumá, 2018, p. 6)

Las llantas son estructuras compuestas por diversos materiales, los cuales varían según su destino de uso. Los principales materiales que la componen son 80% caucho, 15% acero y 5% fibras, donde estos compuestos principales son aprovechados en los procesos de reciclaje, (Borrero, 2020). Gracias a sus propiedades de resistencia, capacidad para soportar altas presiones y buena adherencia, permiten que los vehículos se desplacen adecuadamente y puedan sostener las cargas para las cuales fueron diseñadas, (Michelin, 2010). Se lleva a cabo un proceso químico para disminuir las propiedades plásticas y mejorar la elasticidad de los cauchos y polímeros, que implica la adición de azufre u otros agentes de curado, así como la aplicación de calor. Este proceso se conoce como vulcanización, (Renting Finders, 2020b). El 2 de enero de 1838, Charles Goodyear descubrió de manera accidental el proceso que se denominó vulcanización. Mientras trabajaba, derramó azufre y caucho sobre una estufa, lo que provocó que la mezcla se endureciera y se volviera impermeable. Este proceso resultó en un material más estable, duro y resistente, sin comprometer su elasticidad natural. En 1839, este proceso fue nombrado "vulcanización" esto para honrar al dios Vulcano, la deidad romana asociada con los metales, (Cordoba et al., 2015).

4.2.1 Materiales que componen las llantas

Las llantas están constituidas por diversos componentes, cada uno elaborado con distintos materiales. Según una investigación sobre la reutilización material y energética de neumáticos desechados, estos contienen principalmente de caucho bien sea natural o sintético, negro de carbono, óxido de zinc, azufre, acero, material textil y otros aditivos., (Cano Serrano, 2010). Así mismo a continuación la tabla proporciona el porcentaje de las sustancias contenidas en las llantas:

Tabla 1: Materiales de las llantas

MATERIAL	PORCENTAJE
Caucho / elastómero	48%
Negro de carbono	22%
Acero	15%
Textil	5%
Óxido de Zinc	1%
Azufre	1%
Aditivos	8%

Nota: Tabla de materiales que componen las llantas y el % que incurre en ellas, tomado de (Cardona Gómez y Sanchez Montoya, 2011)

Las llantas se conforman por una gran variedad de materiales, cuyas proporciones varían según su uso final y la carga que deben soportar. Estos materiales contribuyen a sus características particulares, como lo son la resistencia a grandes cargas, capacidad para soportar presiones altas y resistencia al deslizamiento, entre otras. Un ejemplo que muestra las distintas proporciones de los componentes según su uso se presenta en la tabla 2 tomada del documento 'Guía para el manejo de llantas usadas', (Cámara de Comercio de Bogotá (CCB), 2006).

Tabla 2: Composición típica de las llantas.

MATERIAL	COMPOSICIÓN (%)	
	AUTOMÓVILES	CAMIONES
Caucho natural	14%	27%
Caucho sintético	27%	14%
Negro de humo	28%	28%
Acero	14%	15%
Antioxidantes y rellenos	17%	16%

NOTA: Tabla de la composición de las llantas en automóviles y camiones, tomado de (CCB,2006)

En términos generales, una llanta de automóvil pesa aproximadamente 11,5 kg nueva y 9,0 kg después de haber sido utilizada, lo que implica una pérdida de alrededor de 2,5 kg debido al desgaste por fricción. Por otro lado, una llanta de camión de carga tiene un peso inicial de alrededor de 54,5 kg y un peso reducido de aproximadamente 45,5 kg después de su uso, lo que indica una pérdida de aproximadamente 9,0 kg debido a la fricción.

4.2.1.1 Caucho / elastómero. El componente principal de las llantas es el caucho, que es un tipo de elastómero compuesto por hidrocarburos. Este material se encuentra naturalmente en forma de una emulsión lechosa que se obtiene de la savia de las plantas, aunque también se puede producir de manera sintética. Según la Dra. Drunker, docente del área de ciencia de los materiales en la Universidad del Rosario, dice que los elastómeros son realmente polímeros que exhiben una conducta elástica. Estos polímeros son amorfos y mantienen esta característica sobre su temperatura de transición vítrea, lo que les confiere una notable capacidad de deformación, (Drunker, 2013).

Las principales características de los elastómeros son:

- Dureza: La medida de dureza en cauchos blandos se establece mediante una escala subjetiva, empleando un durómetro que cuenta con un indicador de carga de resorte. Las lecturas típicas varían: de 30 a 50 para cauchos blandos, de 60 a 80 para cauchos rígidos,

de 85 a 95 para cauchos duros y más de 98 para cauchos extremadamente duros e inflexibles.

- **Compresión:** La característica más crucial del caucho bajo cargas de compresión es su módulo de elasticidad. Para el caucho blando, este módulo oscila entre 1 y 10 MPa, mientras que para el caucho duro puede llegar a alrededor de 1000 MPa. El módulo de elasticidad del caucho no solo depende de su composición y proceso de curado, sino también de factores como la temperatura a la que se encuentra, el tiempo de exposición a esa temperatura y el grado de deformación durante la prueba.
- **Resiliencia elástica:** Se refiere a la habilidad de un elastómero para absorber energía de forma elástica, lo cual se conoce como resiliencia elástica. Esta propiedad hace referencia a la proporción de energía que puede guardar el material hasta llegar a su límite elástico. Esta notable resiliencia justifica el uso de los elastómeros como amortiguadores eficaces de cargas de impacto, comparativamente, Los elastómeros exhiben alrededor de tres veces más resiliencia que un acero de alta resistencia.
- **Fluencia:** La fluencia aumenta conforme se eleva la temperatura. Las cargas vibratorias provocan una mayor fluencia que las cargas estáticas, y el efecto se intensifica con la magnitud de las vibraciones.
- **Histéresis:** También conocida como fricción interna, implica la transformación de energía mecánica en energía térmica durante los ciclos de carga y descarga del material. La eficacia de esta transformación disminuye en elastómeros más suaves debido a su menor capacidad para absorber energía mecánica y convertirla en térmica. Además, esta conversión es menos efectiva a temperaturas más altas.
- **Fatiga:** La carga estática necesaria para que ocurra una rotura en el elastómero es baja cuando se aplica durante un período prolongado. La vida útil dinámica se reduce significativamente a temperaturas superiores a 40°C o inferiores a -7°C, (Cardona Gómez y Sanchez Montoya, 2011).

4.3 Marco conceptual

Aprovechamiento de llantas usadas: Procedimiento que implica la recuperación de materiales a través de la reutilización, y la valorización energética, con el propósito de reintegrarlos en el ciclo productivo y económico, (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Caucho reciclado granulado: Material obtenido mediante el procesamiento físico de

neumáticos usados, con potenciales aplicaciones en campos de juego sintéticos, pistas deportivas y más. Para ser utilizado en concreto asfáltico, debe cumplir con los requisitos establecidos por el INVIAS, (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Llanta usada: Una llanta llega al fin de su vida útil desde un punto de vista técnico y que puede ser recauchutado o reutilizado, (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Reciclaje: El reciclaje comienza con la recolecta de llantas, que luego son transportados a las plantas de tratamientos para ser fragmentados en trozos más pequeños. Posteriormente, se lleva a cabo la separación del alambre del caucho: los alambres de acero son extraídos y posteriormente fundidos para producir acero nuevo, (Borrero, 2020).

Trituración de llantas: La trituración de llantas transforma los neumáticos desechados en gránulos de caucho y es un método comúnmente utilizado tanto para su eliminación como para su reciclaje. Para depositar los neumáticos en un vertedero, es necesario triturarlos en trozos de diversos tamaños. En cuanto al reciclaje, los gránulos pueden utilizarse para fabricar superficies de canchas sintéticas, beneficiando así la práctica deportiva en la ciudad de Villavicencio. Adicionalmente, estos gránulos de caucho mezclados con asfalto se emplean en la reparación o reparcheo de vías públicas, mejorando la infraestructura vial, (Ramírez, 2022).

4.4 Marco legal

Aunque las llantas no se consideran residuos peligrosos, constituyen una preocupación ambiental, ecológica y de salud considerable. Su abandono en áreas públicas, cuerpos de agua y terrenos sin utilizar puede provocar daños al suelo, al aire y al agua, facilitando la propagación de sustancias perjudiciales para el ambiente y para la salud. Por tanto, en Colombia se aplican normativas específicas para el manejo de llantas usadas:

Tabla 3: **Normativas**

NORMATIVA	DESCRIPCIÓN	REFERENCIAS
Resolución 1326 del 2017	Esta normativa establece los mecanismos para la recolección selectiva y el manejo ambiental de neumáticos usados, junto con otras disposiciones relacionadas.	(Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017)
Acuerdo N° 339 de 2017 (30 de noviembre)	A través de este se establecen medidas para la ejecución de un sistema ambiental de recolecta selectiva de llantas usadas en Villavicencio. Incluye disposiciones específicas en el Capítulo II, tales como las reglas de los distribuidores y a los comercializadores (Artículo 5), las responsabilidades que tienen los consumidores (Artículo 6) y el respaldo de las autoridades municipales y ambientales (Artículo 7).	(Concejo municipal de Villavicencio, 2017)
Decreto 1457 de 2010	Este decreto da los sistemas para la recolecta asertiva y el manejo medio-ambiental de neumáticos usados. En el artículo 4 se detalla la elaboración de los sistemas de recolecta y por consiguiente la gestión de estos neumáticos.	(Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)
Decreto 4741 de 2005	Este decreto regula la prevención y el tratamiento de los desechos o residuos peligrosos producidos en el contexto de la gestión integral.	(Presidencia de la República de Colombia, 2005)
Ley 99 de 1993	Este decreto establece la creación del ministerio de ambiente, y reorganiza el sector encargado de la gestión y preservación del medio ambiente.	(Concejo municipal de Villavicencio, 2017)

NOTA: Tabla de normativas vigentes sobre el uso de llantas recicladas, tomado de MINAMBIENTE

5. Metodología

La metodología empleada en esta monografía se centra en una revisión bibliográfica exhaustiva que abarca diversas dimensiones relacionadas con el uso de llantas recicladas en la implementación de obras civiles viales y taludes en la ciudad de Villavicencio, indagándose en bases de datos, búsqueda de bibliografía de documentos en la web, monografías, trabajos de grado, revistas, informes, repositorios institucionales de diversas universidades, la estructura metodológica se ha creado con el objetivo de proporcionar una visión integral de las alternativas sostenibles disponibles, aprovechando la experiencia global y adaptándola a las características específicas de la localidad.

5.1 Fase 1: Identificar las diferentes alternativas de uso de llantas recicladas en obras civiles en otras ciudades o regiones similares a Villavicencio

La identificación de alternativas de uso de llantas recicladas en obras civiles, constituye un paso esencial para enriquecer el conocimiento y adaptar estas soluciones a la realidad local, a través de un análisis de experiencias a nivel nacional e internacional, se busca extraer aprendizajes valiosos que puedan ser aplicados de manera efectiva en el contexto específico de Villavicencio.

5.2 Fase 2: Establecer cuáles son las tecnologías y métodos disponibles existentes para el procesamiento y tratamiento de llantas recicladas antes de su uso en obras civiles

La recopilación de información sobre las tecnologías y métodos disponibles de las llantas recicladas es fundamental para asegurar su idoneidad en obras civiles, explorando de manera detallada la diversidad de enfoques que existen en esta etapa crítica del ciclo de vida de las llantas recicladas, desde su recolección su procesamiento y sus destinos finales.

5.3 Fase 3: Identificar los beneficios y desafíos asociados con el uso de llantas recicladas en obras civiles, como la durabilidad, la resistencia y el impacto ambiental

El análisis detallado de los beneficios y desafíos vinculados al uso de llantas recicladas es importante para comprender plenamente la viabilidad y el impacto de esta alternativa innovadora, examinándose críticamente los aspectos clave que rodean a la implementación de llantas recicladas en proyectos de construcción civil, centrándonos en la durabilidad, la resistencia y el impacto ambiental.

6. Desarrollo

6.1 Capítulo 1: Problemática de la mala disposición de las llantas usadas en Colombia y a nivel local en Villavicencio

Las llantas son un componente esencial de los medios de transporte que usamos a diario, facilitando la movilización tanto de personas como de diversos productos, incluidos los alimenticios. Sin embargo, cuando las llantas cumplen su ciclo útil, se convierten en residuos que tardan años en descomponerse. Por esta razón, su reciclaje y reutilización se convierten en actividades cruciales, ofreciendo significativos beneficios ambientales, (Rodríguez Ramos y Patiño, 2017).

Según informes del DANE, el sector de transporte de carga experimenta crecimientos a través de los años, impulsado por el aumento de las actividades industriales, agrícolas y comerciales. Este sector representa más del 3,66% del PIB nacional, desempeñando un papel crucial en la conexión de las diversas relaciones comerciales del país, (Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), 2023). En Villavicencio, el parque automotor tiene un crecimiento que ha sido bastante notable. Durante el año 2011, la ciudad contaba con 40,679 vehículos, y para el año 2016, esta cifra se incrementó a 82,618, lo que representa un aumento del 103.1%, (Sertravi, 2016). Se estima que en 2023 en la ciudad se generaron 252.457 llantas usadas al año, (Pérez, 2023). En la actualidad, el abandono de neumáticos usados constituye un grave problema de contaminación, ya que con frecuencia se almacenan sin control en patios de viviendas, se arrojan en caños, ríos y humedales, o se depositan en espacios públicos. Esta acción no solo conlleva a un mal impacto en el ambiente, sino que también contribuye a la degradación del entorno urbano y natural.

Promover proyectos de recolección de neumáticos fuera de uso es crucial por varias razones. En primer lugar, facilita la creación de nuevas oportunidades de colaboración y negocios con todos los involucrados en la cadena de valor de las llantas usadas, como los comerciantes, distribuidores y recuperadores locales. Este enfoque puede establecer un sistema de producción de ciclo cerrado que mejore significativamente la gestión ambiental de los neumáticos usados en Villavicencio.

Además, alentar tales iniciativas impulsará el reciclaje y el aprovechamiento de los mismos, lo que ayudará a reducir la contaminación del ambiente y la sanitaria ya que se disminuye el volumen de neumáticos mediante su recuperación. Esto, a su vez, posibilitará la fabricación de productos innovadores utilizando grano de caucho reciclado (GCR). Estos no solo ofrecen beneficios en términos de seguridad, calidad y resistencia, sino que también requieren bajo mantenimiento, añadiendo valor tanto para consumidores como para el medio ambiente, (Calderón Benavides, 2018).

En Villavicencio, Cormacarena lidera una importante iniciativa con un centro de acopio y recolección de llantas usadas. Este centro maneja procesos de recepción y almacenamiento temporal para llantas de diversos vehículos, desde automóviles y motocicletas hasta camiones y bicicletas, abarcando

tamaños de rin de 13" a 22.5". Posteriormente, estas llantas son entregadas a los Sistemas de recolección y a empresas de negocios verdes que se dedican a su reutilización.

El objetivo principal de Cormacarena al ofrecer la recolección gratuita de llantas es asegurar que estas sean utilizadas en actividades de aprovechamiento a nivel industrial y en negocios verdes. Las llantas recicladas se transforman en una variedad de productos, incluyendo artesanías, muebles, elementos decorativos y proyectos de obras civiles. Esta iniciativa no solo contribuye a la gestión ambiental eficiente de residuos, sino que también fomenta la creación y expansión de industrias que basan su producción en principios de sostenibilidad, (Muñoz, 2023).

La recolección adecuada de llantas usadas puede ofrecerles una segunda vida útil, contribuyendo significativamente a la economía de la región del Meta. Gracias a las características inherentes del material, las llantas ofrecen nuevas oportunidades de reutilización en una variedad de aplicaciones. Por ejemplo, el caucho reciclado derivado de las llantas posee propiedades destacadas como durabilidad, resistencia al agua y flexibilidad, además de aumentar la fricción, lo cual ayuda a prevenir accidentes.

Estas cualidades hacen que el caucho reciclado sea extremadamente versátil para distintos usos, potenciando su valor en el desarrollo de nuevos productos y proyectos.

Las llantas usadas ofrecen varias características beneficiosas que las hacen especialmente valiosas para la reutilización en distintas aplicaciones, particularmente en el ámbito de las obras civiles:

- Durabilidad: Las llantas se destacan por su robustez y longevidad, haciéndolas opciones ideales para aplicaciones en proyectos de construcción que requieren materiales sólidos y resistentes. Su capacidad para soportar condiciones adversas sin deteriorarse rápidamente permite su uso en estructuras que demandan durabilidad a largo plazo.
- Flexibilidad: La habilidad de las llantas para absorber impactos y adaptarse a la deformación sin fracturarse las convierte en materiales aptos para áreas que están sujetas a vibraciones o movimientos del suelo, como en zonas sísmicas o en infraestructuras que deben soportar cargas dinámicas.
- Resistencia al agua y al suelo: Las llantas demuestran una excelente impermeabilidad y resistencia a la acción del agua y del suelo. Esta propiedad las hace adecuadas para su uso en proyectos de construcción que están cerca de cuerpos de agua o en lugares con niveles altos de humedad del suelo, proporcionando una barrera efectiva contra la erosión y la infiltración de agua, (Cardona Gómez y Sanchez Montoya, 2011).

Al reciclar llantas, se emplean métodos de reciclaje específicos que se adaptan a su función final. Los tratamientos más utilizados en las industrias que reusan llantas implican la aplicación de calor, destacándose los siguientes procesos:

- Termólisis: Este método consiste en calentar los materiales residuales de las llantas en un ambiente que no contenga oxígeno. Las temperaturas mas altas y sin tener presencia del oxígeno rompen los enlaces químicos del material, liberando cadenas de hidrocarburos. Este proceso

permite recuperar los compuestos originales del neumático, logrando una recuperación total de sus componentes.

- **Pirolisis:** En este proceso, el caucho se degrada mediante la aplicación de calor, produciendo gas que es semejante al propano y aceite industrial líquido. El gas puede utilizarse para fines industriales, mientras que el aceite puede ser refinado en diésel.
- **Incineración:** Este enfoque involucra la incineración de los componentes orgánicos de las llantas a una temperatura elevada en hornos equipados con refractarios de alto rendimiento. La incineración es efectiva para la eliminación de residuos, aunque debe manejarse cuidadosamente para minimizar la emisión de contaminantes, (Recicla, 2016).

El propósito de este trabajo es abordar el desafío relacionado con la disposición mala de las llantas, con el objetivo de proponer nuevas aplicaciones para estos desechos en el campo de la ingeniería. Una de estas aplicaciones se centra en la estabilización de taludes mediante la construcción de muros utilizando neumáticos.

Estos muros están compuestos por llantas rellenas de material que luego se unen entre sí mediante sogas o ganchos. Por lo general, se emplean sogas de polipropileno y elementos metálicos para su armado. El análisis estructural de estos es similar al de uno con tierra armada, donde los elementos tanto del anclaje como los de la retención del suelo se construyen utilizando llantas reutilizadas, (Clara, 2009).

En la superficie del talud, varias llantas están unidos mediante sogas siguiendo una distribución específica. Cuando las llantas de la superficie están atadas a los de anclaje, se produce fuerza en la soga que los une. Si el refuerzo es lo bastante resistente para no ceder bajo la resistencia y tensión a la extracción de la llanta supera la fuerza de fricción, por lo tanto, la estructura permanecerá siempre estable, (Clara, 2009).

En ingeniería, uno de los reúsos más frecuentes de los neumáticos se encuentra en la producción de concreto asfáltico. Esto se logra al introducir grano de caucho reciclado (GCR), obtenido de neumáticos triturados mecánicamente, que actúa como un especificador de asfaltos tradicionales. Estas mezclas con asfalto ya modificado contienen entre un 2% y un 15% de caucho en relación al peso del asfalto utilizado junto con agregados pétreos. Una idea es incorporar el GCR directamente a los agregados pétreos, conocido como método "vía seca". Por otro lado, añadir el GCR al asfalto se denomina "vía húmeda". Dado que el peso del asfalto en las mezclas típicas constituye solo el 5 o 6% del total, la cantidad del GCR utilizada en los concretos asfálticos es limitada. Por lo tanto, es importante explorar alternativas complementarias que permitan emplear las llantas en una escala mayor de un pavimento, (CCB, 2006).

6.2 Capítulo 2. Alternativas de uso de llantas recicladas en obras civiles.

En Colombia según la revista semana en el año 2020 se recogieron aproximadamente 1.350.000 llantas de las cuales solo el 29% fueron reutilizadas y 958.500 unidades fueron vistas

de nuevo en vertederos y calles de todo el país, (Revista Semana, 2021). Sin ser muy ajenos en Villavicencio lo redacta la revista radio noticias escrito por (Arias, 2023) en los sectores de bomberos, el porvenir y san Benito en una jornada Cormacarena junto con Bioagricola recogieron más de 1000 llantas desechadas. Es de vital importancia darle un nuevo uso a este material altamente contaminante como ya se ha indicado anteriormente, por tal motivo en el siguiente capítulo encontraremos alternativas de reutilización de llantas en obras civiles como una práctica sostenible que aporta a la disminución de residuos y al mismo tiempo brinda soluciones innovadoras en la construcción. Algunas son:

Tabla 4: Usos generales

ENFOQUE	OBRA	UTILIDAD
Pavimentos	Asfalto modificado con caucho	Se pueden triturar neumáticos usados para crear partículas de caucho que se mezclan con el asfalto convencional, aportando mejores propiedades al pavimento.
	Geoceldas	El empleo de geoceldas se destina principalmente a pavimentos en vías de más bajo tránsito, por lo tanto, el aprovechamiento de llantas de vehículos proporciona un sistema óptimo de confinamiento.
	Módulo confinado	La llanta rellena sustituye alguna capa granular en las carreteras de tráfico ligero; es probable que sea necesaria una capa superficial sobre esta estructura.
Muros de contención y rellenos	Materiales de relleno	Las llantas trituradas también pueden utilizarse como material de relleno en muros de contención o en terraplenes. La flexibilidad del caucho puede ayudar a absorber la energía de impacto y proporcionar estabilidad estructural.
	Muros de contención	Se forma una estructura en pirámide a partir de la unión de llantas completas, rellenas de diferentes tipos de materiales.
Pisos	Baldosas y pisos de caucho	La reutilización de llantas puede extenderse a la creación de baldosas y pavimentos para áreas de jardinería y paisajismo, estos materiales son resistentes, antideslizantes y pueden ayudar a reducir la erosión del suelo.
	Superficies de juego seguras	Los fragmentos de llantas recicladas se utilizan a menudo como una alternativa segura para las superficies de juego en parques infantiles, estas proporcionan amortiguación en caso de caídas, reduciendo el riesgo de lesiones.
Proyectos de arte y barreras acústicas	Barreras acústicas	Esta estructura se fabrica con llantas recicladas las cuales ofrecen una solución efectiva para reducir la contaminación sonora en áreas urbanas.
	Esculturas y elementos decorativos	Las llantas pueden ser transformadas en elementos artísticos y decorativos en proyectos de arte público o arquitectura, esto promueve la creación piezas únicas.

NOTA: Tabla explicativa de usos generales de las llantas en diferentes campos, tomado de (Peláez Arroyave et al., 2017)

La utilización de las llantas recicladas puede verse en infinidad más de productos y obras donde las reutilizan en procesos de fabricación, sin embargo, en esta monografía solo se centrará en usos de pavimentos y taludes.

6.2.1 En pavimentos

En pro de los desafíos modernos de sostenibilidad y la gestión integral de desechos, la reutilización de llantas en la proyección, construcción y mantenimiento de todas las vías emerge como una solución innovadora y eco amigable. Este capítulo explora cómo la transformación de llantas usadas en infraestructuras viales no solo aborda la problemática de los desechos, sino que también ofrece beneficios significativos en términos de durabilidad, seguridad y otros. También examina las diversas formas en que las llantas recicladas están aportando a nuestras carreteras, pavimentando el camino hacia un futuro más sostenible y resiliente. Sin embargo, la mayoría de estos re usos se han implementado en vías terciarias, por su problemática de altos costos en mantenimientos y materiales.

En la actualidad en Colombia, un promedio del 70% de la malla vial del país son vías terciarias, (Buchaar Fernández y Sagbini Baestre, 2020). De las cuales la mayoría de estas están en malas condiciones para el tránsito, y pero aun en su capa de rodadura, compuesta principalmente en afirmado, está expuesta de manera directa a las condiciones del clima que son cambiantes, incluyendo lluvias intensas y luego veranos prolongados. Debido a esto, estas carreteras frecuentemente sufren daños como hundimientos o erosión de la capa de rodadura, lo que interrumpe la unión entre comunidades y, como producto de ello, afecta negativamente la economía rural. Además, estas vías rara vez reciben el mantenimiento adecuado y generalmente solo se intervienen cuando se vuelven prácticamente intransitables para los vehículos, (Enciso Suárez, 2020)

Su utilización estaría completamente justificada en regiones del país con una gran cantidad de desechos de llantas y extensiones significativas de carreteras secundarias y terciarias que necesitan mantenerse en condiciones favorables frente a las condiciones climáticas. De acuerdo con (Marini, 2006), La reutilización de materiales en la restauración de pavimentos permite una reducción de costos del 25%. Adicionalmente, esta práctica disminuye el uso de agregados vírgenes en aproximadamente 7,000 toneladas por kilómetro, lo que genera beneficios significativos tanto de manera ambiental como económica.

Es fundamental indagar todas las posibles alternativas sostenibles con el medio ambiente para el mejoramiento y mantenimiento de vías, así como de vías primarias y secundarias. En

este contexto, esta investigación propone la adaptación y posible implementación en Colombia de tecnologías que utilizan llantas recicladas, ya probadas en otros países. Este enfoque está alineado con el interés del gobierno colombiano de mejorar tanto la red vial terciaria como la secundaria, (Enciso Suárez, 2020).

Algunos métodos tomados en cuenta para la reutilización de las llantas en pavimentos son:

- El empleo de geoceldas representa un enfoque constructivo eficaz, tanto desde la perspectiva técnica como de mantenimiento, para pavimentos utilizados en carreteras con poco tráfico. Por consiguiente, la reutilización de llantas de vehículos proporcionará un mecanismo de confinamiento.
- La implementación de módulos confinados es decir llanta más relleno que sustituirá a una capa granular en carreteras con poco tráfico; es probable que se necesite una capa superficial sobre esta estructura.
- El empleo del grano de caucho reciclado (GCR), este se tiene a partir del proceso de reciclaje de llantas, se utiliza como componente en la fabricación de asfaltos modificados, lo que fortalece sus características y mejora la resistencia de la infraestructura vial y aeroportuaria, (Enciso Suárez, 2020)

6.2.1.1 Geoceldas. Este tipo de material geosintético geométrico tiene como objetivo proporcionar un sistema de confinamiento. Las geoceldas son fabricadas con polietileno de densidad alta o también de tiras de polietileno, que se sueldan mediante ultrasonido a lo largo del ancho para crear celdas de manera tridimensional destinadas a contener el suelo. Este confinamiento presenta mejoras significativas a la resistencia al corte, (Chen y Chiu, 2016).

La estructura tridimensional de las celdas funciona como un recipiente que confina completamente el suelo, evitando desplazamientos horizontales. Gracias a esta configuración, el sistema conformado por las geoceldas hace la función de un tapete de gran resistencia que mejora significativamente la distribución de la carga en el suelo subyacente, (Mamatha y Dinesh, 2019).

El empleo de geosintéticos, tanto en carreteras pavimentadas como no pavimentadas, ha evidenciado una mejora notable en su desempeño. Esto se atribuye a la considerable fuerza lateral adicional que estos materiales proporcionan al relleno, la cual supera significativamente la ofrecida por otros tipos de refuerzos geosintéticos, como las geomallas. Estudios previos demuestran que el refuerzo con geoceldas resulta efectivo al utilizar relleno granular en terrenos débiles bajo cargas monótonas, (Chen y Chiu, 2016).

Según Barrera y Franco, en su tesis titulada "Diagnostico del comportamiento de las geo-

celdas hechas con llantas recicladas, por medio de pruebas de carga cíclicas en vías sin pavimentar", (Barrera León y Franco Rodríguez, 2019), describen el procedimiento para adecuar llantas para su uso en geoceldas, el cual se detalla a continuación:

Paso 1: Una vez que se cuentan con las llantas según las especificaciones necesarias, se eligen considerando su peso para facilitar su manipulación y las dimensiones estándar de las geoceldas disponibles en el mercado de geosintéticos. Luego, se lleva a cabo la expulsión de sus paredes laterales para así poder tener solamente la parte externa del ancho de la llanta, la cual estará en contacto directo con la superficie.

Figura 2: Retiro de caras laterales



Nota. Adaptado de (Barrera León y Franco Rodríguez, 2019, p. 29)

Paso 2: Se perforan los especímenes con el objetivo de facilitar el drenaje cuando están en contacto con suelos saturados. Esto se logra utilizando una plantilla que marca círculos de alrededor de 1 cm de diámetro.

Figura 3: Proceso de plasmado de los drenajes



Nota. Adaptado de (Barrera León y Franco Rodríguez, 2019, p. 30)

Paso 3: La disposición de las celdas, siguiendo patrones específicos en su forma, se adapta fácilmente a espacios irregulares o con geometrías predefinidas. En este sentido, cada banda de rodadura se ajusta de manera que se asemeje a formas como un signo de infinito o la forma del número ocho, lo que proporciona una mayor flexibilidad y adaptación al entorno.

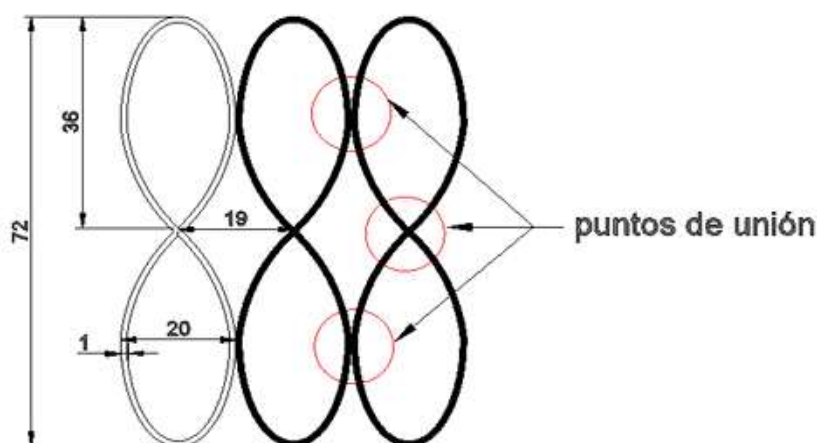
Figura 4: Proceso de armado de geoceldas



Nota. Adaptado de (Barrera León y Franco Rodríguez, 2019)

Paso 4: Para los puntos de conexión, tanto para ajustar la forma como para asegurar cada elemento, se utilizan bridas plásticas, siendo la alternativa más idónea debido a su sencillo montaje y la resistencia que ofrecen.

Figura 5: Esquematisación de puntos de unión vista en planta.



Nota. Adaptado de: (Barrera León y Franco Rodríguez, 2019)

Paso 5: instalación.

Se instalan las geoceldas y se rellenan de material idóneo dependiendo de las condiciones del terreno previamente estudiado en laboratorio.

Del diseño anterior concluyeron que en investigaciones previas que utilizaron llantas indican una elevación en la capacidad portante del material granular y una reducción en las deformaciones al emplear geoceldas fabricadas con llantas recicladas. Incluso cuando se utiliza grava como material de relleno, que carece de fuerza de unión inherente entre sus partículas, se

ha logrado un confinamiento efectivo (Barrera León y Franco Rodríguez, 2019).

Un ejemplo de aplicación de esta tecnología tuvo lugar el 6 de septiembre de 2012 en la Escuela de Ingeniería Civil y Ambiental de Oklahoma, donde se realizó un estudio con el propósito de desarrollar un modelo mecanicista-empírico para implementar en carreteras no pavimentadas reforzadas con geoceldas. El enfoque utilizado se basó en emplear el método de elementos finitos para calcular los resultados del pavimento ante cargas monotónicas. Este modelo empírico también posibilitó la determinación de la tensión permanente de un material, basándose en la tensión elástica generada después de someter el material a múltiples repeticiones de carga, (Yang et al., 2016).

Otro estudio llevado a cabo se centró en la realización de Ensayos de carga utilizando ruedas de vehículos automotores en cuatro secciones de carreteras no pavimentadas. De estas, dos secciones no contaban con ningún tipo de refuerzo, mientras que las otras dos fueron reforzadas con geoceldas. Estas últimas fueron instaladas a diferentes alturas, una a 10 cm y la otra a 15 cm respectivamente, y luego se cubrieron con material arcilloso de índice CBR 5%, para ser reemplazado como subrasante. El resto de los materiales empleados en la instalación fueron compactados hasta alcanzar un 95% de densidad, (Yang et al., 2016).

Para aplicar la carga, se empleó un rodillo en forma de tambor el cual tiene un ancho de 2,1 metros y una capacidad máxima de hasta 10,3 toneladas. Tras 5000 ciclos, se notó una deformación constante en las muestras reforzadas con geoceldas, a diferencia de las otras muestras donde no se registró dicho fenómeno., (Yang et al., 2016).

6.2.1.2 Módulo confinado. El módulo confinado, el cual está conformado por la llanta reutilizada y material para relleno, está diseñado para aumentar la capacidad portante de la capa gracias al confinamiento lateral. Esto, mejora la resistencia estructural, lo que podría resultar en la necesidad de espesores totales más delgados en las capas del pavimento en el que se aplique este módulo confinado, (Enciso Suárez, 2020).

A continuación, se muestran los pasos para la ejecución en módulo confinado, según la tesis de “Reutilización de llantas desechadas e integración de asfalto reciclado para construir pavimentos en carreteras con poco tráfico.” redactada por (Enciso Suárez, 2020).

Paso 1. Preparación del terreno. Para comenzar la construcción, es esencial completar todas las labores de desmonte y limpieza, también se debe retirar la capa vegetal junto con cualquier material considerado inapropiado. Además, es necesario ejecutar las medidas de drenaje especificadas en la documentación de la obra.

Paso 2: Acondicionamiento del confinamiento lateral, se llevarán a cabo trabajos previos

a la instalación de los módulos y material de relleno. El objetivo es crear un confinamiento efectivo para la estructura modular. Estas acciones previas incluyen la implementación de brazos laterales de agregado pétreo compactado, tablestacados con una profundidad de aproximadamente 60 cm (con una variación de ± 5 cm), o cualquier otro sistema que satisfaga la función principal como podría ser la instalación de bermas-cunetas, por ejemplo.

En ese paso, se tendrá que atender lo expuesto en el invias en la parte de construcción de placa huella, (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2015).

Paso 3: Selección de las celdas de confinamiento: Se deben seleccionar llantas que tengan dimensiones y características similares entre sí para asegurar un confinamiento efectivo. Es crucial que las llantas estén en buenas condiciones y no presenten roturas ni un alto grado de deterioro.

Paso 4: Adecuación y disposición de las llantas: Para la adecuación, se debe remover uno de los laterales de cada llanta. Se colocará la llanta modificada en el fondo de la celda formada, sirviendo como refuerzo del lateral que permanece intacto.

Figura 6: Remoción lateral



Nota. Adaptado de (Enciso Suárez, 2020)

Paso 5: Armado de las celdas sobre la superficie: Se inicia la instalación de las celdas sobre el terreno previamente acondicionado. Se sugiere proceder la disposición de las celdas en filas, comenzando desde el centro de la vía hacia los extremos, abarcando un ancho que oscila entre 3.6 metros y 4.8 metros.

Figura 7: Arreglo de llantas sobre superficie



Nota. Adaptado de (Enciso Suárez, 2020).

Paso 6: Extensión del agregado de relleno: El material deberá ser extendido formando una sección uniforme, asegurando su homogeneidad. El RAP se distribuirá en una sola capa a lo largo de todo el ancho de la calzada. Para este proceso, se utilizará maquinaria ligera, como un minicargador, con el fin de rellenar completamente las llantas dispuestas en la sección transversal.

Figura 8: Colocación de material de relleno.



Nota. Adaptado de (Enciso Suárez, 2020)

Paso 7: Compactación: Tras adecuar correctamente el material, se procederá a compactarlo utilizando la maquinaria adecuada hasta lograr alcanzar la densidad requerida. El proceso asegurará que el espesor final del material compactado sobresalga entre un cuarto y un tercio del espesor total del arreglo modular de llantas, (Enciso Suárez, 2020).

De la tesis anterior se concluyó que, en la construcción del modelo confinado, la prueba dinámico realizada con la máquina Shimadzu registró una energía de compactación de 273.02 (kN.m/m³). Sin embargo, en medio del ensayo CBR, la energía alcanzada fue de solo 1609.2 (kN.m/m³), lo que representa apenas el 17% de la compactación lograda en el laboratorio. Esto resultó en bajos valores del módulo (51 MPa en una prueba de carga cíclica a 5 ton/seg). Debido a esto, se aconseja un control riguroso del proceso de compactación durante la colocación del material en el proceso constructivo, (Enciso Suárez, 2020).

6.2.1.2.1 Comparación de CBR en pavimentos convencionales y pavimentos mejorados con llantas recicladas en geoceldas y módulos confinados. Los siguientes resultados de ensayos de laboratorio de CBR fueron tomados de la tesis “La influencia de las geoceldas de neumáticos reciclados en la capacidad de soporte del afirmado para la base es un tema de estudio” donde realizaron estudios provenientes de la cantera Cangana en Chota, Perú, (Chávez Mejía, 2023).

Tabla 5: Comparación de CBR, convencional, geoceldas y módulos

CARACTERÍSTICAS		CONVENCIONAL	GEOCELDA	MODULOS CONFINADOS
CBR	CBR al 100%	68.3%	100.1%	99.53%
	CBR al 95%	42.5%	53.2%	58.86%

NOTA: Tabla explicativa y comparativa del CBR entre un pavimento convencional, y pavimentos donde implementan el uso de geoceldas y módulos confinados con el fin de generar mejoras en el mismo, adaptación propia con guía de (Chávez Mejía, 2023).

El suelo de la cantera de Cangana se categoriza según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) como una grava pobremente gradada con presencia de arena, limo y arcilla, clasificándose en el grupo A-1-a (0) según la AASHTO. Esto indica que el material es de buena calidad para su utilización en carreteras. Aunque el contenido de arena es del 26%, lo que supera el mínimo requerido del 25% según las especificaciones de la EG-2013 para la subbase, se encuentra bajo el porcentaje requerido del 45% para la base. Ahora bien, de acuerdo con el MTC (2014), el suelo de esta cantera se clasificaría con baja plasticidad y no arcilloso, lo que resulta favorable en el material de afirmado para prevenir la expansibilidad.

Tras un análisis técnico comparativo entre el empleo de geoceldas y el uso exclusivo del suelo extraído de Cangana, se ha concluido que los módulos confinados y las geoceldas ofrecen una mayor resistencia y estabilidad al suelo, incrementando su Índice de Soporte California (CBR) del 68.3% al 100.13%. Por consiguiente, se determina que su aplicación es factible y viable.

6.2.1.3 Asfaltos modificados con gránulos de caucho reciclado (GCR). “Las combinaciones asfálticas empleadas en la construcción de carreteras tienen la capacidad de integrar una porción significativa del caucho que proviene de llantas luego de su vida útil. La inclusión de caucho en estas mezclas asfálticas representa una vía para el reciclaje de estos residuos y para potenciar las características del pavimento”, (Ramírez Villamizar et al., 2014).

Diversas investigaciones han evidenciado que la incorporación (GCR) en los asfaltos mejora significativamente ciertas características del pavimento, como se observa más adelante en la tabla 7. Su uso conduce a una mayor durabilidad de la carpeta asfáltica, lo que prolonga la frecuencia de mantenimientos necesarios y, a su vez, reduce costos de la inversión en mantenimientos preventivos de la obra.

Además, los granos de caucho reciclado pueden añadirse a las mezclas en 2 formas distintas: mediante la vía seca o vía húmeda. "Mediante el procedimiento de vía húmeda, el caucho modifica el ligante asfáltico, por otro lado, en el seco, el caucho se utiliza como parte del agregado fino", (Ramírez Villamizar et al., 2014).

Proceso 1: vía húmeda. "En este método, se mezclan los gránulos de caucho con el cemento asfáltico para crear una combinación alterada conocida como asfalto-caucho, que se emplea muy similar a un aglutinante modificado". Este proceso de alteración aumenta significativamente la viscosidad del cemento asfáltico, proporcionándole propiedades distintivas. Una vez que la mezcla de asfalto y caucho alcance los estándares requeridos, se introduce en el mezclador para juntarse con los agregados pétreos, (Wilches Gómez y Villegas Camargo, 2019).

Figura 9: Proceso por vía húmeda



Nota. Adaptado de : (Wilches Gómez y Villegas Camargo, 2019)

Proceso 2: vía seca: "Este método implica combinar el caucho reutilizado con todos los agregados antes de añadir el cemento para el asfalto", (Wilches Gómez y Villegas Camargo, 2019). No obstante, luego de la mezcla del ligante con los agregados y el caucho, es esencial proporcionar un período adecuado para esta combinación. Esto es crucial por que se ha notado que no se producen reacciones significativas entre el cemento asfáltico y el caucho esto por corto

tiempo durante el cual se realiza la mezcla, (Gonzales Orjuela y Jiménez Moreno, 2020).

También es importante destacar que, según los investigadores, este enfoque solo demanda un sistema que dosifique de manera precisa la cantidad de caucho y lo suministre en el momento oportuno. Esto garantiza que el caucho se mezcle de forma efectiva con los agregados cuando alcanzan la temperatura adecuada, antes de la adición del ligante, (Wilches Gómez y Villegas Camargo, 2019).

Figura 10: Proceso vía seca.



Nota. Adaptado de : (Wilches Gómez y Villegas Camargo, 2019)

En los estados de Nueva Gales del Sur y Victoria en Australia, se ha implementado el método por vía húmeda para la utilización restringida de asfalto modificándolo con (GCR). Mayormente se emplea como una capa destinada a resistir grietas, aunque su aplicación ha sido principalmente en proyectos de sellado asfáltico pulverizado, (Widyatmoko, 2007), concluyendo que la mezcla asfáltica alterada ofrece una más alta resistencia al agrietamiento y permite reducir tanto la cantidad de asfalto utilizado como el espesor de la carpeta de asfalto.

Además, existe una disminución de los costos asociados tanto al proyecto inicial como a los mantenimientos posteriores. Asimismo, este tipo de mezcla mejora la seguridad vial y contribuye a la reducción del ruido en comparación con una mezcla convencional. Para obtener estos beneficios, el GCR debe estar presente en una proporción que oscile entre un mínimo del 15% y máximo 25% del peso del cemento asfáltico, lo que equivale específicamente al 16,7% de toda la mezcla o al 25% del peso del cemento. Es recomendado que la temperatura para producir las mezclas que son alteradas con el GCR sean las siguientes:

- Temperatura del cemento asfáltico: 163° - 191°C.
- Temperatura del agregado: <177°C (Way, 2016).

6.2.1.3.1 Comparación de propiedades en ensayos del pavimento con adición de GCR y pavimento tradicional MD12. A continuación, se muestran resultados de un ensayo de laboratorio de la tesis titulada “Análisis comparativo de las características físico-mecánicas entre una mezcla asfáltica estándar y otra que incluye grano de caucho reciclado.” realizada por (Gonzales Orjuela y Jiménez Moreno, 2020).

Tabla 6: Características del asfalto en las mezclas GCR-MD12

TIPO DE ASFALTO					
MEZCLA	PLANTA	PENETRACIÓN (25°,100g)	PUNTO DE ABLANDA- MIENTO	VISCOCIDAD	
GCR	Planta 1	47	67	BROOKFIELD (163°C) (Pa-s)	2
	IDU 1397-17	43	68,2	BROOKFIELD (163°C) (Pa-s)	2,8
	IDU 1119-16	67	62,6	BROOKFIELD (163°C) (Pa-s)	3
	Planta 2	53	72	BROOKFIELD (163°C) (Pa-s)	3
	La fec	47	65	BROOKFIELD (163°C) (Pa-s)	1,75
MD-12	Planta 1	69	49	ABSOLUTA 60°C (Pa-s)	294
	IDU 1397-17	65	50,2	ABSOLUTA 60°C (Pa-s)	228
	IDU 1119-16	-	-		
	Planta 2	63	48,7	ABSOLUTA 60°C (Pa-s)	201
	La fec	63,9	49	ABSOLUTA 60°C (Pa-s)	256

NOTA: Tabla de comparación de ensayos de laboratorio para una mezcla con adición de GCR y otra convencional MD-12, tomado de (Gonzales Orjuela y Jiménez Moreno, 2020)

De acuerdo con la tabla mencionada, se observa que el asfalto utilizado en las mezclas con GCR es más duro, lo cual se refleja en una menor penetración y un mayor punto de ablandamiento en comparación con otras mezclas. Debido a la alteración de este asfalto con GCR, se somete a un calentamiento a temperaturas más elevadas Para satisfacer los criterios definidos en la norma de I.N.V E-725. Esto facilita la evaluación de su viscosidad mediante un viscosímetro rotacional. A partir de estos datos, se logra concluir que la mezcla con GCR muestra una menor sensibilidad a los cambios de temperatura, (Gonzales Orjuela y Jiménez Moreno, 2020).

Tabla 7: *Diseño preliminar de las mezclas GCR – MD12*

DISEÑO PRELIMINAR DE MEZCLA								
Mezcla	Planta	Contenido óptimo de asfalto (%)	Compac- ración (golpes/ cara)	Estabilidad mínima kg	Flujo (mm)	Rigidez Marshall (8kg/mm)	Vacíos con aire (%)	Vacíos en los agregados minerales (%)
GCR	Planta 1	6,40%	75	1391	3,6	386,4	4,00%	15%
	IDU 1397-17	7,10%	75	1391	3,2	434,7	4,00%	16%
	IDU 1119-16	8,20%	75	1588	4,4	360,9	4,00%	16,7%
	Planta 2	7,00%	75	1337	4,2	318,3	4,00%	15,4%
	La fec	7,30%	75	2430,4	3,4	714,8	4,00%	-
MD-12	Planta 1	5,50%	75	1460	3,1	471	5,00%	15,6%
	IDU 1397-17	6,00%	75	1414	2,8	505	5,00%	17%
	IDU 1119-16	-	-	-	-	-	-	-
	Planta 2	5,70%	75	1350	3,1	435	5,00%	15,9%
	La fec	-	-	-	-	-	-	-

NOTA: Tabla de comparación de diseño preliminar para una mezcla con adición de GCR y otra convencional MD- 12, tomado de (Gonzales Orjuela y Jiménez Moreno, 2020).

La tabla anterior indica que la mezcla GCR requiere mayor porcentaje de asfalto para alcanzar su composición óptima, debido a que el uso de un asfalto más duro conduce a una mezcla más rígida. Para contrarrestar esto y aumentar su flexibilidad, se añade una cantidad adicional de porcentaje de asfalto, (Gonzales Orjuela y Jiménez Moreno, 2020).

En la siguiente tabla se muestran los ensayos de laboratorio realizados para comparar la mezcla GCR y una mezcla convencional MD-12 dando como resultado lo siguiente:

Tabla 8: *Comparación de análisis de ensayos entre GCR y MD-12*

ENSAYOS	GCR	MD-12	ANÁLISIS DE RESULTADOS
SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA	96%-Min 80%	Max 90%- Min 85%	Cada una de las mezclas se sitúa en un intervalo adecuado, como se especifica en la sección IDU 510.3.3, donde se establece que debe ser al menos del 80%.
AHUELLAMIENTO	Max 2905- Min 1250	Max 3325- Min 1151	La mezcla que muestra un desempeño superior es la que contiene GCR, y esto se atribuye en parte a su tamaño máximo nominal. Sin embargo, la mezcla de GCR se ve influenciada por su distribución granulométrica irregular, lo que no genera tanta fricción.
MÓDULO RESILIENTE	A 20° Y 5Hz: R- 4750	A 20° Y 5Hz: R- 4439	Los valores más bajos obtenidos en la mezcla de GCR se deben a su menor rigidez y al alto contenido de asfalto presente en la misma.
MÓDULO DINAMICO	A 20° Y 5Hz: D- 2664	A 20° Y 5Hz: D-3132	En el aumento de la frecuencia de carga, este comportamiento es evidente a temperaturas bajas, Para temperaturas elevadas, se observa una variación mínima en el módulo dinámico.

NOTA: Tabla de comparación de ensayos realizados a pavimentos tradicionales vs pavimentos mejorados con GCR, tomado de (Gonzales Orjuela y Jiménez Moreno, 2020)

Los ensayos realizados en la tesis permitieron llegar a varias conclusiones significativas, entre las que destaca que la mezcla asfáltica GCR presenta menores módulos, mayores deformaciones plásticas y una superior resistencia a la fatiga en comparación con las mezclas densas MD12. Por lo tanto, se recomienda el uso de la mezcla GCR como capa inferior. Esto implica que debería emplearse como base asfáltica en construcciones de tres capas o más, como capa intermedia en estructuras de dos capas, o como capa de rodadura única en aplicaciones de una sola capa, (Gonzales Orjuela y Jiménez Moreno, 2020).

6.2.1.4 Propiedades físico-mecánicas de la adición de llantas al pavimento. La reutilización de llantas en pavimentos aporta propiedades físico mecánicas mejoradas en comparación con los pavimentos convencionales. Aquí se presentan algunas de las propiedades clave:

- Resistencia al desgaste: Al incorporar partículas de caucho provenientes de llantas recicladas en la mezcla asfáltica puede mejorar la resistencia al desgaste del pavimento, el caucho actúa como un material elástico que ayuda a absorber las tensiones y reduce la formación de grietas y baches.
- Flexibilidad: El caucho reciclado de las llantas puede conferir mayor flexibilidad al pavimento, esto es especialmente beneficioso en áreas sujetas a movimientos del suelo o cargas dinámicas, ya que el pavimento puede adaptarse mejor a las deformaciones sin sufrir daños significativos.
- Durabilidad: La inclusión de caucho reciclado puede aumentar la durabilidad del pavimento, ya que el material tiene propiedades que resisten mejor la fatiga por cargas repetidas, esto puede resultar en una vida útil prolongada del pavimento, reduciendo la necesidad de mantenimiento y reemplazo frecuentes.
- Amortiguación de impactos: El caucho reciclado tiene propiedades de absorción de impactos, lo que contribuye a una mayor seguridad en carreteras al reducir las fuerzas transmitidas a los vehículos y mejorar la comodidad de conducción, esto es especialmente beneficioso en zonas urbanas y en la construcción de pavimentos en áreas de juego.
- Resistencia a la fisuración: La adición de partículas de caucho puede mejorar la resistencia a la fisuración del pavimento, ya que el material elastomérico ayuda a prevenir la propagación de grieta, esto es crucial para mantener la integridad estructural del pavimento a lo largo del tiempo.
- Mejora en la adherencia: La inclusión de granos de caucho puede mejorar la adherencia de los neumáticos al pavimento, lo que es esencial para la seguridad vial, especialmente en condiciones climáticas adversas.

Estas propiedades convierten la reutilización de llantas en obras de pavimento en una opción atractiva desde el punto de vista ambiental y técnico, ya que ofrece mejoras significativas en comparación con los pavimentos convencionales, (Ramírez Villamizar et al., 2014).

6.2.2 En estabilización superficial de taludes.

Los taludes son estructuras de tierra erigidas en los laterales de una carretera, ya sea en áreas excavadas o en terraplenes, con una pendiente calculada para garantizar la estabilidad de la construcción. Estos abarcan un área que no solo comprende la vía en sí, sino también una zona de terreno a ambos costados. Su principal objetivo es asegurar espacio para posibles expansiones futuras de la vía y reducir los riesgos de accidentes causados por obstáculos en esta área, los cuales deben ser eliminados, .

Cuando un talud se desarrolla naturalmente, sin ser intervenido, se le conoce como ladera natural o ladera. Por otro lado, los taludes contruidos artificialmente por el ser humano se denominan terraplenes o corte, dependiendo de su origen. Un corte implica la excavación natural en una formación terrestre, mientras que los terraplenes corresponden a los taludes artificiales creados durante el proceso de construcción. También se forman taludes en los lados de una excavación realizada desde el nivel del suelo, a los cuales comúnmente se les llama taludes de excavación, (Barón Zambrano y Sanchez Peña, Viabilidad de muros de llantas para la estabilizacion de taludes en el barrio la Capilla-Soacha Cundinamarca, 2014a).

Los muros contruidos con llantas ofrecen una solución efectiva para proteger caminos, viviendas o áreas vulnerables a deslizamientos. Asimismo, resultan eficaces en la estabilización superficial de taludes y laderas inestables al retener el suelo. Además, el sistema de muro armado se concibe como una alternativa técnica para contener y estabilizar el suelo frente a la erosión, brindando una resistencia al empuje comparable a la de los muros convencionales de contención. Gracias a su diseño circular, permite la construcción de diversas configuraciones adaptadas al tamaño y forma del terreno a proteger, (Barón Zambrano y Sanchez Peña, Viabilidad de muros de llantas para la estabilizacion de taludes en el barrio la Capilla-Soacha Cundinamarca, 2014a).

Estos muros son efectivos porque su estabilidad se basa en el peso de la gravedad y se refuerza mediante la disposición escalonada de llantas apiladas hacia atrás en múltiples niveles o filas. La utilización de tierra como material de relleno puede potenciarse mediante la adición de cemento para aumentar su resistencia. Además, todas las llantas están unidas de manera sólida mediante alambre galvanizado, que se trenza y ajusta cuidadosamente, (Escobar Pelaez, 2017).

La cobertura vegetal desempeña un papel fundamental en la protección natural del suelo contra la erosión causada por la lluvia. Su presencia permite que las gotas de lluvia se dispersen en pequeñas gotas al impactar sobre un suelo con vegetación densa, facilitando su infiltración en el suelo. Por el contrario, en un suelo sin vegetación, las gotas de lluvia pueden desprender

partículas del suelo al impactar, las cuales quedan suspendidas en el agua. Estas partículas, al infiltrarse, pueden obstruir los poros del suelo, dificultando el flujo de agua y causando su escurrimiento superficial, (Escobar Pelaez, 2017).

El material granular contenido dentro de la llanta permanece protegido de la escorrentía y la lluvia al estar confinado dentro de la estructura. Este diseño permite que el caucho de la llanta sea el primero en recibir el agua de la lluvia, evitando así que el material contenido dentro de la estructura sea arrastrado. Como resultado, se facilita un flujo natural del agua sin que se produzca la erosión o el arrastre del material granular, (Escobar Pelaez, 2017).

Ante la necesidad de abordar el reciclaje de llantas desechadas, se han llevado a cabo investigaciones que exploran su reutilización, especialmente en la construcción de muros para estabilizar taludes. Estos estudios se enfocan en ver cómo funcionan estas estructuras como elementos de contención, utilizando tanto temas experimentales como análisis numéricos del sistema formado por las llantas y el suelo de refuerzo.

En respuesta al manejo de estos residuos no biodegradables, la empresa Kabushiki-Kaisha Kansai ha desarrollado una tecnología que facilita el reciclaje de residuos sólidos, incluyendo actividades específicas de recuperación. Además, la empresa ha comenzado a ofrecer tiras de neumáticos para su uso como combustible. Las investigaciones iniciales sobre el uso de llantas viejas como refuerzo en taludes se llevaron a cabo en Francia en 1976, (Escobar Pelaez, 2017).

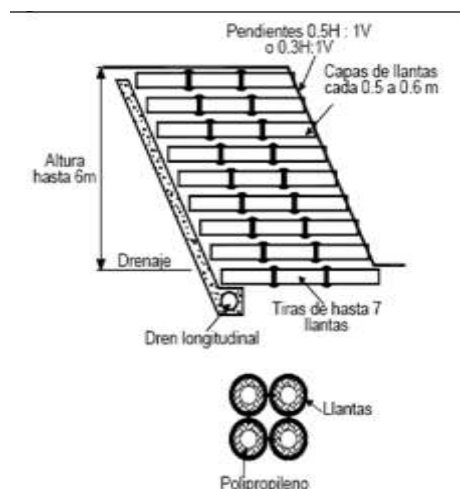
Los estudios revelaron efectos favorables al utilizar neumáticos como refuerzo en suelos o en laderas con paredes verticales. Uno de los primeros proyectos en Inglaterra que empleó llantas recicladas consistió en la construcción de un muro de contención experimental con gravedad en West Yorkshire. Durante este proyecto, se llevaron a cabo investigaciones que sometieron llantas de tamaño R12 y R15 a pruebas de tracción.

En la primera evaluación, se cuantificó la capacidad de la llanta para resistir la tracción al aplicar una fuerza de manera gradual con velocidades constantes de 50 mm/min hasta que ocurriera la rotura, anotando la fuerza en el punto de fallo. Se obtuvo una resistencia a la tracción de 55,81 kn, desviación estándar de 15,19 kn. Luego de ello, se llevaron a cabo ensayos de tracción en tiras de llantas. No obstante, la prueba de campo más relevante fue la que evaluó un muro de tierra armada construido con llantas recicladas a gran escala, (Escobar Pelaez, 2017).

En la actualidad, los revestimientos de llantas son clasificados como residuos sólidos, lo que lleva a que su reutilización sea considerada como una opción práctica y económicamente beneficiosa. Los revestimientos de neumáticos se disponen en capas superpuestas para construir un muro, con cada capa colocada una sobre otra. La capa inicial, o línea base, se fija

sobre una serie de estructuras horizontales que se encajan debajo de la superficie para proporcionar estabilidad, (Barón Zambrano y Sánchez Peña, Estabilización de Taludes por Medio de Muros de Llantas en el Barrio la Capilla Soacha Cundinamarca, 2014b).

Figura 11 Vista frontal del talud con llantas.



Nota. Adaptado de (Marín et al., 2020)

Según la tesis “Probabilidad de utilizar muros contruidos con llantas para estabilizar taludes en el barrio La Capilla, Soacha, Cundinamarca.” (Barón Zambrano y Sanchez Peña, Viabilidad de muros de llantas para la estabilizacion de taludes en el barrio la Capilla-Soacha Cundinamarca, 2014a), los pasos para el armado del talud con llantas

Paso 1: Nivelación de la superficie: Se deben realizar rellenos para posteriormente hacer una nivelación el terreno por sectores, creando un terraplén que coincida con el anchor de la llanta y que presente una ligera inclinación hacia el interior del terreno.

Figura 12 Conformación y Nivelación del Terreno



Nota. Adaptado de (RyGRAC-GTZ, 2003)

Paso 2: Organización, instalación y amarrado de Llantas: Las llantas se alinean cuidadosamente y todas se unen entre sí utilizando alambre galvanizado. La primera fila de llantas se ancla al suelo mediante estacas para asegurar su estabilidad.

Figura 13. Alineamiento y Amarre de Llantas



Nota. Adaptado de (RyGRAC-GTZ, 2003)

Paso 3: Relleno y Compactación: Se selecciona cuidadosamente el material de relleno, preferiblemente utilizando roca triturada de $\frac{3}{4}$ obtenida de la misma zona. Una vez que las llantas están rellenas, se compacta el material utilizando un pisón manual para asegurar su estabilidad y firmeza.

Figura 14 Relleno y Compactación de Llantas



Nota. Adaptado de (RyGRAC-GTZ, 2003)

Paso 4: Continuación en hileras de llantas: Se repiten las acciones anteriores para las filas posteriores, las cuales deben estar amarradas y estar instaladas con una inclinación hacia atrás del talud. Este procedimiento se lleva a cabo hasta lograr la altura deseada, la cual debe guardar proporción con la relación entre la longitud y la altura del talud.

Figura 15 Continuidad en Hileras de Llantas



Nota. Adaptado de (RyGRAC-GTZ, 2003)

6.2.2.1 Propiedades físico-mecánicas de la adición de llantas a obras de taludes. La reutilización de llantas en taludes es una práctica que ha sido explorada en ingeniería civil y geotécnica con el fin de proporcionar mejoras a la estabilidad y la resistencia de taludes. A continuación, se describen algunas propiedades físico-mecánicas asociadas con esta aplicación:

- **Estabilidad y Refuerzo del Talud:** Las llantas pueden utilizarse para reforzar taludes y mejorar su estabilidad, la disposición adecuada de las llantas puede contribuir a la reducción del riesgo a posibles deslizamientos y colapsos del talud.
- **Drenaje y Permeabilidad:** La disposición de las llantas puede afectar la permeabilidad del talud, la ventilación adecuada entre las llantas puede facilitar el drenaje del agua y prevenir la acumulación de presión detrás del talud.
- **Compresibilidad y Deformación:** La compactación del suelo entre las llantas puede afectar la compresibilidad del talud, se debe considerar la deformación del material entre las llantas bajo cargas para garantizar la estabilidad a largo plazo.
- **Resistencia al Corte:** Las llantas, al proporcionar un refuerzo, pueden mejorar la resistencia al corte del talud, la relación entre el suelo y las llantas debe ser evaluada para comprender cómo afecta la resistencia al corte.
- **Durabilidad:** esta propiedad en taludes es importante para garantizar la efectividad a largo plazo, se deben considerar factores como la resistencia a la intemperie y la degradación para evaluar la vida útil de la solución.

Es crucial subrayar que la eficacia de la reutilización de llantas en taludes puede depender de las condiciones particulares del sitio y de los métodos de aplicación empleados. Por lo tanto, se recomienda realizar estudios de ingeniería exhaustivos y pruebas en el sitio antes de aplicar esta técnica en proyectos concretos, (Barón Zambrano y Sanchez Peña, Viabilidad de muros de llantas para la estabilización de taludes en el barrio la Capilla-Soacha Cundinamarca, 2014a).

6.2.2.2 Comparación de las propiedades físico-mecánicas de un talud convencional con uno hecho en llantas. *En la siguiente tabla se realiza la comparación de las propiedades físico-mecánicas de manera cualitativa de los taludes convencionales y los taludes artificiales adaptados con llantas.*

Tabla 9: Comparación entre talud convencional vs con llantas.

Propiedad Físico-Mecánica	Talud Convencional	Talud con Llantas
Resistencia a la compresión	Alta	Alta
Resistencia al deslizamiento	Alta	Alta
Estabilidad estructural	Buena	Alta
Durabilidad	Buena	Mejorada
Absorción de agua	Baja	Buena
Deformación permanente	Baja	Moderada
Flexibilidad	-	Buena
Drenaje	-	Mejorado
Impacto ambiental	-	Reducido

NOTA: Tabla de comparación de propiedades físico-mecánicas de los taludes convencionales vs taludes en llanta, tomado de (Barón Zambrano y Sánchez Peña, Estabilización de Taludes por Medio de Muros de Llantas en el Barrio la Capilla Soacha Cundinamarca, 2014b).

6.3 Capítulo 3: Tecnologías y métodos disponibles para el procesamiento y tratamiento de llantas recicladas.

Este capítulo se sumerge en las tecnologías y métodos disponibles para llevar a cabo el proceso de reutilización de las llantas en cada campo, explorando desde la recolección inicial hasta los tratamientos finales, al examinar estas prácticas y sus implicaciones, podemos comprender mejor cómo convertir las llantas desechadas en recursos valiosos, contribuyendo así a la construcción de infraestructuras más sostenibles y resistentes.

6.3.1 Proceso de recolección.

La Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios señala que las problemáticas primordiales en las plantas de residuos están relacionadas principalmente a una planificación inadecuada. Esto abarca la carencia de una planificación adecuada, entre otros desafíos, que conduce a la acumulación de materiales sin valor comercial, fallos operativos y falta de modernización en los métodos de transformación y adaptación de los materiales. Estos aspectos, junto con obstáculos administrativos, y afectan tanto la sostenibilidad del medio ambiente como la financiera de estas iniciativas. Por lo tanto, antes de introducir una nueva tecnología, como en

el caso del reciclaje de llantas, es esencial realizar un análisis exhaustivo de las diversas opciones disponibles a nivel internacional para elegir la más apropiada según las necesidades del proceso y del producto, (Superintendencia Servicios Públicos Domiciliarios, 2008).

Existen múltiples tecnologías y métodos para el reciclaje de llantas usadas, entre los que se encuentran:

- Termólisis: Este método consiste en calentar los residuos en un ambiente sin oxígeno, lo que provoca que los enlaces químicos se rompan y se formen cadenas de hidrocarburos.
- Pirólisis: Similar al anterior, este proceso implica la degradación térmica de los materiales sin oxígeno, realizándose en hornos que alcanzan temperaturas de 600 a 800 °C. Dentro del pirólisis, existen variaciones como:
 - Pirólisis a baja temperatura: Descompone polietileno en aceites de baja viscosidad mediante el uso de cera de polietileno con temperaturas de 400 °C.
 - Pirólisis a temperatura alta: Introduce llantas reutilizadas y ya trituradas en un reactor de arena de cuarzo a temperaturas entre 630 y 877 °C.
- Incineración: Convierte materiales combustibles en subproductos gaseosos, que están libres de microorganismos, mediante una combustión controlada a temperaturas elevadas. Este proceso produce emisiones de gases contaminantes al entorno ambiental.
- Trituración: Procesa el residuo de llantas en partículas lo más homogéneas posible. Este proceso es esencial antes de proceder a los siguientes pasos, ya sea para la obtención de nuevos materiales o como combustibles secundarios, (Cardona Gómez y Sanchez Montoya, 2011).

6.3.2 Maquinaria y tecnología.

- Destalonadora: Esta máquina está diseñada para retirar los anillos de alambre de acero ubicados en la parte interna del talón de las llantas de camión. Cada una de las llantas posee dos de estos anillos que, si no se extraen, pueden afectar significativamente la eficiencia de las etapas posteriores del proceso, debido a la resistencia de los alambres en acero.

Figura 16 Destalonadora.



Nota. Adaptado de (Vivo en Italia, s.f.)

Cortadora: La máquina realiza la una primera fase de trituración de la llanta. Generalmente, estas máquinas están equipado con transmisiones hidráulicas y al menos dos ejes (rotores) que llevan las cuchillas que realizan el corte. Como final, se obtienen fragmentos de gran tamaño de llanta de forma irregular. El propósito de esto es descomponer la llanta por completo para prepararlo para la siguiente etapa del proceso.

Figura 17 Cortadora.



Nota. Adaptado de (Vivo en Italia, s.f.)

Trituradora: La segunda fase de trituración es realizada por una máquina diferente, que descompone aún más los pedazos resultantes de la fase 1 (cortadora) en fragmentos un más pequeños. Es por esto que estas máquinas están equipadas con una malla o parrilla metálica que permite calibrar el tamaño de los materiales al salir.

Figura 18 Trituradora.



Nota. Adaptado de (Vivo en Italia, s.f.)

Granulador: Es la máquina encargada de convertir en gránulos los trozos de llantas que provienen del triturador secundario. Con esta máquina se pueden obtener granos de hasta 16 mm de dimensión.

Figura 19 Granulador.



Nota. Adaptado de (Vivo en Italia, s.f.)

Separación del acero (desmetalizado): El separador magnético se utiliza con el fin de eliminar partículas ferromagnéticas. Este proceso logra separar hasta 99% de todo el acero "armónico" contenido. El acero se extrae mediante un separador de acero equipado con una banda transportadora que redirige el metal sacado hacia un contenedor como punto de

recolección.

Figura 20 Separador de acero.



Nota. Adaptado de (Vivo en Italia, s.f.)

Granulador secundario (refinación y selección del grano): El material es transportado por medio de la banda hacia un tamizador rotativo, que se clasifican los gránulos según su tamaño en grupos diferentes. Este tamiz rotativo, es alimentado por un tornillo o también llamado “tornillo de Arquímedes” y está equipado con tres parrillas que tienen orificios de distintos diámetros, varían de 1 - 7 mm. Durante todo el procesamiento de cribado, o separación por tamaño de grano, estos caen en distintas tolvas equipadas en su parte inferior con grandes sacos, para que así los granos se acumulen directamente en estos sacos.

Cabe destacar que, si se requiere una reducción adicional del tamaño de los granos, estos serán enviados a un pulverizador. Cuanto más puro y pequeño sea el grano, aumentara su valor.

Figura 21 Separador de acero.



Nota. Adaptado de (Vivo en Italia, s.f.)

En la actualidad existen en Colombia un sinnúmero de empresas dedicadas a la recolección de llantas como lo son rueda verde, sistema verde, eco tire Green, neoland, en Villavicencio se cuenta con llantrece, centro de acopio de cormacarena, sin embargo, estas empresas solo se encargan de que estas llantas no queden tiradas en las calles o vertederos, pero no las tratan para darles una nueva vida útil, es por ello que estas llantas retoman a compradores que las necesitan para realizar productos con estas, como lo son pisos, artes decorativas, cachas sintéticas, etc.

Sin embargo empresas bogotanas como Eco tire Green han ido un poco más allá con la reutilización de las llantas, tienen como misión crear y poner en marcha un sistema efectivo para recoger, triturar y utilizar de manera óptima las llantas reutilizadas, convirtiéndolas en (GCR) y otros productos finales, con el fin de ofrecer una solución completa y duradera al importante problema de contaminación ambiental que representa su eliminación final, es por esto que vieron oportunidad en el grano de caucho reciclado como emprendimiento, venden el GCR tratado por medio de trituración mecánica y lo entregan de acuerdo a la necesidad del cliente para su posterior uso en pisos, canchas sintéticas, pistas de atléticas, pisos aplicados in-situ, para asfaltos modificados, reductores de velocidad, tope llantas, bolardos, tapetes, autopartes, suelas, accesorios e impermeabilizantes, (Ecotiregreen, 2021).

Otra empresa muy conocida en la ciudad de Bogotá es Rueda verde en donde la Corporación Posconsumo de Llantas Rueda Verde, su labor se enfoca en coordinar la gestión responsable de las llantas usadas. Por otro lado, su propósito es garantizar su recogida, transporte y tratamiento ambientalmente responsable, así como promover su reutilización o valorización. Colaboramos estrechamente con un conjunto de empresas comprometidas que ofrecen todos los recursos necesarios para estos fines.

El tratamiento que le realizan a las llantas es por medio de trituración mecánica para llevar la llanta a dimensiones mas pequeñas requeridas por el cliente, con el fin de que sean para consumo en hornos y calderas, canchas sintéticas, asfalto modificado con GCR, autopartes, materiales de construcción, partes de electrodomésticos, entre otros, también lo hacen por medio de pirolisis para combustible alternativo, uso del negro de humo en pigmentación y siderúrgica, (Ruedaverde, 2021).

En la ciudad de Villavicencio aún no se reportan empresas destinadas al tratamiento de las llantas para su posterior uso en obras civiles, sin embargo, es importante el avance que ha tenido la ciudad con la creación de empresas recolectoras impulsando así a posibles futuras empresas que lleguen a la capital llanera a tratar las llantas para su tratamiento y venta de la llanta lista para usos civiles.

Cada obra civil tiene un proceso de tratamiento diferente, a continuación, se expone una tabla con obras viales y de taludes con su respectivo proceso de tratamiento para su utilización final, (Cardona Gómez y Sanchez Montoya, 2011).

Tabla 10: Procesos de transformación

	OBRA	MATERIAL	PROCESO
Pavimentos	Asfalto modificado con caucho	Llanta procesada y triturada.	Destalonadora, cortadora, trituradora, granulador, separación del acero, granulador secundario.
	Geoceldas	Llanta completa sin acero modificada.	Destalonadora, cortadora, separación de acero.
	Modulo confinado	Llanta completa modificada.	Destalonadora, cortadora, separación del acero.
Taludes	Muros de contención	Llanta completa.	llanta completa.
	Relleno	Llanta procesada y triturada.	Destalonadora, cortadora, trituradora, granulador, separación del acero, granulador secundario.

NOTA: Tabla explicativa del proceso por los que pasa la llanta para llegar a su obra final, autoría propia con información basada de los procesos ya explicados.

6.4 Capítulo 4: Beneficios y desafíos asociados con el uso de llantas recicladas en obras civiles

En el cuarto capítulo se muestra lo relacionado con las llantas en el fin de su ciclo de vida, desde beneficios, desafíos e impactos ambientales, con el fin de tener un contexto sobre la utilización de las llantas como insumo principal en obras civiles.

6.4.1 Beneficios y desafíos en obras

La reutilización de llantas ofrece numerosos beneficios, tanto de manera general como específicamente en cada proyecto de obra civil, dependiendo de su aplicación. Según (Delgado, Alicia, 2020), reciclar un neumático de tipo medio puede prevenir la emisión de 32,8 kg de CO₂ y el consumo de 10,5 litros de petróleo. Este dato proviene de estudios realizados por la Universidad Miguel Hernández de Elche (Alicante) y es destacado por TNU (Tratamiento de Neumáticos Usados) para fomentar la conciencia sobre la importancia de reciclar las llantas

usadas de los vehículos.

Por otro lado, en lo que respecta a mejoras en las propiedades físico-mecánicas de mezclas bituminosas, la adición de (GCR) al agregado y a las mezclas genera cambios significativos en la respuesta a las fuerzas que actúan sobre las estructuras del pavimento. Este añadido mejora la resistencia a la tracción, reduce el ruido y la susceptibilidad al envejecimiento y la fatiga, mejora la resistencia a la humedad, previniendo la generación de surcos y reduce la permeabilidad al agua y al aire en la estructura, además de aumentar su ciclo útil. Sin embargo, un desafío es que la mezcla modificada tiende a volverse más flexible a bajas temperaturas y menos plástica a temperaturas altas, (Flores Torres et al., 2022).

El grano reciclado en el pavimento asfáltico funciona como un agente que inhibe el envejecimiento, extendiendo la cohesión del material a lo largo del tiempo. Además, la modificación de la mezcla siendo flexible ante temperaturas bajas pero, a altas temperaturas menos plástica, lo que mejora su flexibilidad y reduce su susceptibilidad, así como optimiza sus propiedades mecánicas, (Ruiz Galeano y Rodríguez Medina, 2016).

El reciclaje de mezclas asfálticas en frío basadas en emulsión asfáltica es reconocido por su importancia ambiental, dado que la colocación a temperaturas más bajas contribuye a ahorros significativos de energía, reduce el envejecimiento del asfalto, y disminuye la liberación de humos y olores, así como las emisiones generales al aire. Esto lleva a la conclusión de que el caucho reciclado ocupa un papel importante en las mejoras de las propiedades de ingeniería del reciclaje en frío, (Flores Torres et al., 2022).

Diversas investigaciones sobre el uso de geoceldas fabricadas a partir de llantas recicladas han demostrado que estas mejoran significativamente la capacidad portante del material granular y reducen las deformaciones. Los ensayos han mostrado que los especímenes mantienen su integridad estructural sin sufrir daños, evidenciando la durabilidad del material de las llantas. Esto indica que las geoceldas de llantas usadas podrían ser un refuerzo efectivo para prolongar la vida útil de las vías, (Barrera León y Franco Rodríguez, 2019).

En la ciudad de Villavicencio aún no hay testimonios de que reutilicen las llantas en obras civiles, precisamente como se hablaba en el capítulo anterior la razón principal es que no se cuenta con empresas que realicen los procesos necesarios en las llantas para su reusó final. Sin embargo, es evidente que las condiciones de las vías en la ciudad no son óptimas. Los problemas como huecos, agrietamientos, desniveles y otros, son frecuentes y afectan la movilidad diaria. Según un informe de un trabajo de grado de la Universidad Cooperativa en 2017, se identificó que cerca de 1936,5 m² de vías pavimentadas con pavimento rígido y 10968,7 m² con pavimento flexible presentaban daños. Al analizar estas problemáticas, se concluyó que la mayoría de estos

daños se deben a la falta de mantenimiento oportuno y al sometimiento de las vías a cargas para las cuales no fueron diseñadas inicialmente. La ausencia de mantenimiento preventivo para adaptarse a las necesidades de carga contribuye a la aparición de fallas en el pavimento, (Bernal Ardila et al., 2017).

De acuerdo a lo indicado en la tesis anteriormente mostrada y análisis de informes redactados a lo largo de la monografía, resulta evidente la necesidad de implementar mejoras en los pavimentos de la capital del Meta. Una forma efectiva de contribuir al desarrollo sostenible es mediante la incorporación de Grano de Caucho Reciclado (GCR) en las vías. Aunque inicialmente estas mejoras representan un gasto significativo, a largo plazo, reducen los costos y prolongan los intervalos de mantenimiento. Esta consideración es especialmente relevante en una ciudad donde los mantenimientos viales no se realizan con la frecuencia necesaria, lo que evita colapsos en el tráfico y ayuda a reducir la tasa de accidentes causados por las condiciones de las vías.

Es importante destacar que los centros de recolección de llantas ya no pueden ofrecer al público productos más allá de artesanías y obras de arte manual debido a la saturación de material recogido. Por lo tanto, es de gran utilidad generar diferentes actividades para el desarrollo e infraestructura del municipio, aprovechando las llantas como métodos de sostenibilidad ambiental.

Aunque el uso de llantas recicladas para mejorar los pavimentos es un concepto relativamente nuevo en el país, algunas ciudades de Colombia ya han comenzado a implementar esta práctica con éxito. Aunque Villavicencio aún no ha dado este paso, los avances de la ingeniería a nivel mundial demuestran la eficacia y viabilidad de estas mejoras en las vías que incluyen el uso de llantas.

Por otro lado, la estabilización superficial de taludes no es una idea descabellada para la ciudad. En veredas y áreas cercanas a la capital, la construcción tradicional puede resultar poco rentable debido a los altos costos involucrados. Sin embargo, la estabilización de taludes mediante métodos empíricos es viable para estas comunidades. Esto podría ser de gran ayuda para los sectores rurales que enfrentan problemas con taludes cerca de zonas residenciales. A través de la colaboración con líderes comunitarios, se podrían realizar estabilizaciones utilizando llantas recicladas provenientes de los centros de acopio de la ciudad, combinadas con rellenos de material local. Esta práctica proporcionaría estabilizaciones que garantizan una mejor calidad de vida en estas áreas.

6.4.2 Beneficios ambientales

La reutilización de llantas tras finalizar su ciclo de vida útil se considera ambientalmente ventajosa, ya que requiere un número significativo de llantas para construcciones, ayudando a mitigar los problemas asociados con la disposición inadecuada de estas. Al reutilizar neumáticos usados, se reduce el impulso de extraer materias primas y el consumo de energía, lo que al tiempo disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo a las luchas constantes contra el cambio climático, (Delgado, Alicia, 2020).

De acuerdo al artículo titulado “Razones para reciclar neumáticos” con el fin que reutilizar llantas fuera de uso se toman los siguientes beneficios ambientales, (Delgado, Alicia, 2020):

- Reducción de desechos: Al reutilizar llantas recicladas en lugar de dejarlas en vertederos, se reduce la cantidad de desechos de llantas que están contaminando el medio ambiente y ocupan espacio en los vertederos.
- Conservación de recursos naturales: Al utilizar llantas recicladas como material de construcción, se reduce la necesidad de utilizar recursos naturales como la piedra triturada o el asfalto convencional, ayudando a conservar los recursos limitados de la Tierra.
- Reducción de la contaminación: El proceso de reciclaje de llantas puede ayudar a reducir la contaminación del agua y del aire, asociada con la eliminación inadecuada de llantas, ya que evita la quema, que pueden liberar sustancias químicas tóxicas y gases nocivos.
- Menor consumo de energía: La fabricación de asfalto convencional requiere una cantidad alta de energía, mientras que el re-uso de llantas en asfaltos puede reducir significativamente el consumo de energía asociado con la fabricación de material de construcción.
- Mitigación del cambio climático: Al reducir la demanda de asfalto convencional y otros materiales de construcción, el uso de llantas recicladas contribuyendo a reducir de emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la fabricación y transporte de estos materiales, (Delgado, Alicia, 2020).

Conclusiones

- Se concluye que la contaminación producida por las llantas usadas en el mundo es un problema ambiental de gran importancia, los largos y difíciles procesos de descomposición, los volúmenes que ocupan en los malos depósitos, los daños a los ecosistemas, la afectación a la salud son varios de los factores para que las llantas usadas lleguen a ser consideradas un problema relevante para la sociedad.
- En cuanto a las vías los procesos desarrollados anteriormente para el reusó de llantas llega a ser viable en la ciudad, estas opciones pueden ser implementadas de manera efectiva para mejoras en el desarrollo de vías terciarias como primer impulso, motivando no solo a ayudar al medio ambiente, si no a darle una nueva vida a las llantas en obras civiles viales, cumpliendo los requerimientos y las normativas empleadas para las construcciones de estas en sus capas asfálticas adicionándole GCR y el mejoramiento de las capas del terreno con las geocledas, los módulos confinados o el RAP, garantizando durabilidad, eficiencia, desarrollo óptimo y seguro para la comunidad.
- Por otro lado, los taludes resultaron ser también muy eficientes para la posible implementación en la ciudad, ya que su procesamiento es mas sencillo que un talud convencional, y con ayuda profesional la misma comunidad puede implementar taludes a mediana magnitud garantizando que son viables y responden a las cargas del lugar, con su manera práctica de armado se reutilizan las llantas completas sin necesidad de tratamientos extras y se reacondicionan dependiendo el tamaño y forma de uso.
- Según la investigación bibliográfica realizada la reutilización de llantas es viable en Villavicencio no solo por su cantidad de llantas desechadas, si no por la calidad humana de la ciudad y su compromiso con el medio ambiente, sin embargo se recomiendan más investigación y desarrollo para mejorar la comprensión de los aspectos técnicos, físicos, geológicos para el uso de llantas recicladas en obras civiles en Villavicencio, esto incluye ensayos sobre el rendimiento y la durabilidad a largo plazo de las estructuras de mayor nivel y complejidad para garantizar al 100% su efectividad, sin contar que se requiere personal capacitado especializado para los procesos.

Recomendaciones

- En Colombia aún no se realizan estudios al 100% de estos reúsos en obras civiles, sin embargo, en la actualidad ha sido un tema de gran relevancia, por lo que se recomienda empezar a investigar a profundidad para empezar a implementar en muchas más actividades y obras civiles con el fin de disminuir la contaminación por llantas en desuso.
- Realizar campañas de concientización del daño ambiental y a la salud que implican las llantas de desecho para que la comunidad aporte en cuanto al reciclaje de ellas y disponerlas a centros de acopio o puntos específicos de la ciudad para su posterior reutilización.
- Incentivar a las industrias de la capital metense a innovar con tratamientos y productos finales con llantas recicladas, o motivar para la creación de empresas eco-sostenibles capaces de manejar de manera adecuada y responsable los procesos físicos – mecánicos que conllevan las llantas para su disposición final en obra civiles.

Referencias bibliográficas

- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2018). *Vías ambientales: Uso ecológico del grano caucho en las calles de Bogotá*. Unidad de Mantenimiento Vial (UMV). <https://www.umv.gov.co/portal/wp-content/uploads/2019/03/Documento-Grano-Caucho.pdf>
- Arias, L. F. (4 de octubre de 2023). Más de 1.000 llantas usadas fueron extraídas de las calles de Villavicencio. *Radio Noticias de Casanare*. <https://radionoticiascasanare.com/inicio/mas-de-1-000-llantas-usadas-fueron-extraidas-de-las-calles-de-villavicencio/>
- Barón Zambrano, J. R., & Sanchez Peña, L. (2014a). Viabilidad de muros de llantas para la estabilización de taludes en el barrio la Capilla-Soacha Cundinamarca. *Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia*. <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/428da235-377f-4f7c-9798-e405cb403827/content>
- Barón Zambrano, J. R., & Sánchez Peña, L. (2014b). Estabilización de Taludes por Medio de Muros de Llantas en el Barrio la Capilla Soacha Cundinamarca. *[Artículo académico, Universidad Católica de Colombia]*. *Repositorio Institucional*. <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/31b7fae8-6a3d-4b5a-b80f-f22b6a7bd286/content>
- Barrera León, D., & Franco Rodríguez, H. F. (2019). Estudio del comportamiento de geo-celdas elaboradas a partir de llantas usadas, mediante pruebas de carga cíclicas en vías no pavimentadas. *[Trabajo de grado, Universidad de Ibagué]*. *Repositorio Institucional*. <https://repositorio.unibague.edu.co/server/api/core/bitstreams/b203db4a-6724-4424-86c2-7c3fe8841432/content>
- Bernal Ardila, F., Gómez Hernández, F., & Céspedes Perafan, T. (2017). Estudio del estado patológico de la malla vial del municipio de Villavicencio, comuna 6. *[Práctica empresarial, Universidad Cooperativa de Colombia]*. *Repositorio Institucional*. <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/359dd156-653f-4df1-b36e-1e930f9bdece/content>
- Borrero, N. (14 de enero de 2020). *Reciclaje de llantas ¿Mil años de contaminación, o mil productos nuevos?* autolla.co: <https://autolla.co/blog/reciclaje-llantas/#:~:text=Las%20llantas%20est%C3%A1n%20compuestas%20por,ser%20cortadas%20en%20pedazos%20peque%C3%B1os.>

- Buchaar Fernández, Á. J., & Sagbini Baestre, C. J. (2020). Análisis del estado de funcionalidad de los pavimentos en vías terciarias en los departamentos del Magdalena y Atlántico. *[Artículo académico, Universidad Cooperativa De Colombia]. Repositorio Institucional.* <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/ec41c942-9c16-421f-a2e9-8e5d0e16d862/content>
- Calderón Benavides, P. A. (2018). Formulación de un plan de negocio para la fabricación de pisos de grano de caucho reciclado, a partir de la recuperación de llantas usadas en la ciudad de Villavicencio. *[Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional.* [https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/13717/2018paulacalderon.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=En%20Villavicencio%20las%20llantas%20usadas,Alcald%C3%ADa%20de%20Villavicencio%2C%202017\).](https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/13717/2018paulacalderon.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=En%20Villavicencio%20las%20llantas%20usadas,Alcald%C3%ADa%20de%20Villavicencio%2C%202017).)
- Cámara de Comercio de Bogotá (CCB). (2006). *Guía para el manejo de llantas usadas. Un sector transporte con operación más limpia ¡Gana y hace ganar al ambiente de la ciudad!* CCV. <https://bibliotecadigital.ccb.org.co/items/9ba8833a-65a3-4820-bb94-17aca233f5e5>
- Camargo Rodríguez, S., Franco Lopez, A., Chud Pantoja, V., & Osorio Gómez, J. (2017). Modelo de simulación dinámica para evaluar el impacto ambiental de la producción y logística inversa de las llantas. *Revista Científica de Ingeniería y Desarrollo*, 35(2), 358-381. <http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/viewArticle/8671>
- Cardona Gómez, L., & Sanchez Montoya, L. M. (2011). Aprovechamiento de llantas usadas para la fabricación de pisos decorativos. *[Trabajo de grado, Universidad de Medellín]. Repositorio Institucional.* <https://core.ac.uk/download/pdf/51194716.pdf>
- Caro, S. (3 de mayo de 2020). *Uso de RAP en Pavimentos.* [Video]. Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=Q5eEUEpdNSo>
- Chávez Mejía, R. Y. (2023). Influencia de las geoceldas de neumáticos reciclados en la capacidad de soporte del afirmado para base, Chota, 2021. *[[Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de Chota.* <https://repositorio.unach.edu.pe/handle/20.500.14142/362>
- Chen, & Chiu. (2016). Model tests of geocell retaining structures. *Geotextiles and Geomembranes*, 26(1), 56-70. <https://doi.org/10.1016/J.GEOTEXMEM.2007.03.001>
- Clara, E. (2009). Estabilización de talud por medio de muro de retención a base de mampostería confinada, diseño de pavimento y mejoramiento de tramo carretero antiguo que conduce del municipio de San Juan Sacatepéquez al Municipio de San Pedro Sacatepéquez. *[Trabajo de grado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio Institucional.*

- http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3053_C.pdf
- Clavijo Rodríguez, F. S. (2021). Análisis documental del uso de llantas recicladas en obras civiles a nivel nacional. *[Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional.* <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/42450/2021felipeclavijo.pdf?sequence=6>
- Concejo municipal de Villavicencio. (30 de noviembre de 2017). Acuerdo No.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.* <http://historico.villavicencio.gov.co/Transparencia/Normatividad/Acuerdos/Vigencia%20017/ACUERDO%20No%20339%20DE%202017.pdf>
- Cordoba, L., Bossert, F., & Richard, N. (2015). *Capitalismo en las selvas. Enclaves industriales en el Chaco y Amazonía indígenas (1850-1950)*. Ediciones del Desierto. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01249703/document>
- Cruz Roja Española. (2021). ¿Cuánto tardan en descomponerse los residuos más comunes? [cruzroja.es: https://www2.cruzroja.es/web/ahora/-/cuanto-tardan-en-descomponerse-residuos-mas-comunes#:~:text=Un%20neum%C3%A1tico%20puede%20tardar%20hasta,los%20500%20y%201.000%20a%C3%B1os.](https://www2.cruzroja.es/web/ahora/-/cuanto-tardan-en-descomponerse-residuos-mas-comunes#:~:text=Un%20neum%C3%A1tico%20puede%20tardar%20hasta,los%20500%20y%201.000%20a%C3%B1os.)
- Delgado, Alicia. (2020). *Razones para reciclar neumáticos*. Ministerio del Interior, España. <https://revista.dgt.es/es/motor/noticias/2020/06JUNIO/0605-Medio-Ambiente-Neumaticos.shtml#:~:text=Reutilizar%20los%20neum%C3%A1ticos%20usados%20con%20lucha%20contra%20el%20cambio%20clim%C3%A1tico.>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2023). *Índice de Costos del Transporte de Carga por Carretera (ICTC) - Información abril 2024*. [dane.gov.co: https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/transporte/indice-de-costos-del-transporte-de-carga-por-carretera-ictc](https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/transporte/indice-de-costos-del-transporte-de-carga-por-carretera-ictc)
- Ecotiregreen. (2021). *Nosotros*. [ecotiregreen.com: https://ecotiregreen.com/nosotros/](https://ecotiregreen.com/nosotros/)
- Enciso Suárez, O. C. (2020). Aprovechamiento de llantas usadas e inclusión de pavimento asfáltico reciclado (RAP) para estructuras de pavimento en vías de bajo tránsito. *[Tesis de Maestría, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional.* https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/78798/1013639789%20-%20Documento_Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Escobar Pelaez, W. A. (2017). Evaluación de la alternativa para la estabilización de taludes

- mediante la implementación de llantas en la montaña la ponderosa (localidad de ciudad Bolívar, barrio Bella Flor). *[Trabajo de grado, Universidad Distrital "Fransisco José de Caldas"]*.
<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/13100/EscobarPelaezWilsonAlex;jsessionid=868646B2860BCAD875413BDA7D806BE9?sequence=1>
- Fariño Vera, K. A. (2022). Análisis del impacto ambiental causado por la fabricación, uso y disposición final de neumáticos; con propuesta de reciclaje en bloques de hormigón. *[Trabajo de grado, Universidad Politécnica Salesiana]*. Repositorio Institucional. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/23599/1/UPS-GT003983.pdf>
- Flores Torres, P., Gaticia, A., Trinidad, D., & Sulca, V. (2022). Uso de Grano de Caucho Reciclado para mejorar la resistencia y durabilidad en pavimentos: una revisión literaria. *Investigatio*(18). <https://revistas.uees.edu.ec/index.php/IRR/article/view/647>
- Florez Cordova, C. (19 de enero de 2015). *Egresado analiza método alternativo para predecir CBR en diseño de pavimentos*. Universidad de Piura. [https://www.udep.edu.pe/hoy/2015/01/metodo-alternativo-cbr/#:~:text=El%20Ensayo%20CBR%20\(California%20Bearing,controladas%20de%20humedad%20y%20densidad.](https://www.udep.edu.pe/hoy/2015/01/metodo-alternativo-cbr/#:~:text=El%20Ensayo%20CBR%20(California%20Bearing,controladas%20de%20humedad%20y%20densidad.)
- G&G. (2020). *Geoceldas* G&G. <https://www.geoygeo.com/productos/geoceldas/#:~:text=Las%20Geoceldas%20son%20especialmente%20efectivas,se%20disipan%20las%20fuerzas%20erosivas.>
- Gonzales Orjuela, A. V., & Jiménez Moreno, J. L. (2020). Comparación de las propiedades físico-mecánicas de una mezcla asfáltica convencional con una de grano de caucho reciclado. *[Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]*. Repositorio Institucional. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/30962/2020josejimenez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Guerra Rodríguez, E. J., & Pinzón Núñez, D. F. (2019). Diseño de una mezcla marshall para carpeta de rodadura empleando material fresado proveniente de Tecnopavimentos S.A. y comparación con mezcla asfáltica convencional. *[Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana]*. Repositorio Institucional. <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/6447>
- Hidalgo, N. (2017). Métodos de reutilización de llantas usadas: Selección y elaboración de nuevos productos. *[Trabajo de grado, Universitaria Agustiniiana]*: Repositorio Institucional. <https://repository.uniagustiniana.edu.co/bitstream/handle/123456789/221/JaimeHidalgo-NataliaAlejandra-2018.pdf?sequence=1>

- Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). (2015). *Llantas y asfaltos reciclados para pavimentar a Bogotá apuesta ambiental del IDU*. idu.gov.co: <https://www.idu.gov.co/blog/boletines-de-prensa-idu-1/post/llantas-y-asfaltos-reciclados-para-pavimentar-a-bogota-apuesta-ambiental-del-idu-a-partir-de-2012-706>
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (20 de noviembre de 2012). *Objetivos y Funciones*. invias.gov.co: <https://www.invias.gov.co/index.php/informacioninstitucional/objetivos-y-funciones>
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2015). *Guía de Diseño de Pavimentos con Placa - huella*. Invias. Guía de diseño de pavimentos con Placa-huella.
- Mamatha, K. H., & Dinesh, S. V. (2019). Performance evaluation of geocell-reinforced pavements. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 13(3), 277-286. <https://doi.org/10.1080/19386362.2017.1343988>
- Marín, B., Oyola, J., Ordoñez, J., & Aguirre, F. (2020). Aplicación de programas analíticos e informáticos sobre estabilización de taludes en el cerro pata grande del cantón Piñas: Application of analytical and computer programs on slope stabilization in the Cerro Pata Grande of the Piñas canton. *Conference Proceedings (Machala)*(4), 26-50. https://www.researchgate.net/figure/Vista-frontal-talud-con-llantas_fig1_362958908
- Marini, S. (2006). Reciclado De Pavimentos Asfálticos En Frio. [Trabajo de grado]. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata. https://biblioteca.uajms.edu.bo/biblioteca/opac_css/doc_num.php?explnum_id=6431
- Medina, J. (2020). *Tecnología para la aplicación de fresado de asfalto RAP*. roadexpertsla.com: <https://www.roadexpertsla.com/es/experts/articulo/tecnologia-para-la-aplicacion-defresado-de-asfalto-rap>
- Michelin. (2010). *Consejos para llantas de autos, SUVs y camioneta*. michelin.es: <https://www.michelin.es/auto/consejos>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (6 de julio de 2017). Resolución 1326 de 2017. *Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas y se dictan otras disposiciones*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/resolucion-1326-de-2017.pdf>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (29 de julio de 2010). Resolución 1457 de 2010. <https://www.mincit.gov.co/ministerio/normograma-sig/procesos-de-apoyo/gestion-de-recursos-fisicos/resoluciones/resolucion-1457-de-2010.aspx>
- Miranda Arguello, F. (2019). Mezclas asfálticas con rap: pavimentos asfálticos reciclados. *Boletín Técnico PITRA-Lanamme UCR*, 10(1), 1-9.

- <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1421/Boletin%201%20%20Mezclas%20asf%C3%A1lticas%20con%20RAP.pdf?sequence=1>
- Montes, C. (2021). *Los cinco beneficios de reciclar neumáticos usados*. posventa.info: <https://www.posventa.info/texto-diario/mostrar/2985564/cinco-beneficios-reciclar-neumaticos-usados>
- Muñoz, S. (04 de agosto de 2023). *El Meta ya cuenta con Centro de Acopio de llantas usadas*. <https://periodicodelmeta.com/el-meta-ya-cuenta-con-centro-de-acopio-de-llantas-usadas/>
- Organización de Consumidores y Usuarios (OCU) . (09 de abril de 2021). *¿Cómo se producen los neumáticos?* [ocu.org: https://www.ocu.org/coches/neumaticos/informe/neumaticos-produccion#:~:text=Los%20neum%C3%A1ticos%20se%20hacen%20con,del%20peso%20de%20un%20neum%C3%A1tico](https://www.ocu.org/coches/neumaticos/informe/neumaticos-produccion#:~:text=Los%20neum%C3%A1ticos%20se%20hacen%20con,del%20peso%20de%20un%20neum%C3%A1tico).
- Peláez Arroyave, G. J., Velásquez Restrepo, S. M., & Giraldo Vásquez, D. H. (2017). Aplicaciones de caucho reciclado: Una revisión de la literatura. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(2), 27-50. <https://www.redalyc.org/journal/911/91150559002/html/>
- Peña Urrea, C. C., & Caceres Contreras, L. F. (2021). Caracterización de una muestra de pavimento asfáltico reciclado (rap), extraído de la autopista sur a la altura de los municipios de soacha y sibaté cundinamarca, con el fin de determinar su uso en capas granulares no tratadas en una estructura de pavimen. *[Trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]*. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/28341/Pe%C3%B1aCristian,C%C3%A1ceresLuis2021.pdf?sequence=4>
- Pérez, M. (29 de marzo de 2023). *Más de 2.900 llantas fueron extraídas de las calles y fuentes hídricas de Villavicencio*. villavonoticias.com: <http://www.villavonoticias.com/mas-de-2-900-llantas-fueron-extraidas-de-las-calles-y-fuentes-hidricas-de-villavicencio-por-cormacarena/>
- Periódico del Meta. (28 de febrero de 2020). *¿El problema de la quema de llantas se salio de control en Villavicencio?* [periodicodelmeta.com: https://periodicodelmeta.com/19480-2/#:~:text=En%20las%20%C3%BAltimas%20semanas%20se,ambiental%20y%20problemas%20de%20salud](https://periodicodelmeta.com/19480-2/#:~:text=En%20las%20%C3%BAltimas%20semanas%20se,ambiental%20y%20problemas%20de%20salud).
- Presidencia de la República de Colombia. (30 de diciembre de 2005). Decreto 4741 de 2005. *por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral*. Diario Oficial 46137. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=18718>

- Ramírez Villamizar, A., Ladino Rubio, I. L., & Rosas Ramírez, J. P. (2014). Diseño de mezcla asfáltica con asfalto caucho tecnología GAP GRADED. Universidad Católica de Colombia. *[Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia]*. Repositorio Institucional. <https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/5a17844d-3053-41c7-9f99-ad9dfd1d9b8b>
- Ramírez, L. J. (20 de febrero de 2022). *¿Cómo se aprovechan las llantas usadas como materia prima para nuevos productos?* bogota.gov.co: <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/ambiente/el-reciclaje-de-llantas-usadas-y-su-reutilizacion-en-nuevos-productos>
- Recicla. (2016). *Neumáticos*. redcicla.com: <http://www.redcicla.com/neumaticos.html>
- Renting Finders. (2020a). *Glosario de terminos: Llantas*. rentingfinders.com/: <https://rentingfinders.com/glosario/llanta/>
- Renting Finders. (2020b). *Glosario de términos: vulcanizacion*. rentingfinders.com: <https://rentingfinders.com/glosario/vulcanizacion/#:~:text=La%20vulcanizaci%C3%B3n%20es%20un%20proceso,y%20se%20incrementa%20la%20elasticidad>.
- Revista Semana. (16 de abril de 2021). *En Colombia, cada año 950.000 llantas usadas van a parar a la basura*. semana.com/: <https://www.semana.com/economia/inversionistas/articulo/en-colombia-cada-ano-950000-llantas-usadas-van-a-parar-a-la-basura/202129/>
- Rodriguez Heredia, D. (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados. *Medisan*, 21(12), 1-14. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1029-30192017001200012
- Rodríguez Ramos, M. A., & Patiño, L. V. (2017). Llantas usadas: materia prima para pavimentos y múltiples ecoaplicaciones. *Revista Ontare*(5), 73-114. <https://doi.org/10.21158/23823399.v5.n0.2017.2004>
- Ruedaverde. (2021). *Aprovechamiento*. ruedaverde.com.co: <https://www.ruedaverde.com.co/aprovechamiento-y-valorizacion>
- Ruiz Galeano, N., & Rodriguez Medina, B. (2016). Comportamiento, viabilidad y costos de la implementación de grano de caucho reciclado para la fabricación de mezcla asfáltica. *[Trabajo de grado, Universidad La Gran Colombia]*. https://repository.ugc.edu.co/bitstream/handle/11396/5116/Comportamiento_implementaci%C3%B3n_granocaucho_asfaltica.pdf
- RyGRAC-GTZ. (2003). *Muros de llantas para proteger caminos, vivienda y terrenos*. sjnavarro.wordpress.com: <https://sjnavarro.wordpress.com/wp-content/uploads/2008/08/muro-con-llanatas.pdf>
- Salinas Tacumá, F. E. (2018). Producción y caracterización de materiales compuestos con

- matrices de resina epoxi reforzados con ripio de llanta y magnetita en diferentes proporciones. [Tesis de Maestría; Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional.
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/63690/80214679.2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sayao, A., Gerscovich, D., & Medeiro, L. (2009). Scarp—an attractive material for gravity retaining walls and soil. *Journal of Solid Waste Technology and Management*, 35(3), 135-155.
<http://dx.doi.org/10.5276/JSWTM.2009.135>
- Sertravi . (2016). *En los ultimos cinco años se duplicó el número de vehículos matriculados en la capital del Meta* . Secretaría de Movilidad de Villavicencio.
- Superintendencia Servicios Públicos Domiciliarios. (2008). *Diagnóstico sectorial. Plantas de aprovechamiento de residuos sólidos*. SSPD.
- Torres Latorre, P. A. (2016). Proyecto de grado: Estabilización de taludes con neumáticos usados. [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional.
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2666/Torrespaula2016.pdf?sequence=2>
- Vivo en Italia. (s.f.). *Reciclaje de llantas usadas: La nueva economía ecológica*. vivoenitalia.com:
http://www.vivoenitalia.com/wp-content/uploads/2009/05/reciclaje-de-llantas-usadas_la-nueva-economia-ecologica.pdf
- Way, G. (2016). *Testing and Evaluation of HMA Materials:Sustainability, Recycling, Rubberized Asphalt*. IRF Global.
- Widyatmoko, E. (2007). *A review of the use of crumb rubber modified asphalt worldwide*. Waste & Resources Action Programme (WRAP).
- Wilches Gómez, L. M., & Villegas Camargo, J. D. (2019). Utilización de mezcla asfáltica natural (MAN), procedente de la mina San Pedro, ubicada en el municipio de Armero Guayabal, departamento del Tolima, Colombia, con adición de gránulo de caucho reciclado (GCR), para reparcho localizado. Reparcheo ecológico. [Tesis de Maestría, Universidad Santo Tomás]. Repostorio Institucional. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/17951>
- Yang, X., Han, J., Leshchinsky, D., & Parsons, R. L. (2016). A three-dimensional mechanistic-empirical model for geocell-reinforced unpaved roads. *Acta Geotechnica*(8), 201-213.
<https://doi.org/10.1007/s11440-012-0183-6>
- Zamudio, J. M. (2019). *La llanta como material arquitectónico*. Universidad Católica de Manizales. <https://docplayer.es/65907056-La-llanta-como-material-arquitectonico.html>