

**Análisis comparativo de los impactos ambientales generados por la producción de dos tipos de mezclas asfálticas: Uno producido con materiales vírgenes y otro elaborado con materiales reciclados**

**José Manuel Anteliz Álvarez**

**Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil**

**Director**

**Vladimir Plata Chávez**

**Doctor en Ingeniería Química**

**Universidad Santo Tomás, Bucaramanga**

**División de Ingenierías y Arquitectura**

**Facultad de Ingeniería Civil**

**2024**

### **Agradecimientos**

A Dios, por ser el guía de mi vida y llevarme a tan anhelada meta, como lo es alcanzar el título de ingeniero civil.

A mi familia, sin ellos nada de esto sería posible.

A mi director, el profesor Vladimir Plata Chávez por brindarme su conocimiento y apoyo incondicional durante este proyecto de investigación.

A la Universidad Santo Tomás y especialmente a todos los profesores de la facultad de ingeniería civil que hicieron parte de mi formación académica.

Finalmente, a todas las personas que hicieron parte de este proceso, gracias.

### **Dedicatoria**

En este momento de logro y culminación, quiero dedicar esta tesis a las mujeres que han sido mi inspiración constante, mi roca en los momentos difíciles y mi guía a lo largo de este viaje académico, a mi madre Marianela Álvarez y mi abuela Norys Páez, sus sacrificios, amor incondicional y apoyo incansable han sido los pilares sobre los cuales he construido mi educación y mi vida. Cada paso que he dado en este camino ha sido posible gracias a su aliento y su ejemplo.

En honor a mi amado padre Olsen Anteliz y mi abuelo Luis Álvarez, su espíritu y amor continúan guiándome en cada en cada paso de mi vida y ahora a la culminación de este proyecto. Sus consejos, apoyo incondicional y amor han sido la fuerza impulsora detrás de cada página escrita. Aunque físicamente ya no estén conmigo, su espíritu perdurará en cada logro alcanzado. Esto es por ustedes.

Por último, a mi amada familia, por su amor, apoyo y constante inspiración. Gracias por estar siempre a mi lado.

*José Manuel Anteliz*

**Contenido**

Introducción .....	11
1. Análisis comparativo de los impactos ambientales generados por la producción de dos tipos de mezclas asfálticas: uno producido con materiales vírgenes y otro elaborado con materiales reciclados .....	12
1.1 Planteamiento del problema .....	12
1.2 Justificación.....	13
1.3 Objetivos .....	14
1.3.1 Objetivo general .....	14
1.3.2 Objetivos específicos.....	14
2. Marco referencial .....	15
2.1 Marco teórico .....	15
2.1.1 Metodología análisis de ciclo de vida (ACV) .....	15
2.1.2 Impactos ambientales del proceso de pavimentación.....	17
2.2 Marco conceptual .....	21
2.2.1 Mezclas asfálticas .....	21
2.2.2 Tipos de mezclas asfálticas.....	21
2.2.3 Mezcla asfáltica reciclada.....	22
2.3 Marco legal.....	23
3. Metodología .....	24
4. Resultados .....	29

4.1 Análisis de información secundaria sobre los posibles impactos ambientales generados tanto por mezclas asfálticas elaboradas a partir de materiales vírgenes como aquellas elaboradas con materiales reciclables. ....	30
4.2 Estado del arte de los impactos ambientales generados por mezclas asfálticas elaboradas a partir de materiales vírgenes y material reciclado.....	33
4.3 Análisis del Ciclo de Vida materiales asfálticos convencionales y asfálticos.....	39
4.4 Principales diferencias entre ambos tipos de mezclas asfálticas.....	46
5. Conclusiones.....	49
Referencias.....	51

**Lista de tablas**

<b>Tabla 1.</b> <i>Análisis comparativo impacto ambiental 20 años de una estructura de pavimento de 1 km</i> .....	40
<b>Tabla 2.</b> <i>Kg de CO2 emitido por fases asociadas a la estructura de construcción de pavimento a 20 años</i> .....	40
<b>Tabla 3.</b> <i>Diferencias entre ambos tipos de mezclas</i> .....	46

**Lista de figuras**

<b>Figura 1.</b> <i>Etapas de la metodología</i> .....	25
<b>Figura 2.</b> <i>Publicaciones relacionadas 2018-2023</i> .....	30
<b>Figura 3.</b> <i>Clasificación de publicaciones por tipo de documento</i> .....	32
<b>Figura 4.</b> <i>Impacto ambiental generado por los materiales asfálticos convencionales</i> .....	35
<b>Figura 5.</b> <i>Diagrama de flujo de reciclado de pavimento asfáltico regenerado (RAP) y horno de arco eléctrico en el caso de estudio</i> .....	42
<b>Figura 6.</b> <i>Impactos ambientales relacionados con las mezclas analizadas</i> .....	43
<b>Figura 7.</b> <i>Comparativo impacto ambiental escoria de acero vs material virgen</i> .....	44

### **Resumen**

La producción y construcción de mezclas asfálticas tradicionales a partir de materiales naturales tiene importantes repercusiones medioambientales a lo largo de su ciclo de vida, incluidas el consumo de recursos, las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación del transporte. Sin embargo, tecnologías como el reciclado a baja temperatura y el asfalto cauchutado ofrecen alternativas más sostenibles al reducir el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Los estudios de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) han demostrado que las mezclas convencionales tienen un alto impacto medioambiental debido a las emisiones y al consumo de recursos, mientras que las mezclas que utilizan materiales reciclados, como el RAP, tienden a ser más sostenibles al reducir la necesidad de extracción de recursos naturales y las emisiones relacionadas con el transporte. La distancia de transporte también afecta a los beneficios medioambientales de las mezclas que utilizan materiales reciclados. En conclusión, las mezclas asfálticas que utilizan materiales reciclados tienen un menor impacto sobre los recursos, la energía y los residuos, lo que pone de relieve la importancia de utilizar métodos más sostenibles en la construcción de carreteras.

*Palabras clave:* materiales reciclados, mezclas asfálticas, materiales vírgenes

### **Abstract**

The production and construction of traditional asphalt mixes from natural materials has significant environmental impacts throughout their life cycle, including greenhouse gas emissions, resource consumption and transportation pollution. However, technologies such as low-temperature recycling and rubberized asphalt offer more sustainable alternatives by reducing energy consumption and greenhouse gas emissions.

Life Cycle Assessment (LCA) studies have shown that conventional mixes have a high environmental impact due to emissions and resource consumption, while mixes using recycled materials, such as RAP, tend to be more sustainable by reducing the need for natural resource extraction and transport-related emissions. Transport distance also affects the environmental benefits of mixtures using recycled materials. In conclusion, asphalt mixtures using recycled materials have a lower impact on resources, energy and waste, highlighting the importance of using more sustainable methods in road construction.

*Keywords:* Recycled materials, asphalt mixtures, virgin materials

### Siglas

RAP: pavimento asfáltico reciclado (por sus siglas en inglés Reclaimed Asphalt Pavement).

ACV: Análisis del ciclo de vida.

ODS: Objetivos de desarrollo sostenible.

ISO: Organización internacional de normalización (por sus siglas en inglés International Organization for Standardization).

ICV: Inventario de ciclo de vida.

CFC: CloroFluoroCarbonos.

DBO: Demanda bioquímica de oxígeno.

CST: Pendiente crítica de desgranamiento.

GEI: Gases efecto invernadero.

MDC: Mezclas densas.

AC: Hormigón asfáltico.

RCD: Residuos de construcción y demolición.

WMA: Mezclas asfálticas tibias.

HMA: Mezclas asfálticas en caliente.

EAF: Escoria de arco eléctrico.

DOB: Demanda de oxígeno biodegradable.

INVIAS: Instituto nacional de vías.

## **Introducción**

La infraestructura vial juega un papel primordial en la conectividad y el desarrollo económico de las sociedades modernas. Sin embargo, la construcción, así como el mantenimiento de carreteras conlleva una serie de desafíos ambientales significativos. En este contexto, la producción de mezclas asfálticas, que son utilizadas en la pavimentación de carreteras, se ha convertido en un punto crítico de atención debido a sus posibles impactos negativos en el medio ambiente. Desde esta perspectiva, la presente investigación de tipo cualitativa, apoyada en un Análisis del Ciclo de Vida de los materiales asfálticos tuvo como objetivo analizar los impactos ambientales generados por la producción de mezclas asfálticas con materiales vírgenes frente a los derivados de la preparación de mezclas asfálticas con materiales reciclados.

Teniendo en cuenta lo anterior, a partir de la revisión documental fue posible determinar que los principales impactos que busca reducir el uso de agregados RAP es la emisión de gases de efecto invernadero, contaminación auditiva y el consumo de los recursos naturales para la extracción de materiales vírgenes como sucede en el caso de los productos de construcción convencionales. Sin embargo, a partir del análisis de los estudios de ACV realizados se estableció que el grado de sostenibilidad de las mezclas asfálticas con agregados RAP depende del tipo de material, las técnicas y tecnologías empleadas durante su procesamiento.

# **1. Análisis comparativo de los impactos ambientales generados por la producción de dos tipos de mezclas asfálticas: uno producido con materiales vírgenes y otro elaborado con materiales reciclados**

## **1.1 Planteamiento del problema**

La producción de mezclas asfálticas genera impactos ambientales negativos al aire, agua y suelo. Al aire puesto que se incrementan las emisiones a la atmósfera debido a la explotación de canteras, utilización de maquinarias, transporte de material, proceso de obtención de las mezclas asfálticas. Al agua debido a la alteración de los hábitats naturales como consecuencia directa de estas actividades industriales, las cuales ponen en riesgo la salud reproductiva de las poblaciones locales y la sostenibilidad de su modo de vida [1]. Y al suelo puesto que “la extracción de materiales degrada el suelo, causando erosión e inestabilidad, también un incremento en metales pesados y tóxicos como el cobre, el níquel, el zinc y el boro, estos metales impiden la recuperación y regeneración del manto vegetal [2].

Por otra parte, los residuos sólidos generados durante el mantenimiento y rehabilitación de las vías usualmente no son aprovechados y terminan en rellenos sanitarios. Sin embargo, existen diversas investigaciones y legislaciones que promueven el uso de estos residuos conocidos como pavimento asfáltico reciclado (RAP por sus siglas en inglés) para la creación de nuevos pavimentos [3].

La inclusión de material reciclado en la preparación de nuevos pavimentos contribuye con la reducción de los impactos, puesto que se disminuye la extracción de nuevas materias primas y el volumen de desechos generados [4].

Teniendo en cuenta lo expuesto, el objetivo central de este trabajo es realizar una revisión bibliográfica enfocada en los estudios que aplican el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para evaluar los impactos ambientales en la producción de pavimentos. Específicamente, se busca comparar los efectos ambientales resultantes de la fabricación de mezclas asfálticas convencionales frente a aquellas producidas utilizando materiales reciclados. Mediante el empleo de la metodología ACV, esta investigación pretende proporcionar un análisis detallado y sistemático que contribuya a una mejor comprensión de las implicaciones ambientales de estas prácticas en el sector de la construcción de carreteras [5].

## **1.2 Justificación**

El pavimento flexible es muy utilizado en Colombia, entre las ventajas que presenta es que su costo de mantenimiento durante su vida útil es menos de una cuarta parte del correspondiente a los pavimentos rígidos [1].

En los últimos años se ha evaluado la incorporación de residuos en las mezclas asfálticas, en muchos casos, esta adición presenta ventajas en las propiedades físicas, mecánicas y geológicas del material, sin embargo, en algunos casos no queda claro si existe una disminución de los impactos ambientales causados, más allá en la ventaja técnica que se tenga en su adición [4].

El estudio de la incorporación de residuos en nuevas mezclas asfálticas está en concordancia con los “ODS 9 (industria innovación e infraestructura),11 (ciudades y comunidades sostenibles),12 (producción y consumo responsables) y 13 (acción por el clima) que se enmarcan en la agenda de desarrollo mundial hasta el año 2030” [6].

A nivel nacional la resolución 1257 del 2021 del Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible promueve el cierre de ciclos materiales, el aprovechamiento de subproductos y

determina requisitos a cumplir, los cuales se utilizan para la creación de mezclas asfálticas y de esa manera mitigar el impacto ambiental, que generan por la explotación de materiales vírgenes [7].

Por lo tanto, este proyecto, plantea comparar los impactos ambientales producidos por la producción de mezclas asfálticas con materiales vírgenes con los impactos ambientales que emergen de la preparación de mezclas asfálticas con materiales reciclados mediante una revisión bibliográfica de artículos científicos que utilicen la metodología de Análisis de ciclo de vida, (ACV), como método para evaluar los impactos ambientales.

### **1.3 Objetivos**

#### ***1.3.1 Objetivo general***

Analizar los impactos ambientales generados por la producción de mezclas asfálticas con materiales vírgenes frente a los derivados de la preparación de mezclas asfálticas con materiales reciclados, para la obtención de una base científica que soporte la toma de decisiones en la selección de materiales más sostenibles para la construcción y mantenimiento de pavimentos.

#### ***1.3.2 Objetivos específicos***

Generar un estado del arte a partir de información secundaria los posibles impactos ambientales generados tanto por mezclas asfálticas elaboradas a partir de materiales vírgenes como aquellas elaboradas con materiales reciclables.

Describir a través de la metodología de análisis de ciclo de vida los principales impactos ambientales generados en la producción de las dos mezclas asfálticas estudiadas.

Establecer las diferencias entre las mezclas asfálticas estudiadas a partir de un análisis comparativo entre los impactos ambientales identificados en el ciclo de vida de cada una.

## **2. Marco referencial**

### **2.1 Marco teórico**

El marco teórico responde a las principales teorías relacionadas con el estudio. En una etapa inicial se define el análisis de ciclo de vida y sus fases con la finalidad de comprender dicha metodología. Seguidamente se realiza una definición sobre los impactos ambientales, teniendo en cuenta el ACV, mencionado con anterioridad, Finalmente se hace un recuento sobre ACV realizados en pavimentos.

#### ***2.1.1 Metodología análisis de ciclo de vida (ACV)***

El ACV es definida por la ISO 14040 como una herramienta para determinar los impactos ambientales potenciales de un producto, bien o servicio, desde la consecución de la materia prima, hasta la producción, uso y disposición final, es decir las entradas y salidas que ingresan a un proceso unitario hasta la finalización de su ciclo, en ella se incluyen: materiales, energía y desechos [8].

##### **2.1.1.1 Existen cuatro fases en un estudio de ACV.**

***2.1.1.1.1 La fase de definición del objetivo y el alcance.*** En esta etapa no se calculan ni se toman datos. Se centra en la formulación de preguntas, para definir los límites en el sistema. Estos límites dependen del tema y uso previsto del estudio. Por ende, para realizar un análisis de ciclo

de vida adecuado, es fundamental seleccionar correctamente la unidad funcional. Esta representa un proceso clave que puede sufrir variaciones dependiendo de los materiales empleados y de cualquier aditivo que se incorpore durante el proceso. Esta elección es crucial, ya que determina la relevancia y la exactitud de los resultados del análisis. El alcance puede diferir en su profundidad y amplitud, dependiendo del objetivo de un ACV en particular.

**2.1.1.1.2 La fase de análisis de inventario (ICV).** Es la segunda fase del ACV. Es un inventario de los datos de entrada y de salida compilados y cuantificados, construyéndose en base a las unidades del proceso las cuales deben ser cuantificadas, mediante diagramas de flujo, recolección de datos y cálculos de entrada y salida por cada proceso unitario.

**2.1.1.1.3 Evaluación del impacto del ciclo de vida.** Esta tercera fase comprende y evalúa la magnitud que tienen los impactos ambientales, mediante la selección de categorías de impacto e indicadores de categoría de impacto, identificando el elemento central de la evaluación la cual es la categoría del impacto

**2.1.1.1.4 La etapa de interpretación del ciclo de vida representa la conclusión del análisis del ciclo de vida (ACV).** En esta fase crucial, se consolidan, examinan y discuten los datos recopilados en las etapas previas. Este proceso es esencial para formular conclusiones coherentes, emitir recomendaciones pertinentes y facilitar la toma de decisiones estratégicas, todo ello alineado con los objetivos y el alcance previamente establecidos del estudio.

### ***2.1.2 Impactos ambientales del proceso de pavimentación***

La construcción, el mantenimiento y la operación de las vías carretables precisan de significativas cantidades de energía y materiales, generando a su vez impactos ambientales y económicos relevantes. Estos impactos generan alteraciones en el consumo de agua superficial o subterránea, consumo de minerales, alteración de la flora y actividades migratorias de la fauna, unidas a los aspectos ambientales por emisiones.

Entre las principales categorías de impactos ambientales que pueden ser generados en este proceso se destacan:

Cambio climático, “El incremento de la concentración de gases que generan el efecto invernadero tales como el dióxido de carbono, ozono, metano y óxido nítrico, han sido uno de los factores principales que incrementa esta problemática global” [9].

Estos gases actúan como una barrera que bloquea la salida de las radiaciones ultravioletas hacia el espacio exterior. Al impedir que estas radiaciones se disipen, se acumulan en la atmósfera terrestre, reteniendo calor. Este fenómeno es uno de los principales contribuyentes al incremento de la temperatura global, lo que agrava el problema del calentamiento global y sus efectos en el clima de nuestro planeta [10].

Frente a esto, se tiene que la construcción es uno de los mayores consumidores de materias primas. El sector cementero, a pesar de su relevancia en la industria de la construcción, enfrenta el desafío significativo de reducir su impacto ambiental. Con aproximadamente el 5% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub>, el cemento se erige como uno de los principales contribuyentes al efecto invernadero y al cambio climático. Esta preocupación se fundamenta en la magnitud de su producción: anualmente, se emplean alrededor de 1.6 billones de toneladas de cemento en todo el mundo, cada una de las cuales representa una emisión de 1 tonelada de CO<sub>2</sub> a la atmósfera durante

su fabricación. Es evidente que se requieren medidas urgentes y sostenibles para mitigar este impacto negativo y avanzar hacia prácticas más eco amigables en el sector [11].

Ahora bien, la huella de carbono o las emisiones de CO<sub>2</sub> en los pavimentos urbanos de acuerdo con Francalacci (2010), señala que los pavimentos pétreos de concreto in situ, son los que más ocasionan impacto ambiental (213 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>, los empedrados con materiales pétreos los que menos impacto generan 14 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>). En los pavimentos de asfalto el material de cementación es el cemento asfáltico de petróleo (CAP) o llamado Bitumen, tiene alto contenido de carbono que en promedio es del orden de 82%, y el CAP constituye 5% de un pavimento de asfalto, siendo el resto los agregados - piedra, arena y grava [12].

Depleción de la capa de ozono. La degradación de la capa de ozono inicia en la superficie terrestre con la liberación de diversos gases que actúan como precursores de compuestos halogenados, los cuales incluyen, principalmente, elementos como el cloro y el bromo. Estos gases, al ascender a la atmósfera, se descomponen y liberan átomos de cloro y bromo. Una vez en la estratosfera, estos átomos reaccionan con el ozono, descomponiéndolo y debilitando así esta capa protectora que resguarda la vida en la Tierra de la radiación ultravioleta nociva. “Los CFCs y los halones son los principales gases originados por el hombre que destruyen el ozono estratosférico” [13].

Calidad del aire. “La generación de material particulado, al igual que gases de procesos de combustión y gases desprendidos de los procesos de pavimentación con asfaltos calientes, alteran significativamente la calidad del aire” [4]. Por ende, el transporte de materiales de construcción y el uso de maquinaria pesada afectan significativamente la calidad del aire debido a la emisión de partículas suspendidas en la atmósfera. Asimismo, los vehículos que circulan por las carreteras

durante estas operaciones emiten gases de combustión, lo que agrava aún más la contaminación atmosférica y contribuye al deterioro ambiental.

Acidificación. Se caracteriza por la deposición de ácidos resultantes de la liberación de óxidos de nitrógeno y sulfuro en la atmósfera, en el suelo y en el agua, donde puede variar la acidez del medio, cuyos efectos negativos recaen sobre la flora y fauna que habita en él, además produce deforestación y también puede afectar a los materiales de la construcción [14].

Eutrofización. Esta categoría engloba los impactos generados por altas concentraciones de macronutrientes, específicamente nitrógeno y fósforo. El aumento en los niveles de estos nutrientes puede provocar un incremento en la producción de biomasa en los ecosistemas acuáticos, lo cual a su vez puede resultar en una proliferación de algas. Este fenómeno de floración algal contribuye a una reducción del oxígeno disponible en el agua, ya que la descomposición de la biomasa acuática eleva la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), comprometiendo la salud y la diversidad del ecosistema acuático. “El fatal escenario es que desaparece cualquier tipo de vida aeróbica, el proceso de eutrofización aumenta en verano” [14].

Toxicidad humana. En esta categoría se contemplan los efectos sobre los humanos, de las sustancias tóxicas existentes en el ambiente, afectando las áreas de protección de la salud humana. En este sentido de acuerdo a la caracterización a través del método CST, en este caso se caracterizan factores como los kg de plomo en el aire por kilo de sustancia, para toxicidad de zinc en el agua.

Ecotoxicidad. Con frecuencia los medios acuáticos son receptores de las acciones nocivas de la actividad industrial principalmente; en ellos reposan un sinnúmero de contaminantes orgánicos e inorgánicos, los cuales posterior a análisis de laboratorio dan prueba de manera general

de los impactos tóxicos que las mezclas asfálticas generan en los ambientes acuícolas de agua dulce [5].

Agotamiento de las fuentes de energía. “El agotamiento de fuentes de energía equivale al producto de la renta unitaria de los recursos y las cantidades físicas de la energía extraída. Comprende petróleo crudo, gas natural y carbón” [15].

Impactos del uso de la tierra. La carpeta asfáltica está elaborada con una gran variedad de componentes altamente tóxicos, que, al contacto con el suelo generan contaminación no solo a las áreas donde se instala carpeta asfáltica, sino del ecosistema circundante mediante los procesos de infiltración; “de igual forma durante la pavimentación se generan residuos al contacto con el suelo los cuales alteran las condiciones fisicoquímicas del suelo” [4].

Impactos del uso del agua. El escurrimiento y transporte de los residuos de la pavimentación llevado a cabo por acción del agua y el viento, son los principales factores que hacen que los contaminantes lleguen a las fuentes hídricas cercanas, contaminando y alterando la calidad fisicoquímica de este recurso, este impacto genera que los cuerpos de agua no sean aptos para consumo o potabilización para ingesta humana, al igual que altera las condiciones para la vida de microorganismos, el 33.3% de los estudios relacionan este impacto en la etapa de pavimentación en la construcción de vías a nivel nacional [4].

Ahora bien, de los tipos de impacto ambiental se identifican por la actividad principal a realizar, detallada por el informe ambiental, la evaluación inicial, la evaluación simplificada y la evaluación detallada. Los informes ambientales son indicadores de incidentes ambientales junto con los análisis ambientales asociados que describen las acciones a tomar para limitarlos y controlarlos. Se realizan evaluaciones iniciales para describir las evaluaciones de impacto iniciales de cada actividad realizada. La evaluación simple proporciona la profundidad promedio del estudio

de impacto ambiental, mientras que la evaluación detallada proporciona una idea de por qué las actividades estudiadas son importantes para el proyecto [16].

## **2.2 Marco conceptual**

### ***2.2.1 Mezclas asfálticas***

La mezcla asfáltica se puede definir como una combinación de agregados minerales, aglomerados mediante un ligante asfáltico y mezclados de tal manera que los agregados pétreos queden cubiertos por una película uniforme de asfalto. Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el comportamiento funcional de la misma como pavimento [17].

Por su parte, El asfalto natural es un material que se origina a través de un proceso geológico durante el cual se da la infiltración de asfalto en capas de arena. Este producto mineral se caracteriza por su color negro, textura liviana y quebradiza, además de poseer muy pocas impurezas y un alto valor calórico. Se compone de sustancias bituminosas que se forman a partir de la destilación natural de hidrocarburos del petróleo, cuyas fracciones más volátiles han evaporado en las profundidades terrestres a lo largo del proceso de migración del petróleo hacia la superficie, es decir, “el crudo que existió en las regiones donde hay yacimientos del material, ascendió y sufrió un proceso de refinación natural, impregnando totalmente el suelo y dando origen a esta materia” [18].

### ***2.2.2 Tipos de mezclas asfálticas***

La clasificación de las mezclas asfálticas, se hace de acuerdo con el parámetro estimado que permita establecer las diferencias. En este sentido, En el proceso de elaboración de las mezclas

asfálticas, los diferentes tipos de agregados pétreos desempeñan un papel crucial. Estos se clasifican en diversas categorías según su composición y uso: mástico asfáltico, mortero asfáltico, macadam asfáltico y concreto asfáltico. Adicionalmente, otro criterio fundamental para la clasificación de estas mezclas es la temperatura a la que se preparan y aplican, distinguiendo entre mezclas en frío y mezclas en caliente. Esta diferenciación es esencial para determinar las propiedades y la aplicabilidad del material en diversos contextos de construcción y mantenimiento vial.

Donde las Mezclas en frío se caracterizan por el porcentaje de vacíos de aire, subdividiéndose en cerradas, densas, semidensas y semicerradas; también pueden ser abiertas y porosas, considerando si al menos tienen menos del 6%, entre el 6 y el 12% de vacíos de aire, entre el 12 y el 18% o más del 20%, respectivamente.

Por su parte, la mezcla en caliente está tipificada de esta forma, debido a que tanto el agregado pétreo, como el asfalto, se calientan antes del mezclado; es un tipo de mezcla compuesta por un 93 a 97 % de agregado pétreo y por un 3 a 7 % de asfalto, con respecto a la masa total de la mezcla. Otra clasificación, se establece de acuerdo con la estructura de los agregados pétreos; así, se tienen mezclas con o sin esqueleto mineral. Si se considera la curva granulométrica, se clasifican en mezclas asfálticas continuas o mezclas discontinuas [17].

### ***2.2.3 Mezcla asfáltica reciclada***

El material de pavimento que se obtiene durante el proceso de retirada del pavimento asfáltico, con fines de rehabilitación o reconstrucción vial, se compone de asfalto y agregados. Este material, una vez retirado o procesado, es conocido por su capacidad de ser reutilizado en la creación de nuevas superficies viales, ofreciendo una solución sostenible y eficiente para la gestión

de recursos en proyectos de infraestructura vial. Cuando el material retirado se procesa, se obtiene una granulometría variada cuyas características de contenido ligante adherido marcan un límite para su uso. Un aspecto a destacar respecto a este material que posee cualidades envejecidas causadas por efectos ambientales como el agua y el calor, es que estas condiciones en el contenido del asfalto favorecen la utilización de menos aglutinante virgen, lo que se traduce en la disminución de su costo. Por otra parte, bajo estas condiciones su uso está permitido hasta en un 40% [19].

Ahora bien, el principal objetivo de los materiales o mezclas asfálticas convencionales es restituir las propiedades originales. Para incorporar el RAP en las mezclas asfálticas existen diversas maneras: In situ o “en el lugar” que en este caso puede ser en caliente o en frío, en el cual se utilizan equipos de compactación autopropulsados como máquinas que realizan todas las operaciones de manera consecutiva: fresado, mezclado, extendido y en algunos casos la precompactación del material. El otro tipo de reciclado es en Planta o “fuera del sitio” que en este caso tiene tres variantes posibles: en caliente, frío o tibio. El más utilizado es la mezcla asfáltica en caliente y en planta, puesto que, los ligantes utilizados pueden ser de diferente consistencia (convencionales o modificados) con la posible adición de agentes rejuvenecedores para lograr la reactivación del asfalto envejecido de la mezcla [20].

### **2.3 Marco legal**

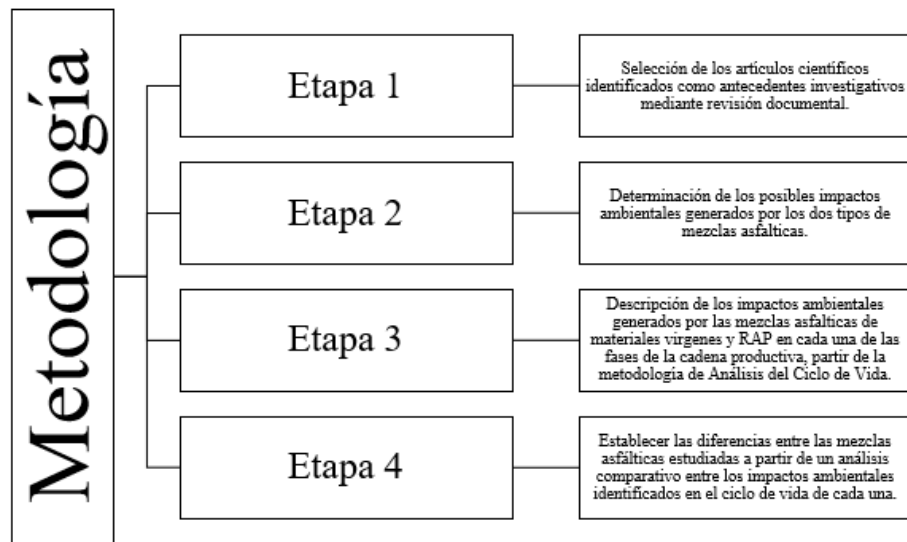
A continuación, se presentan las normativas revisadas durante la investigación de los impactos ambientales que se generan de acuerdo a la utilización de mezclas asfálticas convencionales y mezclas alternativas.

- Especificaciones Generales de construcción de Carreteras.
- Art. 320 – 22 I.N.V.E Subbase Granular.

- Art. 330 – 22 I.N.V.E Base Granular.
- Art. 450 – 22 I.N.V.E Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (Concreto asfáltico).
- Art. 421 – 22 I.N.V.E Riego de liga.
- Art. 460 – 22 I.N.V.E Fresado de pavimento asfáltico.
- Art. 451 – 22 I.N.V.E Mezcla abierta en caliente
- Guías Metodológica para el Diseño de Obras de Rehabilitación de pavimento asfáltico de Carreteras.
- Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con medios y altos volúmenes de tránsito.
- Resolución 0472 de 2017 por parte del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible gestión de residuos de actividades de construcción y demolición.

### **3. Metodología**

La presente monografía será el resultado de la elaboración de un estado del arte enmarcado en los conceptos descriptivos, analísticos y explicativos de la investigación, enfocada principalmente en el análisis de los preceptos teóricos resultantes de estudios previos y la diferenciación de los impactos ambientales causados por dos tipos de mezclas asfálticas, a partir de la incorporación de materiales reciclados o RAP y material virgen. Para ello, se realizarán las siguientes etapas que se logran evidenciar en la Figura 1.

**Figura 1.** *Etapas de la metodología*

Las etapas que se describen en los siguientes apartados permitirán dar cumplimiento a los objetivos específicos de la investigación. En primer lugar, se elaborará un estado del arte a partir de la información secundaria recopilada mediante una revisión documental referente a los posibles impactos ambientales generados por ambos tipos de mezclas asfálticas. Posteriormente, se llevará a cabo la descripción de la metodología de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) para determinar los impactos ambientales por cada mezcla en las diferentes etapas del ciclo de vida de los materiales. Finalmente, se realizará un análisis de las diferencias existentes entre ambos tipos de mezclas asfálticas, tomando como aspecto principal los impactos ambientales generados a lo largo del ciclo de vida.

*Etapa 1. Selección de los artículos científicos identificados como antecedentes investigativos mediante revisión documental*

Esta etapa comprenderá la selección de los antecedentes investigativos que suministraron el soporte teórico para la construcción de la monografía. En tal medida, se llevará a cabo un proceso minucioso de selección de las bases de datos y los comandos de búsqueda que permitieran

abarcando la información de mayor relevancia para la investigación. Bajo esa perspectiva, para garantizar la exhaustividad y calidad de la revisión documental, se optará por utilizar varias bases de datos científicas reconocidas en el campo de la ingeniería y la ciencia ambiental, tales como Science Direct por su amplia cobertura de revistas científicas multidisciplinarias; MDPI Journal List por la trayectoria de las revistas en temas relacionadas con la temática objeto de estudio y Google Scholar como fuente complementaria de información que no estuviera disponible en las bases de datos convencionales.

*Etapas 2. Determinación de los posibles impactos ambientales generados por los dos tipos de mezclas asfálticas.*

Durante esta etapa se dará respuesta al objetivo específico número 1 del trabajo de monografía y será desarrollado tomando en cuenta los siguientes aspectos:

Esta fase implicará identificar y analizar las fuentes de contaminación, tales como emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en las distintas etapas del ciclo de vida de las mezclas asfálticas. Se menciona que estas fuentes están relacionadas con la producción de materias primas, la producción de las mezclas asfálticas, su transporte, la pavimentación y la laminación. Se analizará el impacto de estas emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O en el medio ambiente. Asimismo, se tendrá en cuenta los siguientes aspectos del análisis de ciclo de vida:

- Examen de la vida útil estimada de las secciones de carreteras rehabilitadas con mezclas asfálticas recicladas y comparación con las rehabilitadas con métodos convencionales.
- Consideración del espesor de las capas recicladas y su importancia en el rendimiento.
- Evaluación del rendimiento en términos de resistencia estructural y durabilidad.
- Identificación de retos y limitaciones en la utilización de mezclas asfálticas con materiales reciclados, como las restricciones en el uso del reciclaje en caliente.

- Consideración de factores que limitan el uso efectivo de materiales reciclados, como el grado de mezcla de ligantes vírgenes y reciclados.

Se destacarán algunos modelos como el ECCO2 para analizar los efectos ambientales de la producción de mezclas asfálticas y su utilidad tanto para anticipar impactos como para evaluar innovaciones en materiales y procesos de producción.

*Etapas 3. Descripción de los impactos ambientales generados por las mezclas asfálticas de materiales vírgenes y RAP en cada una de las fases de la cadena productiva, partir de la metodología de Análisis del Ciclo de Vida*

La utilización de metodologías de ACV se menciona en varios puntos, ya que es esencial para cuantificar los impactos ambientales a lo largo de todo el ciclo de vida de las mezclas asfálticas. Se resalta su importancia en la evaluación de diferentes opciones y tecnologías.

Se analizarán los impactos ambientales de la extracción de las materias primas necesarias para la producción de mezclas asfálticas. Esto incluirá la evaluación de la extracción de agregados y la extracción y refinación de petróleo crudo para la producción de aglutinante bituminoso.

Se evaluarán los impactos ambientales relacionados con la producción de las mezclas asfálticas en sí. Se consideró el consumo de energía, las emisiones de Gases de Efecto Invernadero y otros contaminantes, así como el uso de recursos durante la fabricación.

Se tomará en cuenta la evaluación de los impactos ambientales asociados con el transporte de materiales, ya sea en forma de materias primas hacia la planta de producción o como mezclas asfálticas hacia el lugar de pavimentación. Esto implicará la evaluación de emisiones durante el transporte y el consumo de combustibles.

Se examinarán los impactos ambientales generados durante la pavimentación y compactación de las mezclas asfálticas en el sitio de construcción. Esto incluirá la evaluación de las emisiones de maquinaria y equipos, así como el consumo de energía en estas etapas.

Se considerará el impacto ambiental de las mezclas asfálticas una vez que estuvieron en uso como parte del pavimento. Se analizará la durabilidad, el mantenimiento y las emisiones a lo largo de la vida útil del pavimento.

*Etapa 4. Establecer las diferencias entre las mezclas asfálticas estudiadas a partir de un análisis comparativo entre los impactos ambientales identificados en el ciclo de vida de cada una.*

Se destacará la importancia de comparar los impactos ambientales de las mezclas asfálticas convencionales (producidas con materiales vírgenes) y las alternativas que utilizan materiales reciclados. Para tal efecto, se tomarán en consideración los siguientes aspectos durante la revisión documental:

- Evaluación de la extracción de recursos naturales en las mezclas asfálticas con materiales vírgenes, incluyendo la extracción de petróleo crudo y agregados pétreos.
- Comparación con el proceso de extracción de recursos en mezclas asfálticas que utilizan agregados reciclados, como asfalto fresado o residuos de construcción.
- Impacto ambiental de la extracción, como la degradación del suelo y la destrucción de hábitats naturales.
- Análisis del consumo de energía en la producción de mezclas asfálticas con materiales vírgenes, considerando procesos como la destilación del petróleo crudo.
- Comparación con el consumo de energía en la producción de mezclas con agregados reciclados, destacando las ventajas en términos de ahorro energético.

- Evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero y su relación con el consumo de energía.
- Descripción de cómo las mezclas asfálticas con materiales vírgenes a menudo generan residuos que deben ser eliminados o reciclados.
- Contraste con la capacidad de reciclaje y reutilización de materiales en las mezclas asfálticas que incorporan agregados reciclados.
- Impacto en la gestión de residuos y la reducción de la generación de residuos.
- Ventajas medioambientales del reciclaje de asfalto, como la reducción de la extracción de recursos naturales, el ahorro en transporte y la disminución del almacenamiento en vertederos.

#### **4. Resultados**

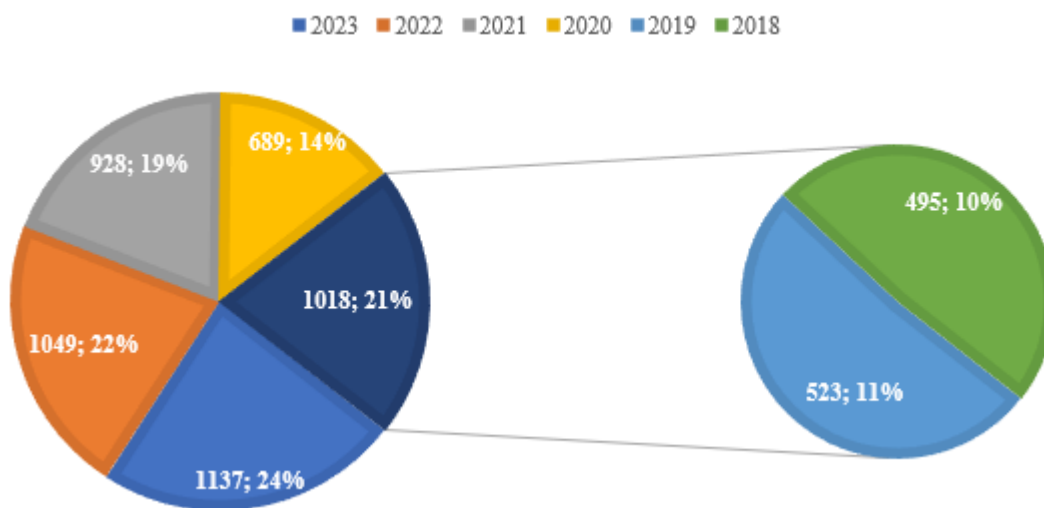
En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos en base a los objetivos específicos planteados para esta investigación. En primer lugar, se ha generado un estado del arte a partir de información secundaria, el cual proporciona una visión general de los posibles impactos ambientales asociados tanto a las mezclas asfálticas elaboradas con materiales vírgenes como a aquellas producidas con materiales reciclados. Posteriormente, se describe, mediante la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV), los principales impactos ambientales generados durante la producción de ambas mezclas asfálticas. Finalmente, se identifican las diferencias entre las dos mezclas mediante un análisis comparativo de los impactos ambientales identificados a lo largo de su ciclo de vida. Este capítulo presenta los hallazgos clave de cada una de estas etapas, proporcionando una comprensión profunda y estructurada de los efectos ambientales derivados de

la producción de mezclas asfálticas, lo cual es esencial para la promoción de prácticas más sostenibles en la ingeniería civil.

#### 4.1 Análisis de información secundaria sobre los posibles impactos ambientales generados tanto por mezclas asfálticas elaboradas a partir de materiales vírgenes como aquellas elaboradas con materiales reciclables

Para recopilar la literatura relevante, se diseñaron comandos de búsqueda específicos que incluyeran palabras clave relacionadas con la producción de mezclas asfálticas, materiales reciclados, impactos ambientales y cualquier otro término relevante. En el caso de Science Direct, se emplearon comandos como "Asphalt mixture production environmental impacts" y "Recycled materials in asphalt production", obteniendo un total de 4.821 resultados entre capítulos de libro, artículos, resúmenes de conferencias, discusiones y demás.

**Figura 2.** *Publicaciones relacionadas 2018-2023*

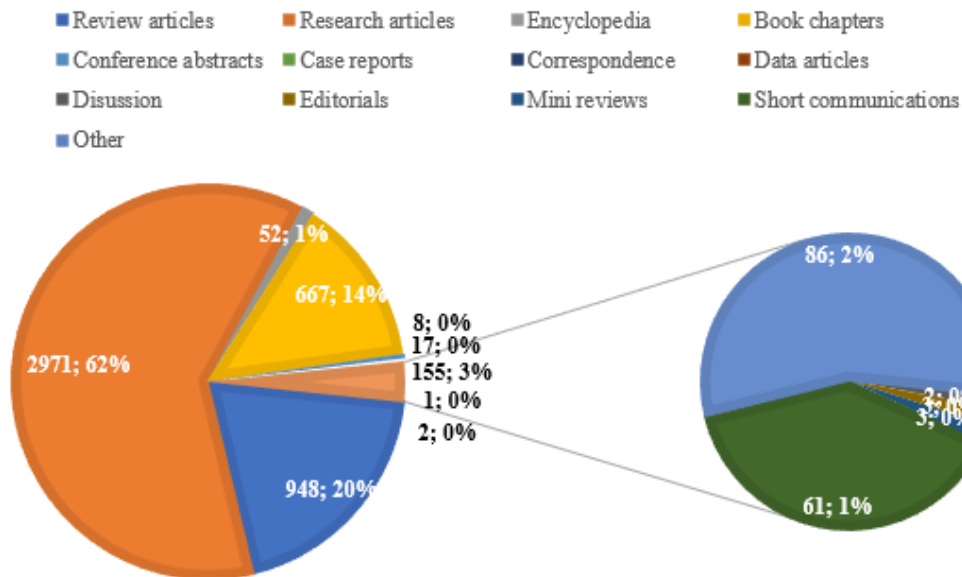


Como se puede observar en la figura 1, a partir del año 2018 la cantidad de publicaciones relacionadas con la temática objeto de estudio empezaron a mostrar un incremento considerable,

alcanzando más del doble a 2023. Sin embargo, pese a que se emplearon esos criterios de búsqueda también se encontraron diversas publicaciones que no denotaban una mayor relevancia para la investigación y fueron descartadas posteriormente. En la figura 2, se describen las tipologías de los artículos o publicaciones realizadas entre 2018 y 2023 que están divulgadas en la base de datos Science Direct.

La búsqueda en la base de datos Science Direct no incluyó artículos en español debido a que los estudios encontrados en este idioma no estaban directamente relacionados con la temática investigada y tendían a centrarse en aspectos más técnicos, como la resistencia de los materiales y sus propiedades físico-químicas. La representación de revistas en español en Science Direct es limitada, lo que restringe la disponibilidad de investigaciones recientes que se alineen con los intereses específicos de la monografía. Además, las diferencias lingüísticas y terminológicas afectaron la efectividad de las palabras clave para recuperar literatura pertinente en español.

Por otra parte, existe una tendencia de los investigadores en el campo de la ingeniería y ciencia ambiental a publicar en inglés, buscando una mayor visibilidad y alcance internacional. Esto se refleja en las directrices de varias revistas científicas que favorecen la publicación en inglés. Asimismo, las tendencias de investigación en el ámbito hispanohablante suelen no estar en consonancia con el enfoque ambiental de la producción de mezclas asfálticas, lo que resulta en una menor cantidad de estudios relevantes disponibles en español para este tema específico. Estos factores contribuyeron a la decisión metodológica de enfocar la búsqueda documental en literatura en inglés, que es más abundante y directamente relevante para los temas de la investigación.

**Figura 3.** Clasificación de publicaciones por tipo de documento

Mientras tanto, para MDPI Journal List se emplearon “Asphalt mixture” AND “sustainability” obteniendo 812 resultados, “Asphalt mixture” AND “RAP” obteniendo 399 resultados, “Asphalt mixture” AND “environmental impact” obteniendo 338 resultados. Por su parte, al tomar el criterio de búsqueda “impactos ambientales de las mezclas asfálticas vírgenes y recicladas” en el rango de tiempo entre 2019 a 2023, se obtuvieron 662 resultados en español y “environmental impacts of virgin and recycled asphalt mixes”, se obtuvieron 14.300 resultados en inglés. Sin embargo, estos resultados fueron filtrados buscando la relación directa con la problemática planteada, puesto que muchos de los estudios encontrados en cada una de las diferentes bases de datos hacían énfasis en los beneficios de rendimiento y resistencia de las mezclas convencionales o elaboradas con RAP, sin hacer énfasis en las etapas propuestas para esta revisión documental.

Los artículos que se eligieron estaban directamente relacionados con la producción de mezclas asfálticas y sus efectos ambientales, lo que implicó la necesidad de comandos de búsqueda

afinados a la base de datos de MDPI, ya que al aplicar los comandos empleados con ScienceDirect no arrojaban los resultados esperados. Además, se excluyeron los estudios que no estaban en español o inglés para asegurar la comprensibilidad y la relevancia geográfica de la investigación. También se descartaron aquellos que, por su antigüedad, no ofrecían datos actuales. La metodología incluyó una revisión minuciosa de los títulos y resúmenes para filtrar la información más pertinente antes de proceder a una evaluación más detallada. Este proceso garantizó que los artículos seleccionados cumplieran con los estándares de pertinencia y calidad exigidos para la investigación, lo que justifica la adaptación y refinamiento de las ecuaciones de búsqueda utilizadas.

#### **4.2 Estado del arte de los impactos ambientales generados por mezclas asfálticas elaboradas a partir de materiales vírgenes y material reciclado**

La producción de mezclas asfálticas tiene una huella de carbono propia, que abarca la liberación de emisiones de Gases Efecto Invernadero. Esta emisión primordialmente incluye dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), y proviene de diversas etapas como la producción de materias primas y mezclas asfálticas, su transporte, pavimentación, y laminación. En el proceso productivo, se originan fuentes de emisión de GEI, mayormente vinculadas al consumo energético de maquinarias y plantas. La producción de materias primas involucra actividades como la voladura de rocas, extracción, transporte, trituración y cribado para obtener los agregados, mientras que la producción de aglutinante bituminoso comprende la extracción, transporte y refinación de petróleo crudo. En la planta, el uso de combustibles fósiles para calentar componentes y en la fase de mezclado contribuye a las emisiones [21].

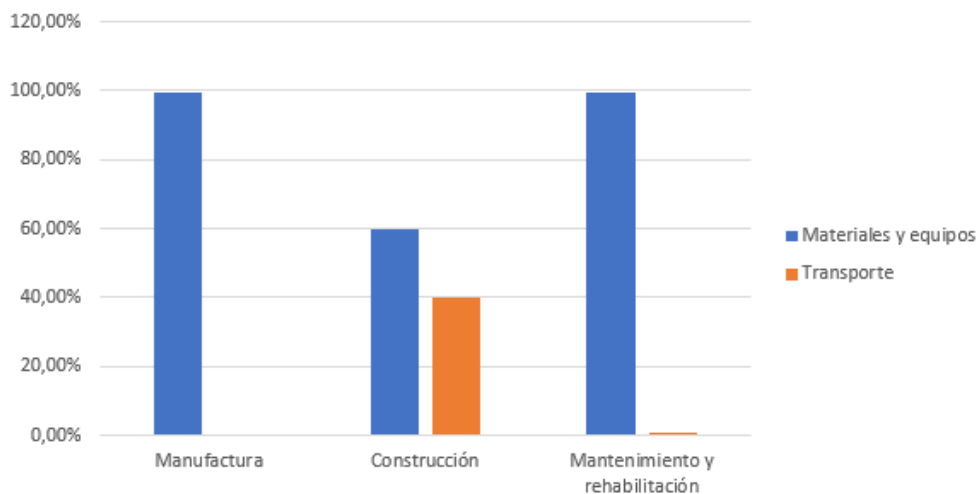
Durante las etapas de transporte, colocación y compactación, los vehículos, extendedoras y apisonadoras emiten GEI al aire. También se debe considerar la liberación de GEI de la mezcla asfáltica en caliente. En general, las emisiones de GEI se expresan como equivalente de CO<sub>2</sub>, ya que la cantidad de energía requerida determina la cantidad de dióxido de carbono liberado al quemar más combustible. Un estudio en China demuestra que el 54.01% de las emisiones de GEI en equivalente de CO<sub>2</sub> proviene de la producción de mezcla asfáltica, mientras que el 43.18% se origina en la producción de materias primas. El transporte de materias primas y mezclas asfálticas genera aproximadamente el 1.35% del total de CO<sub>2</sub> equivalente, mientras que las fases de tendido y compactación contribuyen con el 0.86% y 0.61% del total de emisiones de GEI, respectivamente [21].

De acuerdo con Polania la combinación de alternativas como el reciclaje de residuos de construcción contribuyen a la preservación del medio ambiente, debido a que, en contraste con otras opciones, mejoran los procesos de construcción sin la posibilidad de incrementar el impacto medioambiental que normalmente se generaría. Bajo esa perspectiva, uno de los hallazgos expuestos hace referencia a la reducción de la energía y temperatura consumida durante la preparación de la mezcla asfáltica, lo que representa una reducción significativa en costos y tiempos. Mientras tanto al reducirse el consumo de energía y temperatura, se reducen los niveles de emisión de humos contaminantes a la atmosfera [3]. De acuerdo con el estudio realizado por García et al., en el proceso de producción de emulsión y mezcla asfáltica para construcción, se generan un promedio de 178,84 kg y 46,67 kg de CO<sub>2</sub> por cada m<sup>3</sup> [22] .

Los principales impactos generados por el uso de materiales convencionales de construcción en Mezclas Asfálticas Densas en Caliente (MDC) guardan relación con el potencial de calentamiento global, potencial de acidificación, potencial de eutrofización, potencial de

agotamiento, partículas de kg PM<sub>2.5</sub> eq (HH), consumo de energía primera y renovable, consumo de combustibles fósiles. En el estudio realizado, se analizan los impactos generados a lo largo del ciclo de vida, comparando los materiales asfálticos convencionales y aquellos que tienen agregados reciclados; determinando que más del 99% del impacto generado por la construcción de pavimento con Mezcla Densa en Caliente – Asfáltica Convencional (MDC-AC) surge de los materiales, equipos y transporte; siendo este último el de mayor relevancia. Sin embargo, durante la etapa de manufactura es donde se genera un mayor impacto ambiental como consecuencia del alto nivel de consumo de materiales y equipos para construcción, como se observa en la figura 4 [23].

**Figura 4.** Impacto ambiental generado por los materiales asfálticos convencionales



Tomado de [24].

Ortiz et al., Descubrieron que esta herramienta resulta beneficiosa tanto para aquellos interesados en anticipar los efectos ambientales de innovaciones en materiales, diseños o procesos de producción, como para los fabricantes que buscan comprender los principales factores que influyen en los impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida de sus productos. Esto se logra

sin correr el riesgo de cometer errores en la contabilidad ambiental o clasificar de manera incorrecta los efectos de las tecnologías de producción alternativas en función de sus impactos ambientales de ciclo de vida. [25]

En un contexto diferente, Smith y Durham, llevaron a cabo una evaluación de los impactos a lo largo del ciclo de vida de una estructura de pavimento rígido en una unidad funcional de 18.43 kilómetros, con dos calzadas de dos carriles, durante un período de 50 años. Sus hallazgos indicaron que los impactos generados equivalen a 3.750.000 kg de CO<sub>2</sub> por kilómetro construido. En contraste, Shi et al., informaron de 4.000.000 de kg de CO<sub>2</sub> para una unidad funcional de 4.8 km y dos carriles en un período de 20 años [26]. Finalmente, estudios más recientes realizados en 2020 por Singh y Heidari para una unidad funcional de 1 km reportan emisiones de CO<sub>2</sub> a lo largo del ciclo de vida de 10.648.000 y 18.230.000 kg de CO<sub>2</sub> por kilómetro construido [27].

Por otro lado, Ricardo, presenta resultados que indican emisiones de 2.680.000 (kg/t) de CO<sub>2</sub> para una estructura de pavimento que utiliza una mezcla tibia con una inclusión del 15% de RCA (agregado reciclado de concreto), 2.530.000 (kg/t) de CO<sub>2</sub> para una inclusión del 30% de RCA y 2.890.000 (kg/t) de CO<sub>2</sub> para una inclusión del 45% de RCA. En estudios posteriores realizados por Vega et al., para una unidad funcional de 1 km, se reportan emisiones de 3.380.000 (kg/km) de CO<sub>2</sub> para una estructura de pavimento con una mezcla tibia que incluye un 15% de RCA, 3.650.000 (kg/km) de CO<sub>2</sub> con un 30% de RCA y 3.670.000 (kg/km) de CO<sub>2</sub> con un 45% de RCA [14].

Autores como Abdalla, et al., han destacado que los impactos ambientales se pueden reducir a partir de la introducción de una mayor cantidad de material reciclado en la fase de producción de mezcla asfáltica, a partir de sus estudios ACV. Del mismo modo, hicieron alusión a las diferencias evidenciadas en el uso de RCD con agregados naturales y reciclables, demostrando

que las emisiones de gases efecto invernadero se reducen hasta el 65% y la energía no renovable necesaria hasta en el 58%, cuando se emplean agregados recuperados [28]. En consonancia con lo anterior, el estudio del ACV realizado por Zapata Ferrero et al., tuvo como resultado que la combinación entre mezcla tibia de asfalto y RAP, contribuyen a la reducción del consumo de áridos, energía y betún virgen [29].

En Colombia, los métodos utilizados para evaluar las calificaciones que incluyen los efectos identificados mediante el análisis del ciclo de vida carecen de una base de datos específica. Esta base de datos sería esencial para estimar los impactos ambientales ocasionados por los contaminantes en cada una de las fases del ciclo de vida de un pavimento. Sin embargo, en términos generales y en relación con las emisiones, la utilización de materiales reciclados en la construcción de estructuras de pavimento conlleva una reducción de entre el 1% y el 9% de los impactos. Esto se debe a la disminución en la cantidad de combustibles necesarios para la extracción, transformación y transporte de materiales vírgenes, lo que se traduce en menores emisiones ambientales. Además, se destaca que las distancias de acarreo juegan un papel importante en las emisiones, especialmente en las etapas de materiales, construcción y mantenimiento. En este sentido, “se considera una buena práctica ambiental limitar los acarreos a distancias de entre 0 y 20 km, ya que esta medida puede reducir las emisiones relacionadas con el transporte de materiales, maquinaria y equipo en aproximadamente un 67%”.

De acuerdo con Nguyen et al., la elaboración de material asfáltico con porcentajes superiores al 50% de RAP genera impactos medioambientales positivos que involucran la elaboración in situ, la reutilización de materiales a partir de aquellos existentes, la reducción de los costos de materiales de difícil obtención, la corrección de la gradación de los suelos áridos. Del mismo modo, resalta esta práctica como una oportunidad de mitigar los efectos de la

contaminación atmosférica y los riesgos asociados a la salud humana, de acuerdo a las consideraciones expuestas en el Protocolo de Kyoto [30]. Del mismo modo, durante el ACV realizado por Celauro et al., se pudo establecer que el uso de distintos porcentajes de material RAP en el asfalto, aplicado a la cimentación o la capa bituminosa dan como resultado una reducción significativa del consumo de energía y de las emisiones contaminantes debidas principalmente al transporte de los materiales implicados, aumentando de esta forma el comportamiento medioambiental de la carretera. Otra relevante consideración es que emplear suelos finos estabilizados con cal "in situ", en lugar de verterla, no solo mejora las propiedades mecánicas del suelo, sino que también disminuye el gasto energético y la contaminación. Se destaca que esta técnica reduce de manera importante las emisiones contaminantes relacionadas con el transporte de materiales, lo que contribuye a un mejor desempeño ambiental [31].

Pese a que se relaciona una principal contaminación del medio ambiente con la producción y construcción a partir del material asfáltico convencional elaborado con materiales vírgenes, existen ciertas prácticas sostenibles que contribuyen a disminuir dichos impactos. Por su parte, a partir de investigaciones como la de Araneda y Prádena se ha comprobado que la opción reciclada en frío suele tener un impacto un 50% menor en comparación con un pavimento convencional. En cuanto al calentamiento global, el pavimento asfáltico de mezcla en caliente emite tres veces más gases de efecto invernadero que la alternativa reciclada en frío [32].

Las principales razones detrás de estas diferencias son la técnica de construcción in situ de la alternativa RAP y, en el caso de Chile, las largas distancias hasta una planta de mezcla asfáltica en caliente. Del mismo modo, según indican Jahanbakhsh et al., las mezclas asfálticas con caucho generan emisiones significativamente menores de CO y CH<sub>4</sub> en comparación con las mezclas asfálticas convencionales en caliente. Esta tecnología, llamada asfalto con caucho, se caracteriza

como una opción respetuosa con el medio ambiente debido a su capacidad para ahorrar energía, mejorar la salud humana, reducir la explotación de recursos, preservar los ecosistemas, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y reducir el ruido del pavimento [33].

#### **4.3 Análisis del ciclo de vida materiales asfálticos convencionales y asfálticos**

En lo que respecta a los materiales asfálticos convencionales o producidos a través del uso de materiales vírgenes, existen dos técnicas diferentes mencionadas por Reza y Shishehbor, la primera es la Mezcla Asfáltica en Caliente (WMA por sus siglas en inglés) y Mezcla Asfáltica Semicálida (HMA por sus siglas en inglés). En su evaluación del impacto ambiental de ambas mezclas en 15 proyectos alrededor del mundo, demostraron que las tecnologías WMA impactan significativamente en la reducción de los gases efecto invernadero como el CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y CO. Sin embargo, también se evidencia una variación del dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en función del tipo de combustible, quemador, mantenimiento y las plantas empleadas para el procesamiento del material asfáltico [34].

Por su parte, Valle, realizó un análisis de los impactos ambientales generados por el hormigón asfáltico e hidráulico 20 años después de la construcción de una carretera, empleando la metodología ACV, para lo cual definió siete (7) categorías de impacto: agotamiento abiótico, agotamiento abiótico (Combustibles fósiles), calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono, oxidación fotoquímica, acidificación y eutrofización. Estas categorías fueron empleadas para analizar el impacto medioambiental generado a lo largo del ciclo de vida de una carretera de 1 km y los resultados se pueden apreciar en la tabla 1 [24].

**Tabla 1.** *Análisis comparativo impacto ambiental 20 años de una estructura de pavimento de 1 km*

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Unidad</b>	<b>Hormigón Hidráulico</b>	<b>Hormigón Asfáltico</b>
Agotamiento abiótico	KG Sb Eq	0.55	0.03
Agotamiento abiótico (combustibles fósiles)	MJ	1119632014	1120107221
Calentamiento global	KG CO2 Eq	2423020	5570697
Agotamiento de la capa de ozono	KG CFC – 11 Eq	0.34	1.46
Oxidación fotoquímica	KG C2H4 Eq	509	1023
Acidificación	KG SO2 Eq	13578	28021
Eutrofización	KG PO4 Eq	3768	7423

Tomado de [24].

En la Figura 4, se observan los resultados de la caracterización de impacto para los dos tipos de hormigón analizados por Valle en donde se pueden identificar que la variación menos representativa se encuentra en el agotamiento abiótico generado por el uso de combustibles fósiles. Sin embargo, en las demás categorías, el hormigón asfáltico presenta un mayor índice de deterioro del medio ambiente presentando aproximadamente el doble de Kg CO2 Eq que el hormigón hidráulico. Así mismo, el índice de agotamiento de la capa de ozono resultante de la construcción de una carretera a lo largo de 20 años con este tipo de asfalto elaborado con materiales vírgenes supera por cuatro (4) veces el del hormigón hidráulico. Del mismo, los niveles de emisiones de CO2 durante los 20 años en la fase de construcción para el hormigón hidráulico fue de 314mil kg y 29mil kg aproximadamente para el hormigón asfáltico. Mientras tanto, en la etapa de mantenimiento solo el hormigón asfáltico genera CO2 (240 mil kg aprox.), tales datos se pueden apreciar en la Tabla 1 [24].

**Tabla 2.** *Kg de CO2 emitido por fases asociadas a la estructura de construcción de pavimento a 20 años*

	<b>Hormigón hidráulico</b>	<b>Hormigón Asfáltico</b>
Construcción	3145403	2911770

---

Mantenimiento	No aplica	2404007
Albedo	-718454	179613
Carbonatación	-79184	No aplica
Consumo combustible	75255	75307

---

Tomado de [24].

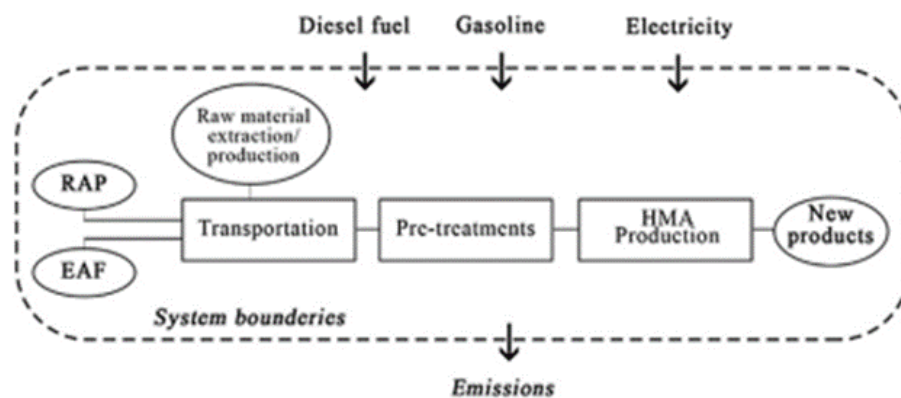
El mayor impacto medioambiental se observa en la categoría de Agotamiento de Recursos Abióticos de Combustibles, especialmente durante la fase de utilización, debido al consumo de combustible por parte de los vehículos que circulan por la carretera. En este contexto, las composiciones de pavimento de concreto asfáltico generan un impacto más significativo, representando aproximadamente el 99% del total para ambas variantes de pavimento. Durante la fase de construcción, la estructura del pavimento de concreto hidráulico exhibe un rendimiento medioambiental superior en esta categoría, siendo aproximadamente el doble en comparación con el pavimento de concreto asfáltico [24].

En lo que respecta a la categoría de Potencial de Calentamiento Global, el mayor impacto se produce durante la fase de construcción en ambas alternativas de pavimento. Después de 20 años de uso, el pavimento de concreto asfáltico tiene un impacto superior al del concreto hidráulico, en una proporción aproximada de dos a uno. Durante la fase de construcción, el uso de concreto, especialmente en la capa de rodadura, tiene una contribución significativa debido a las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la producción de cemento. Sin embargo, durante la fase de utilización, el pavimento de concreto hidráulico muestra ventajas debido a la reducción de CO<sub>2</sub> gracias a los efectos albedo y de carbonatación. En la categoría de Calentamiento Global, las actividades de mantenimiento de recubrimiento para el pavimento de concreto asfáltico representan la mayor parte del impacto negativo, contribuyendo aproximadamente en un 80% al

impacto total de la construcción de la estructura. Además, la aplicación de concreto asfáltico disminuye el albedo, lo que contribuye con un 3% adicional en esta categoría [24].

Por otro lado, El pavimento de concreto hidráulico genera un impacto significativamente más alto en la categoría de Agotamiento Abiótico que el pavimento de concreto asfáltico, en una relación de casi veinte a uno. Esta diferencia sustancial se debe principalmente al empleo de cemento en su composición, así como a la extracción intensiva de materias primas directamente de la corteza terrestre. En contraste, el pavimento de concreto asfáltico tiene un “impacto significativamente mayor en la categoría de Agotamiento de la Capa de Ozono en comparación con el pavimento de concreto hidráulico, en una proporción de aproximadamente cinco a uno, debido a las emisiones asociadas a la producción de las mezclas asfálticas” [24].

**Figura 5.** Diagrama de flujo de reciclado de pavimento asfáltico regenerado (RAP) y horno de arco eléctrico en el caso de estudio



Tomado de [24].

En lo que respecta a las mezclas que emplean materiales reciclados, Bonoli et al., desarrollan un ACV de hormigones asfálticos fabricados con áridos RAP y escorias de acero (EAF) en una planta de producción de materiales para construcción en Italia, comparando cada una de las etapas de procesamiento de cuatro (4) mezclas diferentes (véase figura 6). En el caso de estudio

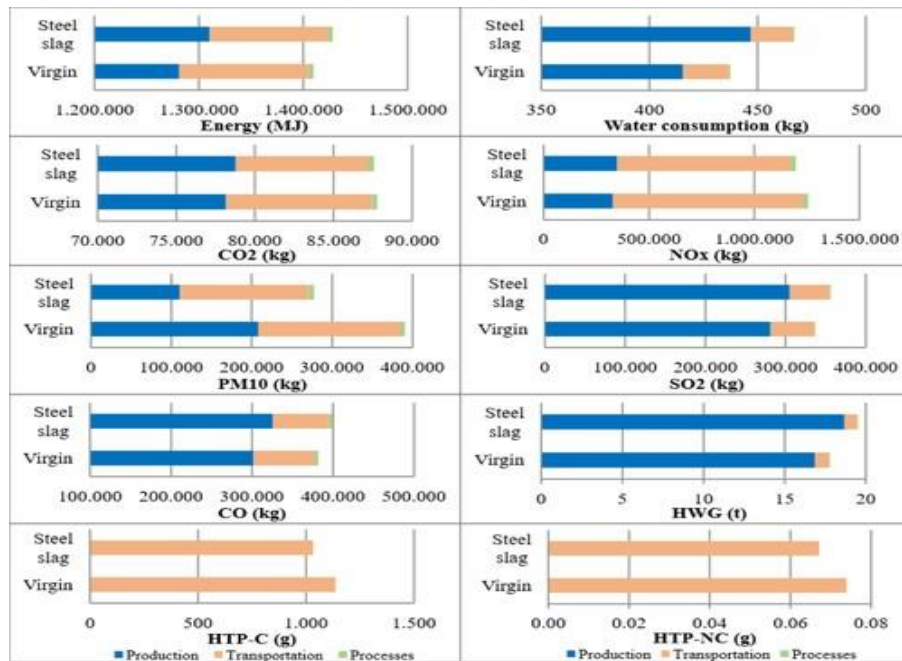
en mención, se tomaron en cuenta los procesos de transporte de materia prima y RAP, el pretratamiento del RAP, la producción final de áridos reciclados y evitar la generación o transporte de betún virgen (sustituido por betún reciclado). Como marco de referencia para la determinación de los impactos ambientales se tomó la Norma ISO 14044 de 2006, midiendo las sustancias y asignando categorías de impacto acorde a los resultados esperados, tal y como se observa a continuación. [35]

**Figura 6.** Impactos ambientales relacionados con las mezclas analizadas

Categorías de impacto	Unidad	Total			
		MixW0	MixW1	MixB0	MixB1
Potencial de calentamiento global	kg CO <sub>2</sub> eq.	7.51E + 04	4.60E + 04	9.37E + 04	5.80E + 04
Toxicidad en humanos	kg 1,4 - DB eq.	2.86E + 04	1.82E + 04	4.02E + 04	2.62E + 04
Acidificación	kg. SO <sub>2</sub> eq.	5.30E + 02	3.09E + 02	6.36E + 02	3.35E + 02
Eutrofización	kg PO <sub>4</sub> eq.	1.30E + 02	8.31E + 01	1.73E + 02	1.09E + 02
Ecotoxicidad	kg 1,4 - DB eq.	2.30E + 03	1.53E + 03	2.33E + 03	1.55E + 03
Oxidación fotoquímica	kg C H <sub>24</sub>	2.61E + 01	1.53E + 01	3.25E + 01	1.72E + 01
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC - 11 eq.	4.74E - 02	3.18E - 02	5.97E - 02	3.39E - 02
Agotamiento abiótico	kg Sb eq.	2.44E - 01	1.45E - 01	2.23E - 01	1.49E - 01
Agotamiento abiótico combustibles fósiles	MJ	3.74E + 06	2.52E + 06	4.73E + 06	2.73E + 06

Tomado de [24].

Los resultados del estudio realizado por Bonoli et al., demuestran que el uso de materiales RAP y EAF contribuye a la reducción del impacto ambiental, implicando, la reducción del consumo de áridos naturales y betún virgen. Según el análisis ACV, se evidencia una reducción en las categorías de impacto ambiental de la siguiente manera: 30,5% toxicidad humana, 24% eutrofización, 21% potencia del calentamiento global y 2,15% producción de betún virgen por tonelada [35].

**Figura 7.** Comparativo impacto ambiental escoria de acero vs material virgen

Tomado de [24].

Pese a que se evidencian efectos benéficos del RAP en el medio ambiente, no todos los residuos representan aspectos positivos, como lo demuestran los resultados del estudio realizado por Georgiou y Loizos, quienes evaluaron el impacto ambiental de mezclas asfálticas a las cuales se les incorporó escoria metálica de la industria siderúrgica y otra con capas de rodadura con un alto grado de recuperación, como se observa en la figura 8. El estudio señala que los resultados muestran impactos ambientales divergentes al reemplazar los agregados vírgenes con escoria de acero EAF. La mezcla que utiliza escoria de acero tiene beneficios en términos de reducción de NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, HTP (cancerígeno) y HTP (no cancerígeno), lo que indica una mejora en la calidad del aire y en la salud pública. Sin embargo, la misma mezcla con escoria de acero también conlleva una carga adicional en términos de consumo de energía, agua, emisiones de SO<sub>2</sub>, CO y generación de residuos peligrosos [36].

Por otro lado, un análisis de contribución muestra que la producción y el transporte de materiales son las principales fuentes de impactos ambientales, representando aproximadamente el 61% y el 38%, respectivamente. Los procesos de construcción tienen un efecto marginal, con menos del 1% de contribución; mientras que se observa que la sustitución de áridos antideslizantes vírgenes por escorias siderúrgicas no siempre es favorable. Aunque la escoria de acero reduce las emisiones debido a la extracción, su mayor densidad puede aumentar las cargas ambientales debido a la mayor demanda de agregados y masas bituminosas [36].

La distancia de transporte se convierte en un factor crítico para contrarrestar los impactos ambientales adicionales de la escoria de acero. Los áridos antideslizantes vírgenes suelen estar disponibles en áreas geográficas limitadas, mientras que la escoria de acero está vinculada a ubicaciones específicas de las plantas de producción de acero. Por lo tanto, se enfatiza la importancia del análisis de sensibilidad del transporte para determinar distancias óptimas que minimicen los impactos ambientales.

En lo que respecta al ACV, indican que la producción de materiales es la fase que contribuye en el caso de estudio al 61% de los impactos ambientales referenciados, seguido del 38% de contribución de la fase de transporte y tan solo el 1% de la construcción. En síntesis, reemplazar áridos gruesos naturales con escorias siderúrgicas, a pesar de los beneficios significativos como la reducción de vertederos y el ahorro de materias primas, puede generar impactos ambientales adicionales debido a la necesidad de utilizar más material debido a su mayor densidad. No obstante, estos impactos pueden ser contrarrestados según la distancia de transporte en comparación con los áridos naturales [36].

#### 4.4 Principales diferencias entre ambos tipos de mezclas asfálticas

Las principales diferencias en términos de impacto ambiental entre las mezclas asfálticas elaboradas con materiales vírgenes y aquellas que incorporan compuestos o agregados reciclados se relacionan con la extracción de recursos naturales, la energía requerida en la producción y el manejo de residuos, tal como se observa en la siguiente tabla.

**Tabla 3.** *Diferencias entre ambos tipos de mezclas*

	<b>Mezclas Asfálticas con Materiales Vírgenes</b>	<b>Mezclas Asfálticas con Agregados Reciclados</b>
<b>Extracción de recursos naturales</b>	Se requiere la extracción de recursos naturales, como petróleo crudo (para obtener el asfalto) y agregados pétreos, como grava y arena. Esta extracción puede tener un impacto significativo en el medio ambiente, incluyendo la degradación del suelo y la destrucción de hábitats naturales.	Se reduce la necesidad de extraer nuevos recursos naturales, ya que se utilizan materiales reciclados, como el asfalto fresado de carreteras viejas o residuos de construcción y demolición. Esto disminuye la presión sobre los ecosistemas naturales y reduce la generación de residuos
<b>Energía requerida en la producción</b>	Suele requerir una mayor cantidad de energía debido al procesamiento de los recursos naturales, como la destilación del petróleo crudo para obtener el asfalto. Esto contribuye a una mayor emisión de gases de efecto invernadero y al consumo de energía no renovable.	Generalmente consume menos energía, ya que se evita la extracción y procesamiento de materiales vírgenes. Además, el reciclaje de materiales reduce la necesidad de transportar grandes volúmenes de agregados desde canteras distantes, lo que también ahorra energía.
<b>Manejo de residuos</b>	A menudo se convierten en residuos que deben ser eliminados o reciclados. Esto puede generar un flujo constante de residuos de construcción y demolición que ocupan espacio en vertederos y requieren una gestión adecuada.	A menudo son más fáciles de reciclar al final de su vida útil. El asfalto fresado de carreteras viejas se puede reutilizar en nuevas mezclas, lo que reduce la cantidad de residuos generados y el impacto ambiental asociado con su eliminación.

Según Méndez, “la vida útil estimada de las secciones rehabilitadas con mezclas recicladas supera a la de aquellas rehabilitadas con métodos convencionales según las normativas actuales” [37]. Sin embargo, es crucial considerar el espesor de las capas recicladas, ya que aquellas con

buena resistencia estructural pueden volverse problemáticas si el espesor no es adecuado. Por lo tanto, se necesita un control y un análisis previo de las variables que pueden influir. Así mismo, es importante destacar que, en la mayoría de los casos, el reciclaje resulta ser la opción más económica. Sin embargo, la falta de información y confiabilidad en el método limita su uso. Además, el reciclaje conlleva ventajas ambientales, como la reducción de la extracción de recursos naturales, el ahorro en transporte, la disminución del almacenamiento en vertederos y el uso eficiente de los recursos, convirtiendo al reciclaje de asfalto en una tecnología respetuosa con el medio ambiente [38].

Sin embargo, sigue habiendo dudas sobre el rendimiento de las mezclas de asfalto regenerado producidas en plantas, por lo que el uso de estas mezclas en proyectos reales suele limitarse al 30%. Esta limitación impide el uso eficaz de los RMP. El uso de RMP en mezclas asfálticas regeneradas en caliente se ve afectado por varios factores, uno de los cuales es el grado de mezcla (DOB) de las ligantes vírgenes con los RMP. Durante la producción de mezclas asfálticas regeneradas en caliente, los ligantes asfálticos contenidos en los RMP, que cubren la superficie de los áridos RMP, se mezclan gradualmente con los ligantes asfálticos primarios.

Por otro lado, en el análisis del coste del ciclo de vida, se demostró que la impermeabilización con agregados RAP es significativamente más económica, alrededor de un 23-37% más barata que una impermeabilización similar con árida virgen, manteniendo propiedades comparables. Además, las pruebas de revestimiento con arena demostraron que la impermeabilización con RAP tenía una mayor profundidad media de textura en comparación con la árida virgen. Sin embargo, tanto en los ensayos de resistencia al deslizamiento como en los de cizallamiento directo, no se encontraron diferencias significativas entre las impermeabilizaciones económicas con RAP y con árida virgen [39].

A nivel nacional, es necesario mejorar el uso del RAP en la construcción de carreteras, ya que una cantidad significativa del material se pierde debido a la oxidación causada por los retrasos en su aplicación. Es necesario considerar el uso de RAP "in situ" o minimizar la exposición del material para evitar estas pérdidas. Además, hay que tener en cuenta que una mezcla que contenga más de un 30% de RAP pierde sus propiedades adhesivas y cohesivas, por lo que es necesario determinar el porcentaje adecuado de RAP en la mezcla [38].

Aunque la reglamentación del INVÍAS permite un máximo de 40% de RAP en carreteras nuevas, Colombia utiliza en promedio sólo 15% de RAP, un porcentaje extremadamente bajo comparado con los estándares internacionales, debido principalmente a la falta de conocimiento y manejo de este tema. Desde el punto de vista económico, el uso del reciclaje "en frío" in situ para mantener las carreteras secundarias puede ahorrar hasta un 35% en costes operativos en comparación con otras alternativas. Aunque esta opción aumenta los costes de mantenimiento, representa una reducción del 23% de los costes económicos a lo largo de la vida útil de la infraestructura [38].

De acuerdo con Meza, el uso de productos de reciclado y estabilización ofrece una solución viable y económica para reutilizar los materiales existentes en las carreteras, garantizando la calidad y reduciendo el coste del transporte de nuevos materiales. A pesar de su uso generalizado y de su durabilidad, las carreteras en Colombia todavía se diseñan utilizando enfoques convencionales, sin recurrir a la reutilización de los materiales existentes. Sin embargo, la creciente concienciación medioambiental y la escasez de recursos en algunas regiones están promoviendo el uso de RAP y de métodos más sostenibles en la construcción de carreteras [38].

## 5. Conclusiones

En el desarrollo del primer objetivo específico de este estudio, que consiste en analizar el impacto medioambiental causado por el uso de mezclas asfálticas vírgenes y recicladas, se constató que la producción y construcción de mezclas asfálticas convencionales fabricadas a partir de materiales naturales puede causar una serie de impactos medioambientales significativos durante su ciclo de vida. Estos impactos incluyen las emisiones de gases de efecto invernadero, el consumo de recursos naturales, la generación de residuos y las emisiones contaminantes asociadas al transporte de materiales y maquinaria. Sin embargo, tecnologías como el reciclado a baja temperatura y el asfalto ofrecen alternativas más sostenibles que pueden reducir el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Los estudios de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) han demostrado que las mezclas asfálticas convencionales fabricadas con áridas vírgenes tienen importantes impactos medioambientales a lo largo de su ciclo de vida, incluidas las emisiones de GEI y el agotamiento de los recursos naturales. Estos impactos varían en función de la tecnología utilizada, como las mezclas bituminosas en caliente (HMA) o las mezclas bituminosas semicalientes (WMA). En cambio, las mezclas que utilizan materiales reciclados (por ejemplo, RAP) tienden a reducir estos impactos, ya que reducen la necesidad de extraer recursos naturales y las emisiones relacionadas con el transporte. Sin embargo, los impactos de estas mezclas pueden variar dependiendo del tipo de material reciclado y de la tecnología utilizada. Además, la distancia de transporte desempeña un papel importante en la evaluación de los impactos medioambientales, ya que puede afectar a los beneficios medioambientales netos de las mezclas fabricadas con materiales reciclados.

Por último, un análisis comparativo de los impactos medioambientales causados por cada tipo de mezcla asfáltica a lo largo de su ciclo de vida revela diferencias significativas entre ellas.

Los resultados muestran que las mezclas asfálticas que utilizan materiales reciclados tienen un menor impacto medioambiental en términos de extracción de recursos naturales, consumo de energía y generación de residuos que las mezclas asfálticas que utilizan materiales vírgenes. Se obtiene una reducción en las categorías de impacto ambiental de la siguiente manera: en un rango del 30% al 35% de toxicidad humana, del 20% al 25% eutrofización y del 20 al 23% potencia del calentamiento global. Este análisis subraya la importancia de considerar alternativas más sostenibles en la construcción de carreteras y pone de relieve el potencial para reducir el impacto ambiental de las infraestructuras viarias mediante la adopción de prácticas más ecológicas.

### Referencias

- [1] J. L. H. Michaca, V. M. S. Granados y I. C. Chaires, «Sanfandila,» 2001. [En línea]. Available: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt173.pdf>.
- [2] T. D. M. Roa, «Repositorio uniandes,» 2016. [En línea]. Available: <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/a37e654b-8656-458b-b3ed-be0600ac9477/content>.
- [3] J. L. P. Rodriguez, «Fundación Universidad de América,» 2021. [En línea]. Available: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8404/1/862206-2021-I-GA.pdf>.
- [4] A. V. A. Acelas y M. F. A. Jurado, «repository unad,» 2018. [En línea]. Available: <https://repository.unad.edu.co/jspui/handle/10596/18318?locale=pt>.
- [5] G. C. Morales, «Intentionally left blank,» 2024. [En línea]. Available: <https://idrc-rdci.ca/sites/default/files/openbooks/147-7/index.html>.
- [6] Pavimentoscolombia S.A.S, «Pavimentoscolombia.com,» 2019. [En línea]. Available: <https://pavimentoscolombia.com/wp-content/uploads/2023/06/Informe-de-Sostenibilidad-2019-Pavimentos-Colombia-SAS.pdf>.
- [7] C. E. C. Escaf, «Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible,» 23 Noviembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/12/Resolucion-1257-de-2021.pdf>.
- [8] ISO, «ISO 14044:2006,» 2006. [En línea]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:es>.

- [9] Trenberth, Jones, Ambenje, Bojariu, Pascual, T. Klein, Parker, Rahimzadeh, Remwick, Rusticucci, Zoden y Shai, «Department of Energy Office of Scientific and Technical Information,» 2007. [En línea]. Available: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20962165>.
- [10] C. Espíndola y J. Valderrama, «Scielo,» 2012. [En línea]. Available: [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642012000100018&lng=en&nrm=iso&tlng=en](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642012000100018&lng=en&nrm=iso&tlng=en).
- [11] H. A. Gutierrez, O. L. Chávez, S. M. M. Ibarra y J. L. A. Razo, «Ecorfan,» 2020. [En línea]. Available: [https://www.ecorfan.org/republicofperu/research\\_journals/Revista\\_de\\_Energias\\_Renovables/vol4num12/Revista\\_de\\_Energ%C3%ADas\\_Renovables\\_V4\\_N12\\_2.pdf](https://www.ecorfan.org/republicofperu/research_journals/Revista_de_Energias_Renovables/vol4num12/Revista_de_Energ%C3%ADas_Renovables_V4_N12_2.pdf).
- [12] P. E. B. Castro, K. B. G. Molina y C. J. C. Cabrera, «Ciencia digital,» 5 Noviembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.cienciadigital.org/revistacienciadigital2/index.php/ConcienciaDigital/article/view/1927>.
- [13] Ideam, «Ideam,» 2002. [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/formacion-y-destruccion-del-ozono-estratosferico#:~:text=El%20proceso%20de%20la%20destrucci%C3%B3n,que%20destruyen%20el%20ozono%20estratosf%C3%A9rico..>
- [14] R. A. S. Diaz, «Repository.unimilitar,» 2014. [En línea]. Available: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/13034/RUTA%20DEL%20S;jsessionid=9D657F797B9AD6B81E28F409E2379267?sequence=1>.

- [15] Á. S. Calderón, «Redalyc,» 2006. [En línea]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=17712108>.
- [16] C. A. B. Ladino y J. D. C. Suarez, «Repository.ucc,» 2018. [En línea]. Available: <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/7059176f-981a-407e-b41a-559af1a24dee/content>.
- [17] J. B. C. Aldape, «Dialnet,» 2002. [En línea]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=237522>.
- [18] C. R. M. Uribe y G. A. T. Zeballos, «Redalyc,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/1276/127631777007.pdf>.
- [19] H. A. Rojas, «Repositorio.tec,» Junio 2019. [En línea]. Available: [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/11014/evaluacion\\_pavimento\\_asfaltico\\_reciclado\\_sustituto.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/11014/evaluacion_pavimento_asfaltico_reciclado_sustituto.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- [20] A. M. Paima y P. E. A. Tarma, «Universidad de Costa Rica,» 17 Mayo 2023. [En línea]. Available: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/view/53441>.
- [21] G. Tarsi, P. Tataranni y C. Sangiorgi, «Mdpi,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/18/4052>.
- [22] A. J. G. Avila, «Diseño de mezclas asfálticas tibias utilizando aceite crudo de palma como reductor de viscosidad,» Guatemala, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, 2015, p. 186.
- [23] J. A. S. Duarte y N. L. A. Tambo, «Repository.ucatolica,» 2022. [En línea]. Available: <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/96db7cac-7ba2-42e5-86c8-9a37ef6eff04/content>.

- [24] J. P. V. Gómez, «Dspace,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/51496/1/T-110146.pdf>.
- [25] X. C. G. A. M. R. R. M. R. Jorge ORTIZ RIPOLL, «Impactos ambientales de mezclas bituminosas recicladas en caliente, semicalientes y templadas,» *ASEFMA 2019*, p. 11, 2019.
- [26] Z. W. Z. C. T. C. L. J. Z. Caijun Shi, «Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO<sub>2</sub> and pozzolan slurry,» *Cement and Concrete Composites*, vol. 86, pp. 130-138., 2018.
- [27] S. Smith y S. Durham, «Science Direct,» Junio 2016. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212609015301072>.
- [28] A. F. A. F. & W. E. Abdalla, «Life cycle assessment of eco-friendly asphalt pavement involving multi-recycled materials: A comparative study,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 362, p. 132471, 2022.
- [29] I. Zapata Ferrero, J. Rivera y G. Botasso, «Análisis del ciclo de vida en pavimentos: actualidad y perspectiva,» *Ingenio tecnológico*, vol. III, p. 11, 2021.
- [30] M. L. B. J. M. D. B. H. S. C. B. K. O. F. .. & B. D. Nguyen, «Evaluation of pavement materials containing RAP aggregates and hydraulic binder for heavy traffic pavement.,» *Road Materials and Pavement Design*, vol. 18, nº 2, pp. 264-280, 2017.
- [31] C. C. F. G. M. & C. B. L. Celauro, «Environmentally appraising different pavement and construction scenarios: A comparative analysis for a typical local road,» *ransportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 34, pp. 41-51, 2015.
- [32] M. E. Araneda, M. Pradena y M. P. Rodrigo Silva, «Ice virtual library,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/jensu.21.00036>.

- [33] H. K. M. M. N. H. & N. F. M. Jahanbakhsh, «Sustainable asphalt concrete containing high reclaimed asphalt pavements and recycling agents: Performance assessment, cost analysis, and environmental impact.,» *Journal of Cleaner Production*,, vol. 244, p. 118837, 2020.
- [34] M. R. & S. M. (. Pouranian, «Sustainability assessment of green asphalt mixtures: A review.,» *Environments 2019*, vol. 6, n° 6, p. 73, 2019.
- [35] A. D. E. A. & M. C. Bonoli, «A case study of industrial symbiosis to reduce GHG emissions: Performance analysis and LCA of asphalt concretes made with RAP aggregates and steel slags.,» *Frontiers in Materials*, vol. 7, p. 572955, 2020.
- [36] P. Georgiou y A. Loizos, «Taylor & Francis,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14680629.2021.1906305>.
- [37] A. A. Méndez Revollo, «Evaluación técnica y económica del uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en vías colombianas.,» 2015. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/10654/13208..>
- [38] N. Meza, «Repository.usta,» 2023. [En línea]. Available: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/50199/2023nicolasmeza.pdf?sequence=6&isAllowed=y>.
- [39] H. Saleh y A. Hassan, «Books,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.intechopen.com/books/12044>.